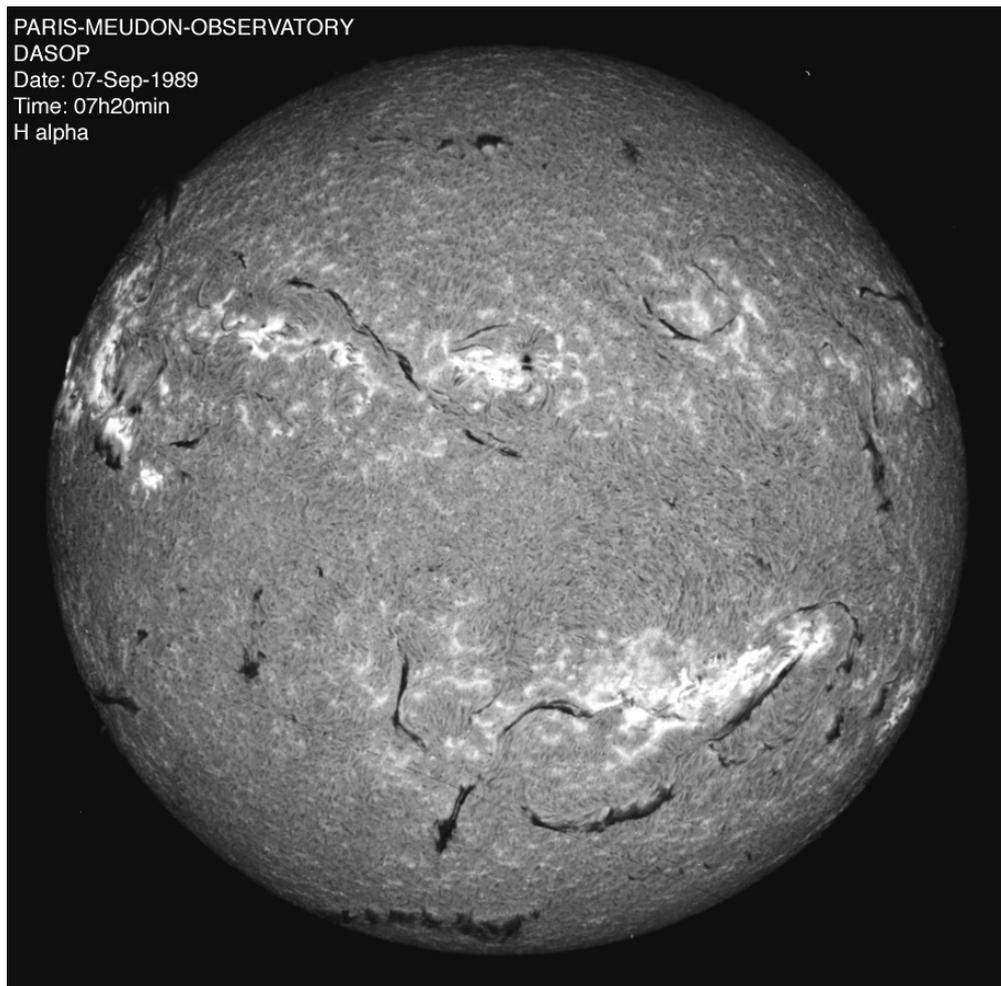


Les observations optiques du Soleil à Meudon

Histoire et développements instrumentaux

Par Régis LE COCGUEN, Observatoire de Paris
LESIA, 5, place Jules Janssen, 92195 Meudon, Cedex



L'observatoire de Meudon est un haut lieu de la physique solaire et ce, depuis son origine en 1875. Janssen y développa l'imagerie de la photosphère puis, grâce à ses géniales idées, Deslandres put à son tour imager la chromosphère. Bernard Lyot s'attaqua à la couronne et ce sont des générations d'astronomes talentueux qui se sont relayés pour développer cette branche de la physique. Grâce à eux et à leurs successeurs, qui sont toujours en activité, nos connaissances sur le Soleil sont de plus en plus vastes.

L'histoire que nous allons raconter est celle d'un groupe de l'Observatoire de Paris, le pôle solaire du LESIA. Cette histoire, nous la raconterons par les instruments et les méthodes d'observation.

Ce mémoire est une synthèse de plus de 130 années de travail et de passion. Il a été initié par le Diplôme Universitaire de l'Observatoire de Paris, mais il a pour but de faire découvrir les observations solaires de Meudon à tous nos visiteurs et nouveaux collaborateurs. Pour comprendre les travaux actuels, il faut en connaître l'histoire.

Je tiens à remercier Jean-Marie Malherbe qui a été mon directeur de mémoire. Il a relu avec attention chacune des épreuves et a constamment veillé au respect de la rigueur scientifique du texte.

Je remercie également Audouin Dollfus qui a consacré beaucoup de son temps pour m'aider à rédiger ce texte. J'ai passé des après-midi très agréables près de lui à recevoir des leçons d'astronomie expérimentale. Ses conseils de rédaction ont été très précieux et m'ont aidé à donner au texte une allure moins rébarbative.

Je remercie aussi tous mes collègues du DASOP, puis du pôle solaire, qui m'ont distillé un peu de leur savoir depuis mon entrée à l'observatoire en 2001.

Ce travail n'aurait jamais été concrétisé sans l'équipe dynamique composée de Chantal Balkowski, Jean-Eudes Arlot, Géraldine Redouani, Marie-France Landréa et tous les enseignants du DUOP qui a su m'enseigner de façon simple mais rigoureuse les bases de l'astronomie telle qu'elle est pratiquée dans nos laboratoires.

Pour terminer, je tiens à rendre hommage à mon épouse, Katia, qui a du supporter un désordre permanent dans un salon transformé, le temps de la rédaction, en bureau et bibliothèque.

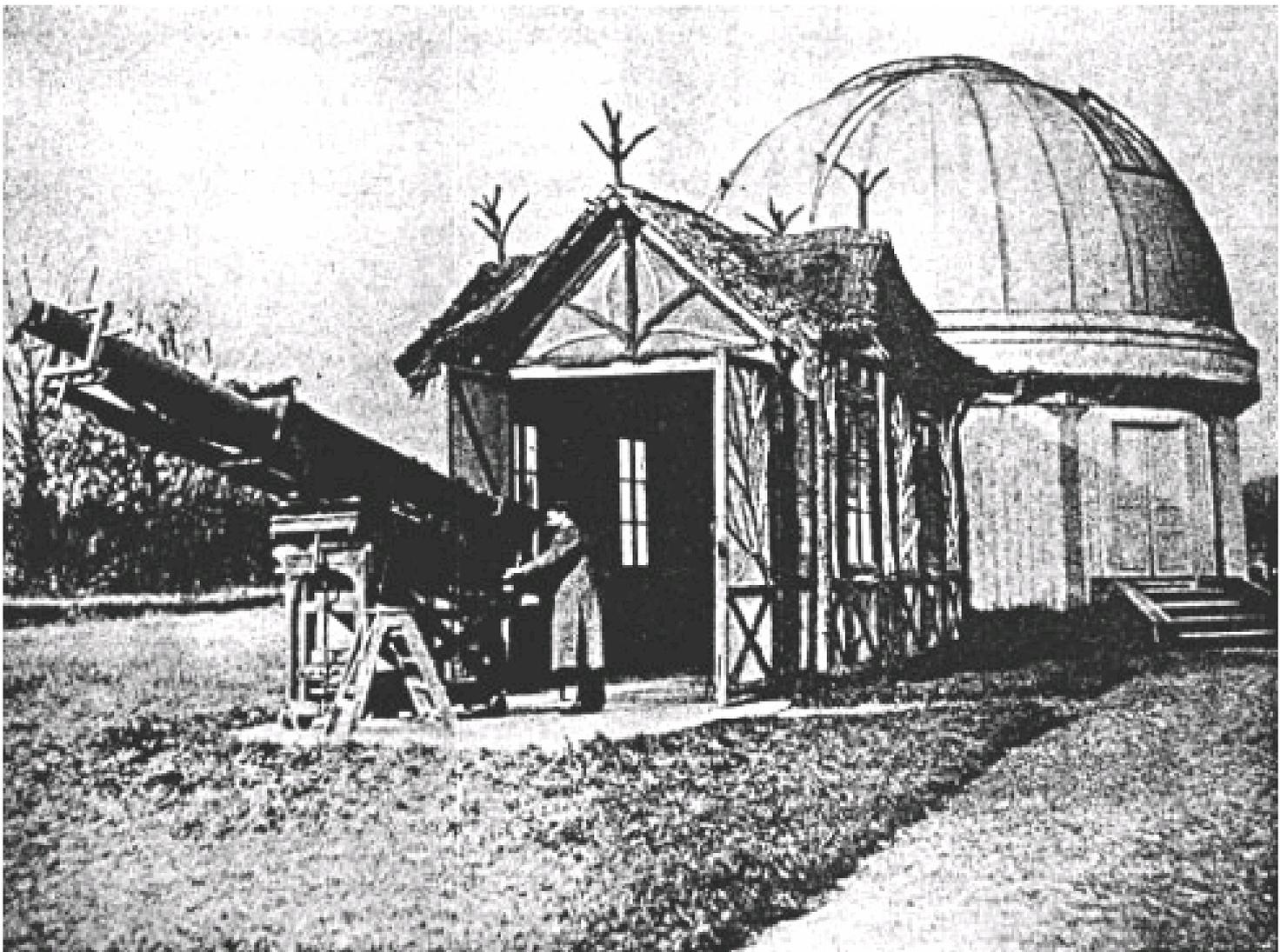
Table des matières

Première partie. Histoire des observations du Soleil.....	6
Historique du site.....	7
Pierre, Jules, César Janssen.....	9
La création de l'observatoire de Meudon.....	12
La lunette photographique solaire.....	14
Étude de la surface solaire par la photographie.....	19
L'observatoire du Mont Blanc.....	21
Henri-Alexandre Deslandres.....	22
Lucien d'Azambuja.....	29
L'anamorphoseur de clichés solaires.....	32
Bernard Lyot.....	34
Le filtre polarisant de Lyot.....	37
Le coronographe.....	39
Le coronomètre de Lyot.....	45
Les hommes de Meudon.....	46
Deuxième partie. Période moderne, évolution des techniques.....	47
Le polarimètre photoélectrique solaire.....	49
Le polarimètre coronal.....	50
La lunette solaire polarimétrique.....	51
L'étude de la couronne monochromatique.....	53
La couronne solaire par ballon nacelle.....	54
La granulation solaire.....	56
La lunette Jean Rösch.....	58
Les héliographes monochromatiques.....	60

L'héliographe monochromatique de la monture d'Eichens.....	64
La spectroscopie.....	66
Le spectrographe solaire de 9 m de Meudon.....	66
Le spectrographe à éruption du pic du Midi.....	68
Le spectrographe de 9 m.....	71
Le spectrographe tourelle.....	72
L'effet Zeeman.....	75
Le magnétographe solaire de Meudon.....	78
L'expérience Solarnet.....	86
Le Filtre Polarisant Solaire Selectif.....	87
La tour solaire.....	92
Le Double Passage Soustractif Multicanal.....	98
Le télescope THEMIS.....	102
En guise de conclusion.....	111
Annexe. Un peu de physique solaire.....	114
Bibliographie.....	121

Première partie

Histoire des observations du Soleil

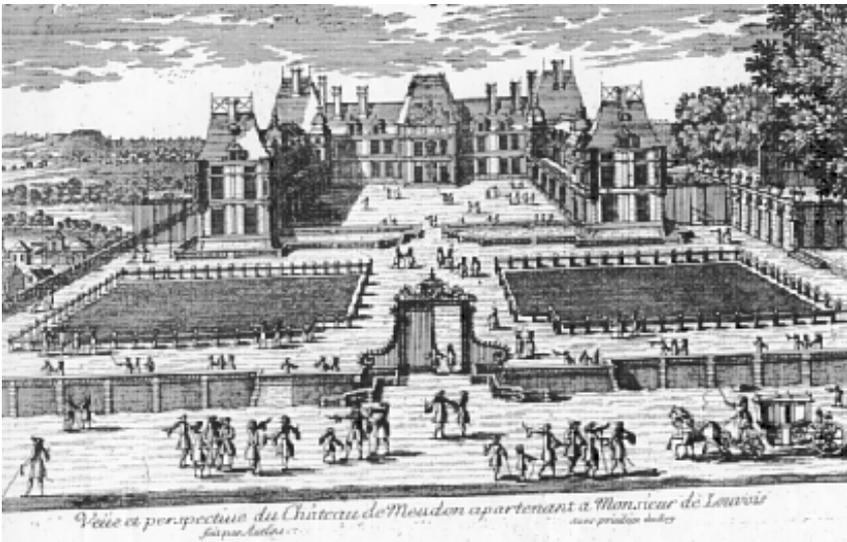


La lunette photographique de Janssen.

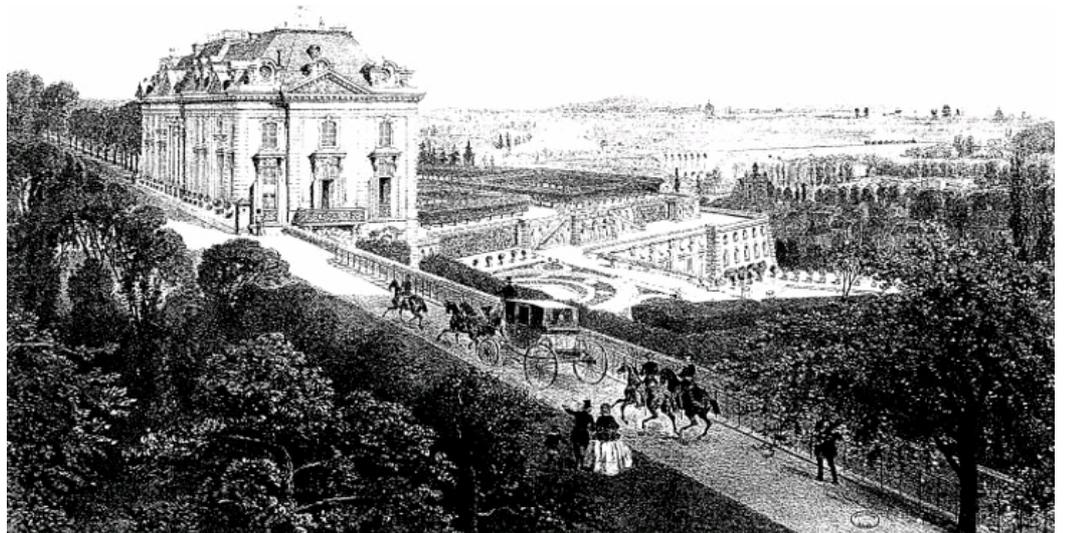
HISTORIQUE DU SITE

L'observatoire de Meudon, ou plus exactement la section d'astrophysique de l'Observatoire de Paris est installé sur un ancien domaine royal. Son histoire remonte au début du XVIème siècle. Un château renaissance a été construit pour la duchesse d'Étampes sur une grande colline boisée qui domine ce qui était autrefois le village de Meudon.

L'histoire du domaine ne fait que commencer car après des ventes et héritages, le château et ses jardins reviennent à Albert Servien qui était l'intendant des finances de Louis XIII. En 1630, il fait construire deux terrasses qui découpent le coteau en deux immenses marches. Ces terrasses, à 160m d'altitude, dominent un magnifique panorama sur l'agglomération parisienne. Après la mort de Servien en 1659, son héritier, le marquis de Sablé, ruiné, revendra le domaine à Louvois au bout de vingt ans. Sous le règne de Louis XIV, on assiste à un agrandissement du domaine ainsi qu'à une modification extérieure du château. Cet embellissement suit les règles du Grand Siècle. On peut y voir une orangerie, des jardins, des pièces d'eau et des colonnades. Louvois y restera jusqu'à sa mort en 1691. Le Roi Soleil y installe quatre ans plus tard le Grand Dauphin. En 1706, Mansart embellit les jardins et fait construire le « Château neuf » donnant au domaine son lustre et son apogée. A la mort du Grand Dauphin, le Duc de Bourgogne devient propriétaire des lieux.

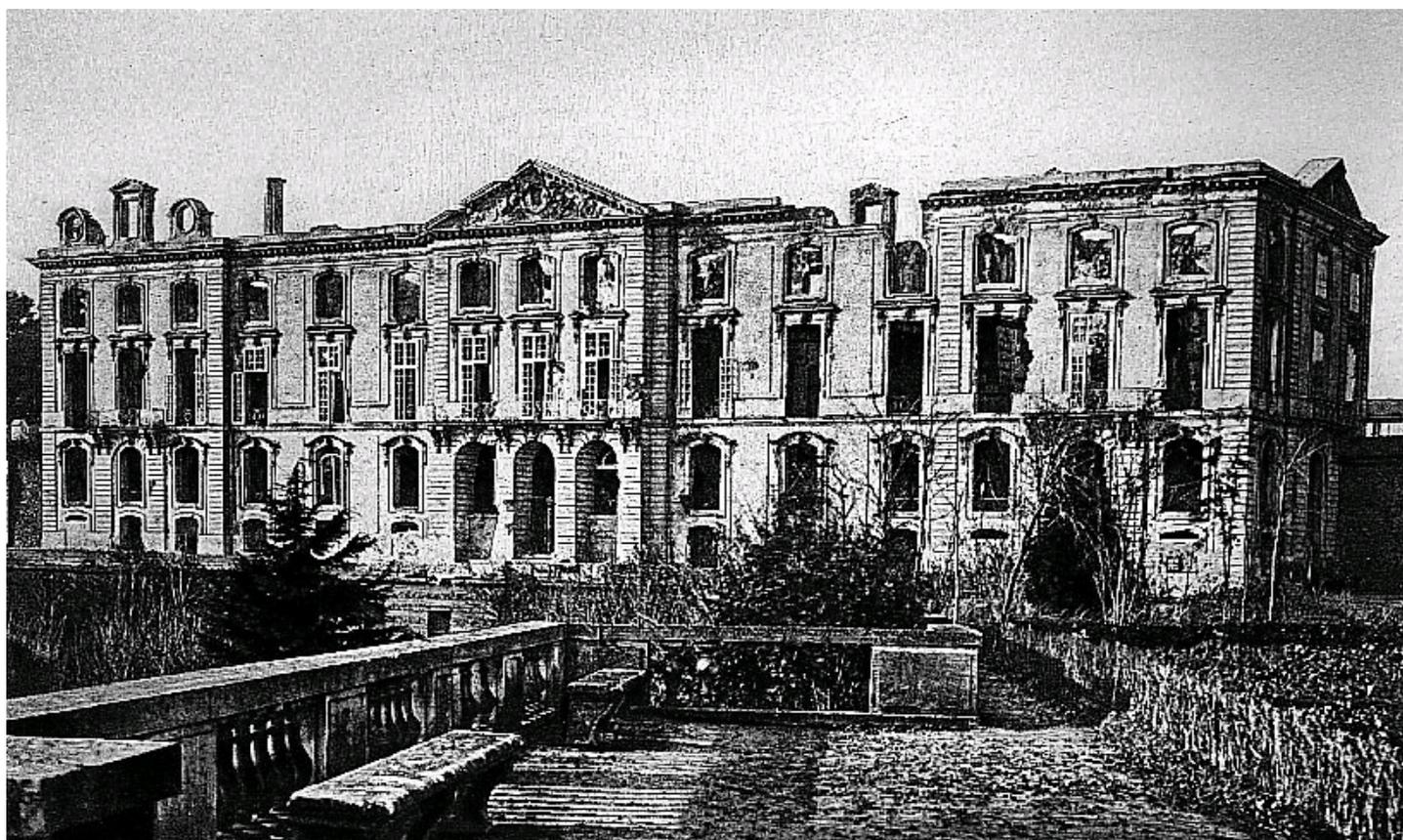


Le Château vieux propriété de Monsieur de Louvois.



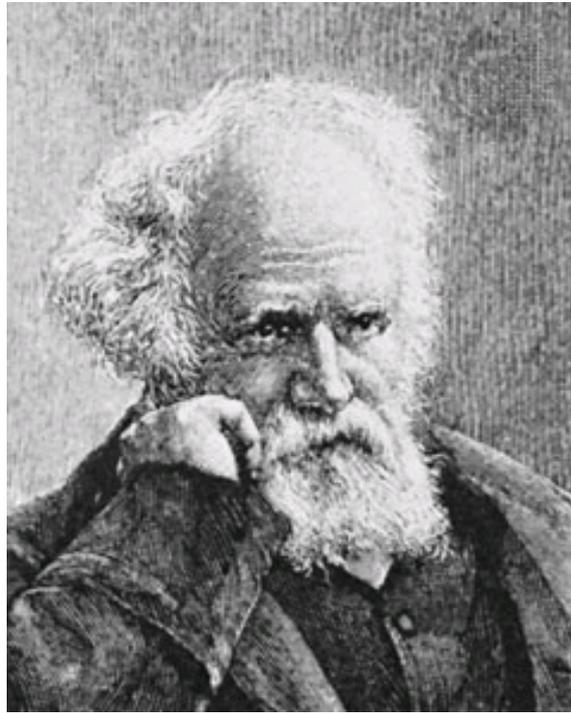
Le Château neuf vers 1860.

Mais le domaine de Meudon est délaissé et va vite périliter et se dégrader. Pendant la révolution, en 1791, le « château vieux » est transformé en dépôt de munitions ce qui lui vaudra d'être partiellement incendié quatre ans plus tard. On vend le mobilier et ainsi débute le vandalisme révolutionnaire. Le domaine est transformé en champ de tir ce qui causera un nouvel incendie. En 1803, la municipalité de Versailles décide de détruire entièrement le château vieux. Les plus belles colonnes de marbre furent récupérées et servirent à la construction de l'arc de triomphe du Carrousel. En 1807, Napoléon décide de faire un palais impérial du Château Neuf qui est alors restauré. En 1812, il devient la résidence du Roi de Rome. Pendant la Restauration Meudon ne sera pas utilisé, mais pendant la Monarchie de Juillet le duc d'Orléans s'y installe de temps en temps. Durant le Second Empire y réside Jérôme Bonaparte et ensuite son fils, le prince Napoléon. En 1870, les prussiens installèrent des batteries de canons sur la colline de Meudon d'où ils pouvaient tirer sur Paris. Le château neuf pris feu à son tour quelques mois plus tard. En 1874, la IIIème république vota une loi affectant les restes de ce château et ses dépendances à Monsieur Janssen, membre de l'Institut avec mission d'y installer un observatoire d'astronomie physique.



Les ruines du château neuf en 1874.

Pierre, Jules, César JANSSEN (1824-1907)



Nous commençons cette étude par une présentation de Jules Janssen qui est le fondateur de l'observatoire de Meudon.

Né en 1824, Janssen a été accidenté très jeune, ce qui lui a causé un léger handicap. Il claudiqua donc toute sa vie. C'est peut-être ce problème qui lui a donné une si grande persévérance dans toute son œuvre. Son intérêt pour la science est venu assez tard dans sa vie car très jeune, il se destinait plutôt à la musique comme son père. Une infortune familiale le précipita dès l'âge de seize ans dans le monde du travail. Il commença comme comptable dans une banque. Il n'eut ensuite de cesse de consacrer son temps à l'étude et à la recherche. Il étudia les mathématiques, la médecine et les sciences. Il passa son baccalauréat puis une licence et devint professeur dans un lycée. En 1860, à l'âge de trente-six ans il réussit un doctorat ès sciences physiques. Sa thèse, soutenue le 17 août 1860 avait pour titre « Mémoire sur l'absorption de la chaleur rayonnante obscure dans les milieux de l'œil ». De 1865 à 1872, il enseigna la physique dans une école d'architecture. Mais la véritable passion de Janssen s'est déclarée après qu'il ait eu connaissance des travaux de Gustav Kirchhoff et Robert Wilhelm Bunsen sur la spectroscopie. Il a très vite compris que cette technique allait lui permettre de connaître la composition chimique du Soleil et des étoiles. Il se lança d'abord dans la spectroscopie, puis il devint ensuite l'un des plus grands spécialistes de cette discipline. En 1862, il installe un petit observatoire sur le belvédère de sa maison de Montmartre.

Janssen est avant tout un scientifique de terrain, il a participé à de très nombreuses missions parallèlement à ses travaux de laboratoire.

En 1857 il partit au Pérou pour y localiser l'équateur magnétique de la Terre.

Il se rendit ensuite en 1867 sur l'île de Santorini (archipel des Cyclades au large de la Grèce) en vue de l'observation d'une éruption volcanique. La même année, il part étudier le magnétisme aux Açores.

Ses premières expériences de spectroscopie débutent en 1862. Il veut comparer le spectre de l'atmosphère du Soleil avec le spectre de l'atmosphère terrestre. Comme nous allons le voir, il a consacré beaucoup de temps et d'énergie à cette étude.

Les éclipses ont été la causes de très nombreuses missions qui lui ont valu des découvertes importantes.

Pendant l'éclipse de 1867 à Trani, en Italie, Janssen compare le spectre de l'anneau du Soleil éclipsé (car il s'agissait d'une éclipse annulaire, le diamètre apparent de la Lune était inférieur à celui du Soleil) à celui du centre et constate qu'il est identique. Il tente d'observer la couronne mais en vain.

La très longue éclipse totale visible aux Indes, le 18 août 1868 a été nettement plus prolifique en avancées scientifiques. Durant la totalité, qui dura cinq minutes et demi, Janssen analysa la lumière des protubérances solaires. Dès le lendemain, il parvint à observer les protubérances grâce à son spectroscope au travers de la principale raie de l'hydrogène. L'intuition géniale (qu'a également eu Lockyer) qu'il a mise en pratique est à l'origine des instruments solaires qui seront développés ultérieurement. Il découvre également un nouvel élément chimique (en même temps que Lockyer), le Coronium qui sera identifié sur terre en 1895 par W. Ramsey et baptisé Hélium.

Voulant observer l'éclipse de décembre 1870 en Algérie, Janssen a dû s'envoler en ballon pour franchir les lignes ennemies d'un Paris assiégé par les prussiens. Il avait refusé un sauf-conduit et alla délivrer un message à Gambetta. Cette aventure lui laissa un goût profond pour l'aéronautique.

En 1871, une éclipse totale est visible à nouveau aux Indes. Janssen se rend dans les Neelgheries et y observe la raie verte coronale. Il y détecte également des raies sombres. Cette constatation lui permet de déduire que la couronne n'est pas exclusivement composée de gaz mais aussi de particules solides ou liquides. (*Janssen parle de matières liquides*)

En 1875, éclipse sur la presqu'île de Malacca à son retour du Japon d'où il avait observé le passage de Vénus devant le Soleil.

En 1883 une grande expédition sur l'île Caroline, dans le Pacifique, pour observer une éclipse a permis à notre astronome de tester un télescope de 50cm de diamètre ouvert à F/3, donc très lumineux. Les remarquables résultats de ce dernier ont été décisifs pour entreprendre la construction du télescope de 1m de Meudon qui, sur le même modèle, ne mesurait que trois mètres de long.

C'est à la fin de sa vie, en 1905, que Janssen observe sa dernière éclipse en Espagne, peut-être plus pour le plaisir du spectacle que pour faire de la science.

Mais revenons à la spectroscopie qui est vraiment le sujet qui préoccupe le fondateur de l'observatoire d'astronomie physique de Meudon.

En 1862-1863 il observe les bandes de Brewster et les résout en raies fines. Ces bandes seraient dues à l'absorption par l'atmosphère de la Terre. Ce sont les raies A, a et B de l'oxygène. Une question se pose alors: *Y a-t-il des raies de l'oxygène dans le spectre du Soleil ou sont-elles exclusivement dues à notre atmosphère?*

Pour répondre à cette question cruciale, il faut multiplier les expériences et c'est ce que va faire Janssen pendant de nombreuses années.

Tout d'abord dans les écuries du domaine de Meudon, il monte un laboratoire de spectroscopie équipé de tubes de 60m dans lesquels il met de l'oxygène et fait varier la pression. Cela lui permet de faire apparaître la raie B.

Il observe aussi que si la hauteur du Soleil est inférieure à 4°, certaines bandes sont visibles.

Pour vérifier cela, il organise une mission dans le Sahara.

En 1867, il fait une observation du spectre de la vapeur d'eau depuis l'usine à gaz de la Villette. Il reprendra cette expérience vingt ans plus tard à Meudon.

En 1867, il observe depuis l'Etna et en 1869, c'est dans l'Himalaya qu'il pense avoir détecté la vapeur d'eau dans le spectre de la planète Mars.

Il compare pour cela les spectres de Mars et ceux de la Lune qui ont la même hauteur dans le ciel.

En 1889 la construction de la tour Eiffel donne une nouvelle idée géniale à Janssen. Il décide d'observer le spectre du phare qui se trouve en haut de la tour et que l'on a braqué vers Meudon. Il y observe, à 7,7km de distance, les raies d'absorption de l'oxygène de l'air. Le faisceau a traversé une masse d'air équivalente à celle de la lumière provenant du Soleil.

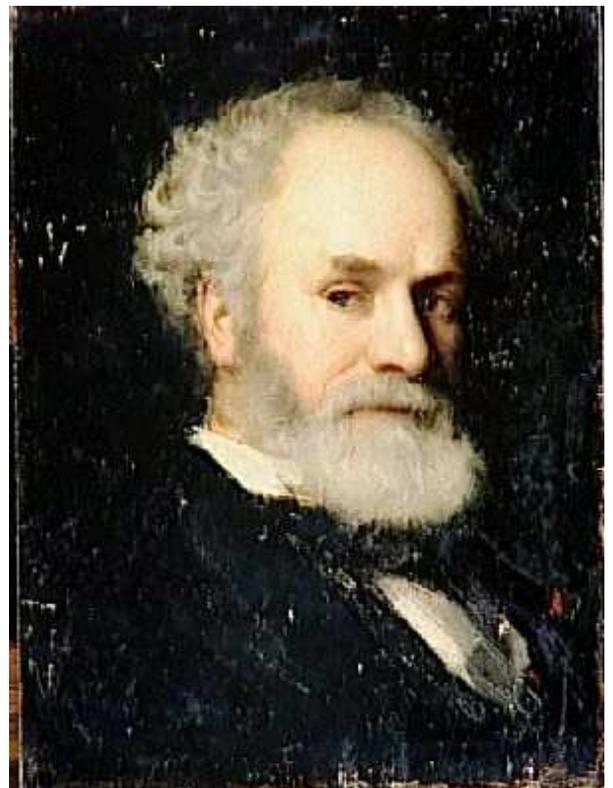
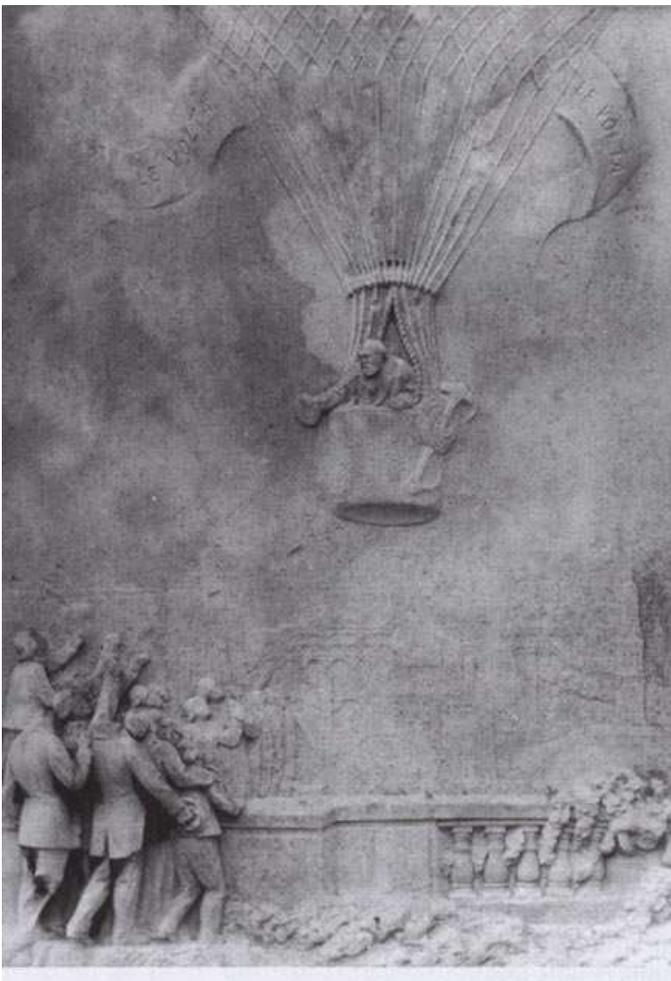
L'oxygène est bien exclusivement terrestre. Une expérience analogue avait été tentée depuis Genève en 1864 en observant le spectre d'un feu à la distance de 21km.

Des expériences ont également été faites en haute montagne, là où l'atmosphère est moins épaisse. Janssen commence ses observations au Pic du Midi, puis il monte aux Grands Mulets où il constate qu'à 3000m d'altitude, les raies du groupe B sont beaucoup moins intenses qu'à Meudon. Ce sera le début de la grande aventure de l'observatoire du Mont Blanc que nous développerons plus tard.

Citons aussi les observations du passage de Vénus devant le Soleil que Janssen observa au Japon en 1874 puis à Oran en 1882, où il a pu enregistrer le phénomène grâce à son revolver photographique. La mission du Japon fut très importante car elle dota Janssen d'un matériel assez important qu'il a ensuite installé sur le site de Meudon.

Janssen a été nommé chevalier de la Légion d'honneur le 28 octobre 1868, puis élu membre de l'académie des sciences le 10 février 1873.

Nous aurons l'occasion de revenir très largement sur le travail considérable du père de l'astronomie physique en France car la création de l'observatoire de Meudon repose sur le désir de Janssen de développer deux techniques fondamentales et les appliquer à l'astronomie: la photographie et la spectroscopie.



Janssen s'échappant de Paris en 1870.

La création de l'observatoire de Meudon



Le château de Meudon surplombé de la grande coupole.
Cliché J.M. Malherbe

L'astronomie française de la fin du dix-neuvième siècle était marquée par une longue tradition de mécanique céleste. Urbain Leverrier (1811-1877) découvrit la planète Neptune par le calcul à l'Observatoire de Paris en 1846 avant d'en être nommé directeur en 1854. Mais pendant ce temps, la photographie et la spectroscopie permettaient une nouvelle approche de l'astronomie qui n'échappait pas à Jules Janssen.

Dès novembre 1869, Janssen envoie à l'Empereur un projet d'observatoire d'astronomie physique situé en région parisienne. C'est à cette même époque qu'il avait décrit le principe du spectrohélioscope pour voir les protubérances solaires. En 1873, il invente le « revolver photographique » que l'on peut à juste titre considérer comme précurseur du cinématographe. Le Président de la république française, Mac Mahon signe le 6 septembre 1875 un décret qui crée à Paris un observatoire d'astronomie physique dont le directeur relève exclusivement du ministère de l'Instruction publique, des Cultes et des Beaux arts. Le ministre Henri Wallon attribue une somme de 50 000 francs pour cet établissement au budget de 1876. Il n'est pas surprenant que la direction de cet observatoire ait été confiée à Jules Janssen, alors membre de l'Institut et du Bureau des longitudes.

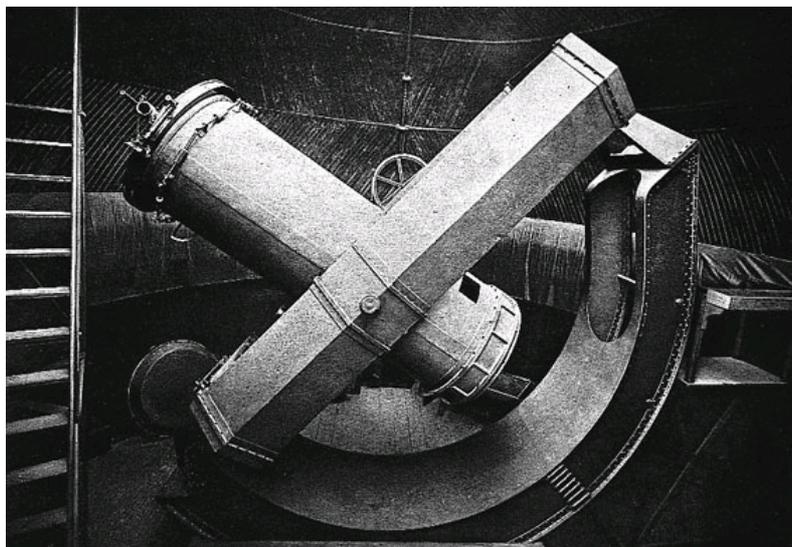
« L'observatoire fut installé provisoirement au boulevard d'Ornano, au lieu même où avaient eu lieu les préparatifs de l'expédition du Japon » nous rappelle Janssen dans les annales de l'observatoire. Il hésitait entre la Malmaison et Meudon. Meudon était un choix dicté par l'actualité du site *« Ce beau domaine, dont le château avait, il est vrai été incendié après la guerre, était porté au compte de la liquidation pour une somme dérisoire et s'il était vendu, il était morcelé et dépecé. Il y avait donc une raison d'intérêt national à conserver à l'État un aussi précieux domaine... Cette demande fut agréée, mais comme le domaine était alors occupée par l'armée, nous dûmes nous contenter d'une installation provisoire dans le Parc où nous dressâmes les instruments et les cabanes revenues du Japon. »*

C'est ainsi que Janssen put commencer ses observations avec sa lunette solaire et d'autres petits instruments.

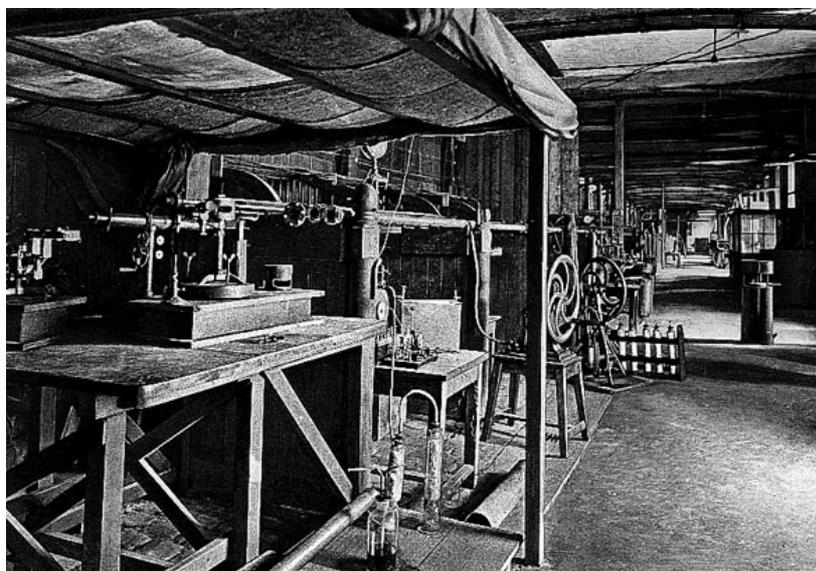
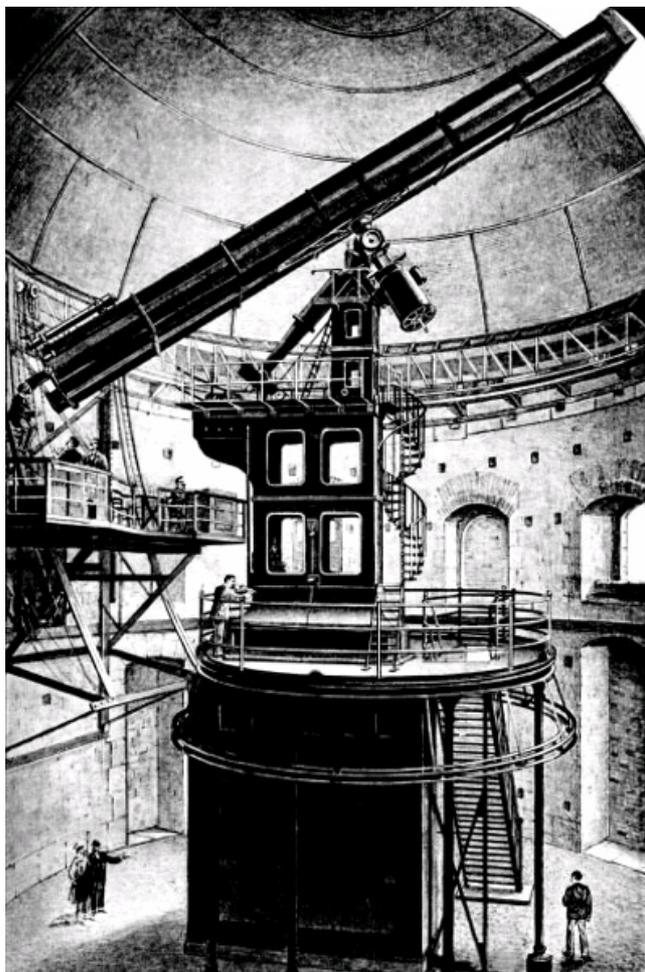
Le 15 avril 1879, le Président Jules Grévy promulgue la loi qui affecte le château et le domaine de Meudon à l'installation de l'observatoire d'astronomie physique de Paris.

L'architecte Constant Moyaux (1835-1911) fait , en 1878, une étude pour transformer les restes calcinés du château neuf. Les travaux vont pouvoir commencer et transformer ces ruines en un grand établissement scientifique dont Janssen restera le directeur jusqu'à sa mort le 23 décembre 1907.

Cet observatoire, Janssen l'équipera des instruments les plus modernes et les plus performants de son époque. La lunette, dont l'objectif visuel mesure 83cm sera en outre équipée d'un objectif photographique de 62cm. Elle restera le plus grand réfracteur de toute l'Europe. Le télescope de 1m a été le premier grand télescope photographique. Il était dans sa conception un instrument qui préfigurait les grands télescopes modernes. Les laboratoires de spectroscopies et les instruments solaires donnèrent à l'observatoire une réputation qui rapidement dépassa les frontières.



Le télescope de 1m est ouvert à 3. Il est très lumineux et destiné presque exclusivement à la photographie. Un ingénieux dispositif permet de mettre la plaque directement au foyer.



Le laboratoire de spectroscopie est installé dans les anciennes écuries du château.

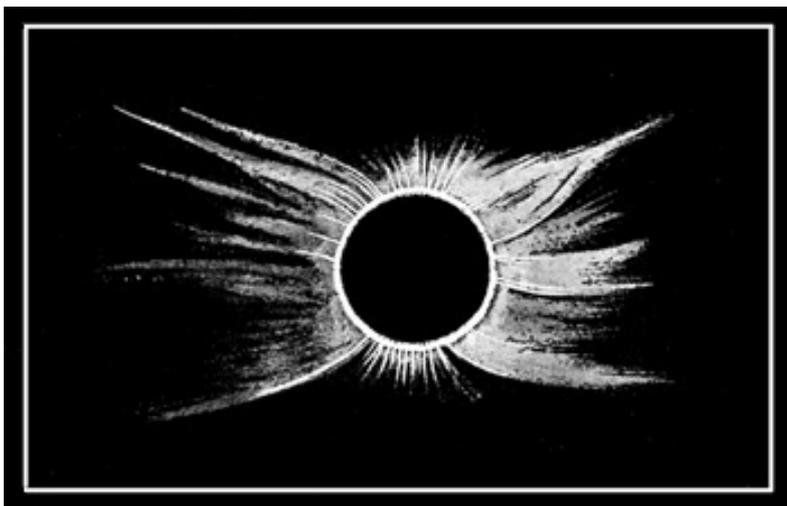
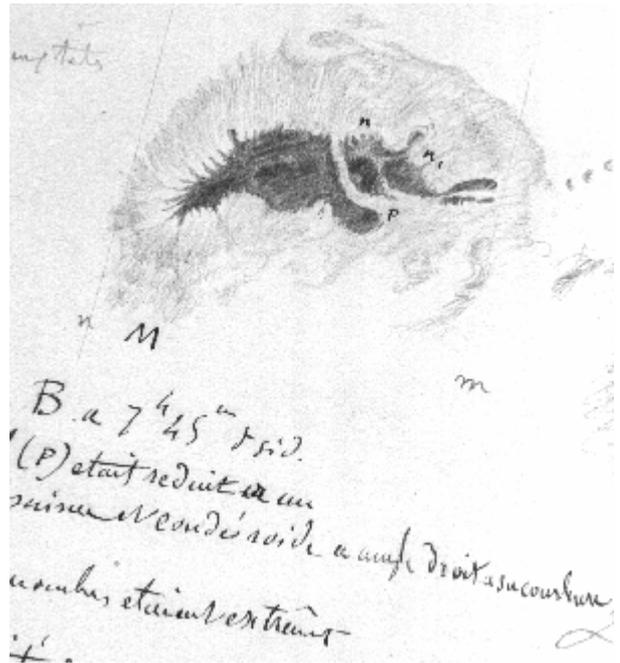
La grande lunette d'une focale de 16m a permis des observations de planètes, d'étoiles doubles et des travaux de spectroscopie.

La lunette photographique solaire

Le premier instrument solaire décrit dans les annales de l'observatoire est la lunette solaire que Janssen utilisait déjà pour la photographie de la photosphère. Cet instrument particulièrement réussi permit à son concepteur de réaliser des clichés d'une finesse que n'avaient de cesse d'admirer les visiteurs de l'observatoire.

Jusqu'à 1845, date du premier daguerréotype du Soleil réalisé par Fizeau et Foucault, on observait principalement l'astre du jour à l'oculaire d'une lunette ou par projection de son image sur un écran. Cette dernière méthode est sans danger mais ne permet qu'une étude du Soleil entier avec la position des taches que l'on peut éventuellement dessiner. Pour voir les détails dans la pénombre des taches et résoudre la granulation de la photosphère, il fallait alors mettre au foyer de la lunette un hélioscope pour réduire le flux lumineux. On utilisait plusieurs types d'hélioscope. Celui de Herschel est le plus simple, la lumière est réfléchiée sur la face d'une lame prismatique qui réduit de 96% son intensité. On munit ensuite l'oculaire d'une bonnette de verre teinté pour réduire encore l'intensité lumineuse. Le dispositif de Colzi est plus sophistiqué car la lumière est réfléchiée deux fois. La seconde prisme est munie sur sa face arrière d'un petit réservoir d'huile. Le dioptré verre-huile est nettement moins réfléchissant que celui formé par le changement d'indice entre le verre et l'air, ce qui entraîne un affaiblissement du flux considérable. Ces méthodes permettaient une vision détaillée mais fugace des fins détails solaires. De plus, il fallait dessiner ce que l'on voyait et le dessin n'a pas toujours une valeur scientifique suffisante et cela, Janssen l'avait parfaitement compris car il aimait à dire que la plaque photographique est la « rétine de l'astronome ».

Dessin d'une tache solaire fait à l'observatoire de Lyon le 7 septembre 1859. On voit la tache noire entourée d'une partie grise, c'est la pénombre de la tache. La surface du Soleil semble composée de « grains de riz », c'est la granulation qui traduit le caractère convectif du transport de l'énergie dans les parties peu profondes.



Eclipse totale du 9 août 1896 dessinée par L'abbé Moreux. On remarque la chromosphère sous la forme d'un anneau blanc autour du disque lunaire et la couronne solaire.

Nous devons la première photographie du Soleil à Fizeau et Foucault. Ce Daguerrotype de 1845 montre les taches ainsi que l'assombrissement du bord solaire. Il faudra attendre une dizaine d'années avant qu'une image un peu plus précise, due à M. Reade, montre l'aspect moutonné de la surface. Faye réussit à figer les marbrures des facules sur le bord solaire mais il faudra attendre 1858 pour que démarre à Kew, en Angleterre, sous la directive de John Herschel une surveillance systématique des taches solaires par la photographie. Les structures fines de la photosphère restent invisibles sur ces petites images. Malgré quelques tentatives, on est encore loin de figer sur les plaques la granulation qui intrigue tant les astronomes. Il faut dire qu'elle est déjà bien difficile à observer visuellement.

C'est en préparant les observations du passage de Vénus devant le Soleil de 1874, que Janssen commence à s'intéresser de près à la photographie solaire. Pour sa mission au Japon, il fait construire par Prazmowski une lunette photographique donnant des images de 10 cm. Cette lunette s'avère excellente.

A son retour du Japon, encouragé par les bons résultats de la petite lunette, Janssen décide d'approfondir l'étude de la photographie solaire. Cette étude porte sur la sensibilité spectrale des plaques, l'achromatisme des optiques et les temps de poses.

Prazmowski construit des optiques et Janssen les étudie. Il parvient rapidement à la conclusion qu'il faut achromatiser les objectifs dans le violet, au niveau de la raie G de Fraunhofer (à 430.5 nm). *Il est intéressant de noter qu'aujourd'hui encore les meilleures images de la granulation sont obtenues dans cette même longueur d'onde. On avait oublié cette propriété de la bande G, mais elle a été redécouverte vers 1960, soit environ un siècle après les travaux de Janssen. Depuis, on a essayé de nombreux domaines spectraux photosphériques, mais c'est à 430.5nm que les intergranules et les points brillants sont les mieux visibles.*

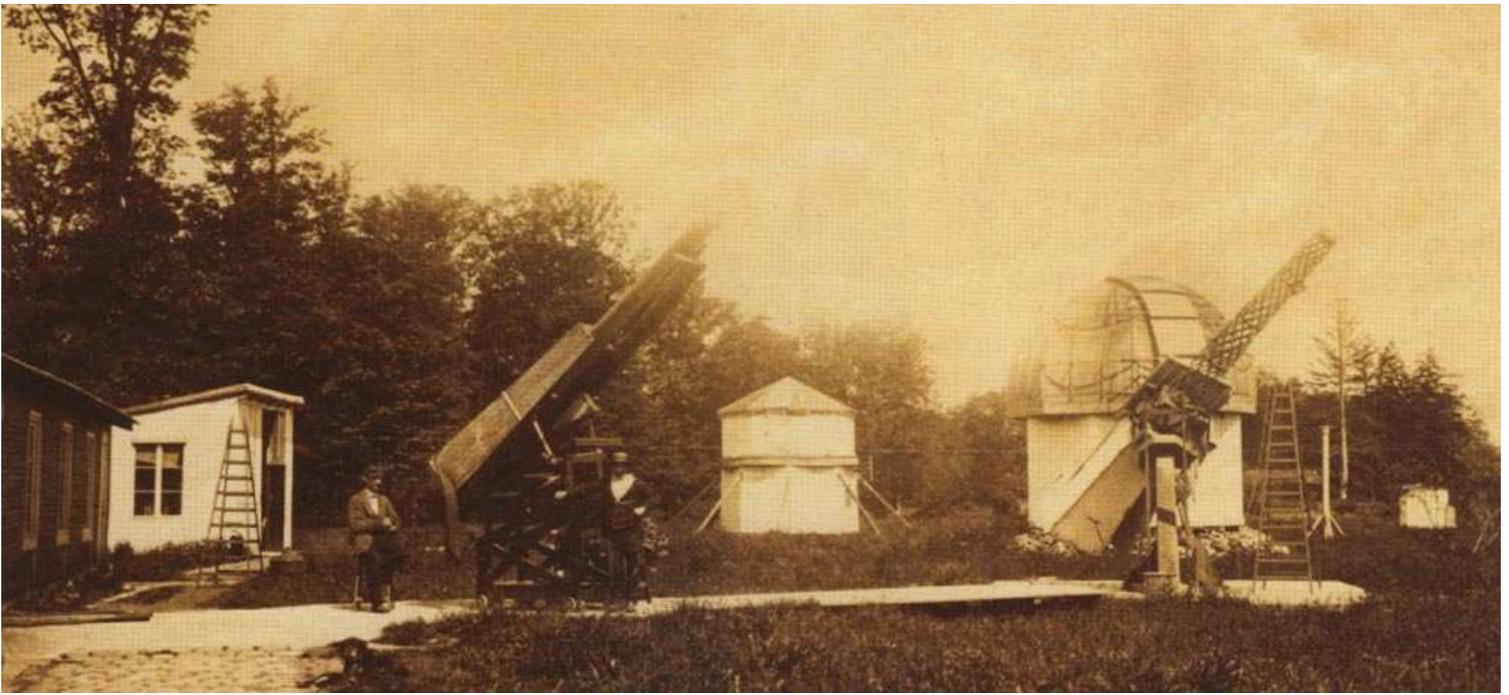
Le photographe de l'observatoire de Meudon, M. Arents compose alors un collodion iodo-bromuré donnant un maximum de sensibilité dans le violet. Les courbures des lentilles de l'objectif et la sensibilité du collodion permettent ainsi de réaliser une lunette optimisée dans une longueur d'onde. Prazmowski réalise plusieurs objectifs dont l'un s'avère d'une rare perfection et donne des images d'une netteté exceptionnelle. La lunette solaire est née. La perfection optique ne suffisant pas, il faut ensuite améliorer la formule du collodion et aussi du coton-poudre pour rendre la surface sensible de la plaque la plus fine et la plus sensible possible. Dans les annales de l'observatoire de Meudon, Janssen nous donne la formule précise du collodion utilisé :

« Alcool à 40°, 400gr, Éther sulfurique, 60°, 600gr, Coton-poudre, 15gr, Iodure d'ammonium, 4gr, Iodure de cadmium, 5gr, Iodure de potassium, 2gr, Bromure d'ammonium, 1gr, Bromure de cadmium, 1gr. »

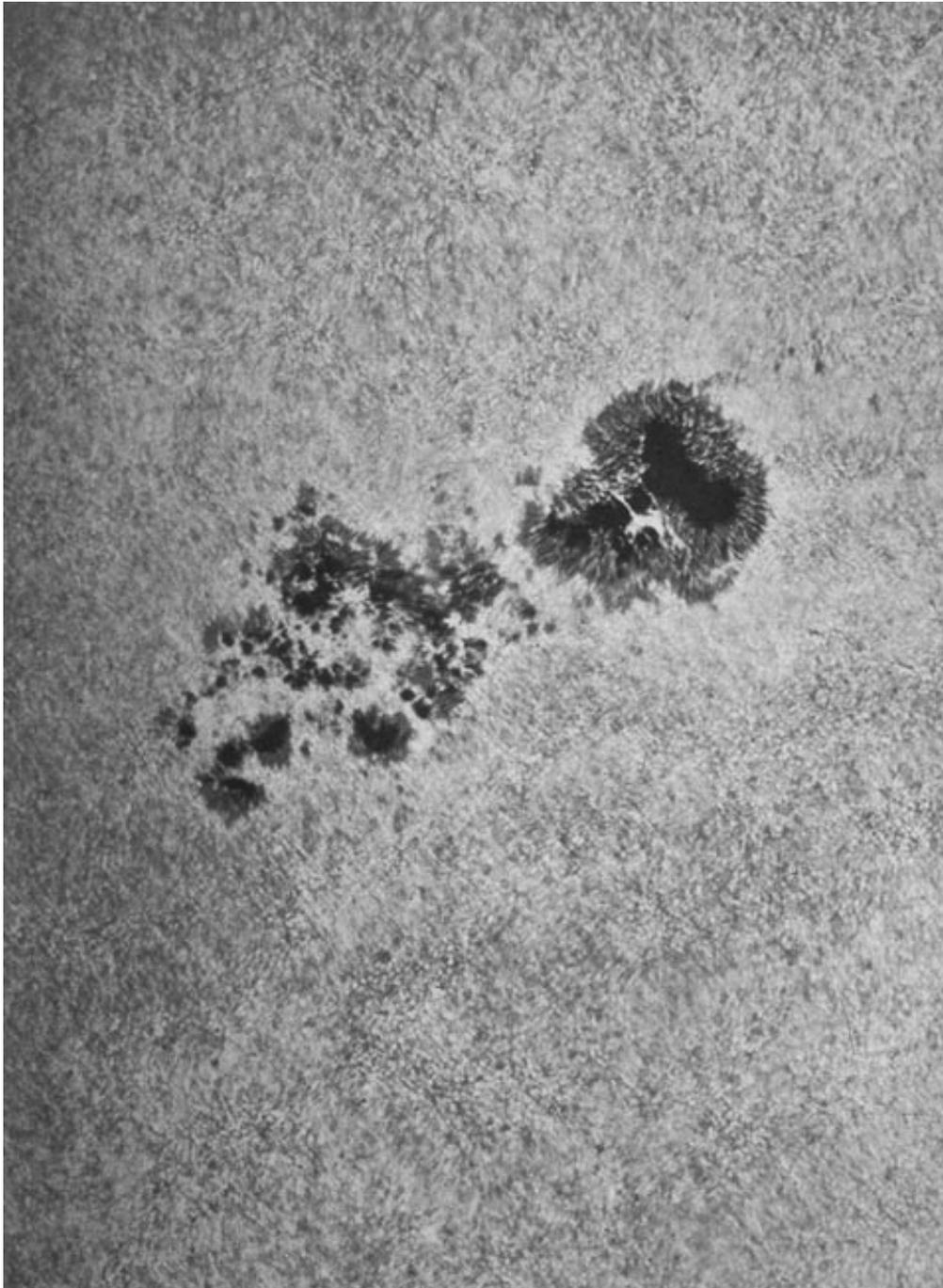
A cette formule s'ajoute une description très complète de la procédure permettant d'obtenir des plaques sensibles d'une grande homogénéité.

Le dernier problème à résoudre consiste à évaluer l'agrandissement de l'image ainsi que le temps d'exposition. Janssen fait des essais avec des agrandissements de plus en plus importants en donnant au disque solaire un diamètre de 20, puis 30, 50 et même 70 cm. En agrandissant la taille du disque solaire il diminue le flux reçu sur la plaque proportionnellement mais la résolution est limitée par les mouvements de turbulence de l'atmosphère. Il comprend alors qu'il lui faut réduire le temps d'exposition en développant un obturateur mieux adapté à ce travail. Il réalise alors un dispositif que l'on nomme trappe photographique. Il s'agit d'une fente montée dans un chemin de galets. La fente est tirée par un fil qui tend des ressorts. Il faut pincer le fil puis le sectionner. Les ressorts font alors défiler très rapidement la fente devant l'image du Soleil. Ce mécanisme très ingénieux permet à Janssen de poser 1/3000^{ème} de seconde. Les premières trappes sont construites par Prazmowski puis Janssen demande à Gautier d'en construire de plus élaborées qui n'introduisent aucune vibration.

Ces trappes présentent l'énorme avantage d'assurer à l'obturateur un mouvement régulier, indispensable pour garantir une homogénéité dans l'insolation de la plaque. Le disque solaire était parfaitement exposé sur toute sa surface.



Installation provisoire de l'observatoire de Meudon vers 1878. A gauche, la lunette photographique solaire. *Bibliothèque Observatoire de Paris*



Tache solaire prise avec la lunette photographique de Janssen. On remarque le très bon contraste de l'image. De nombreux détails sont visibles dans la pénombre de la tache. On observe aussi que la granulation est résolue mais toutes les zones de l'image n'ont pas la même netteté. C'est ce phénomène lié à la turbulence atmosphérique qui suggéra à Janssen la présence d'un réseau photosphérique.

La conception puis la réalisation de la lunette solaire constituent un travail très important mais fondamental dans l'évolution future de l'astrophotographie.

L'illustre astronome résume ainsi le développement de sa lunette: " En résumé, les principes qui ont présidés à l'obtention des nouvelles photographies solaires sont les suivants :

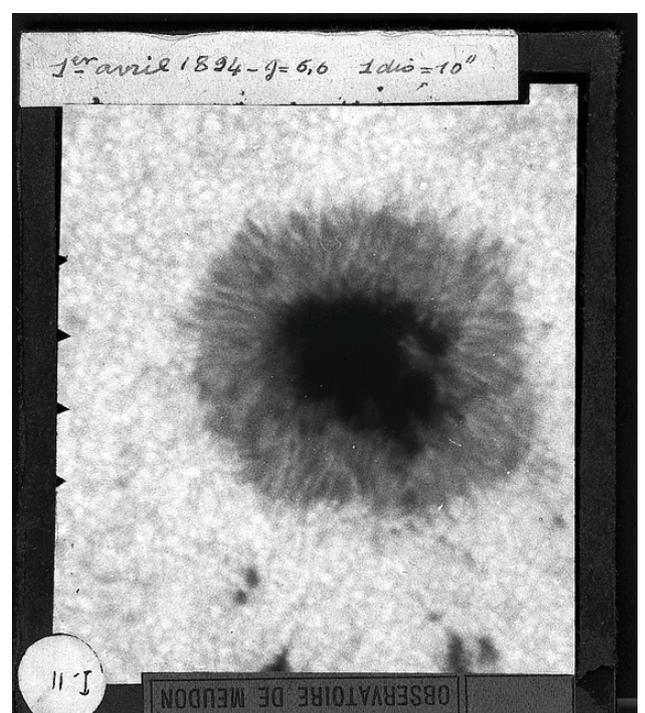
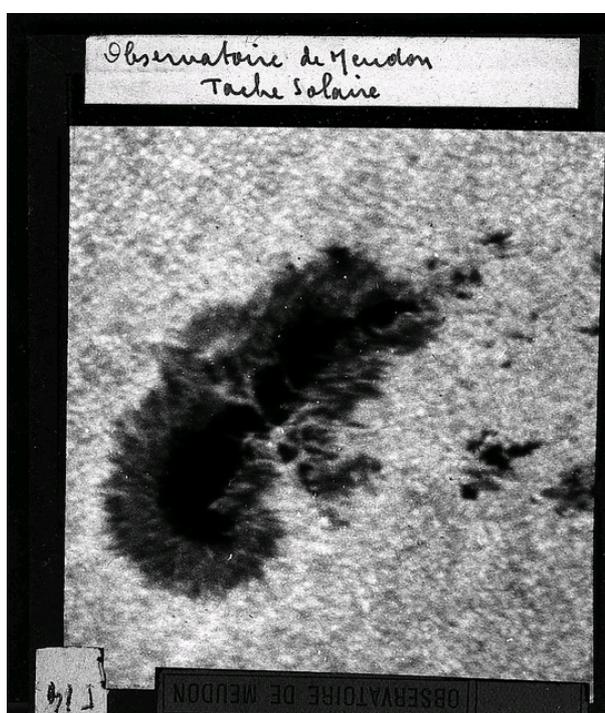
- 1° Recherche de matières optiques, flint principalement, donnant un spectre présentant un maximum d'action lumineuse très limité et très accusé ;
- 2° Construction de l'objectif de manière à faire porter l'achromatisme sur ce point du spectre ;
- 3° Composition d'un collodion présentant une sensibilité maximum et limitée à cette même région spectrale ;
- 4° Finesse du tissu du collodion obtenue par la préparation du coton-poudre à haute température ;
- 5° Agrandissement considérable des images, ce qui permet au détails délicats de la surface solaire de se manifester et diminue l'effet de l'irradiation ;
- 6° Dosage rigoureux de l'action lumineuse de manière à obtenir une image suffisamment posée et exempte d'irradiation ;
- 7° Dispositions prises pour assurer l'égalité rigoureuse de pose dans toutes les parties de l'image."

De cette lunette, il ne nous reste que l'objectif, l'obturateur à trappe et de belles photographies. L'objectif a un diamètre de 0,135m et une distance focale de 2,2m. Le tube de la lunette, qui mesure au moins trois mètres est supporté par un solide pied Cauchoix en bois qui donne une très grande stabilité et une excellente précision dans le pointage mais n'assure pas l'orientation correcte du disque solaire. Pour cela, il a été prévu une monture équatoriale, la monture d'Eichens.

2) La monture d'Eichens

William Eichens est né à Berlin en 1818 mais c'est en France qu'il fonde une société de construction d'instruments d'astronomie en 1866 après avoir été chef d'atelier chez Marc Secrétan. L'un de ses collaborateurs est Paul Gautier, qui reprendra l'atelier en 1884 à la mort de W. Eichens. On trouve un peu partout des instruments sortis de l'atelier d'Eichens, la lunette de 27 cm de Marseille, une autre lunette de 20 cm à Madagascar, le si célèbre télescope inutilisable de 1,20 m de Paris (aujourd'hui à l'OHP avec un miroir de Couderc), la première lunette de 20 cm du Pic du Midi ainsi qu'un équatorial de l'observatoire de Lyon. A sa mort en 1884, c'est Paul Gautier qui lui succède.

La monture d'Eichens de l'observatoire de Meudon date de 1878. Dans le tome I des annales de l'observatoire de Meudon, Janssen mentionne la petite coupole de 7,50m destinée à abriter la petite lunette équatoriale de photographie solaire. Cette coupole, construite par la société des anciens établissements Cail, est jumelle à celle abritant le télescope de 1 mètre. Il y a eu deux montures d'Eichens dans l'observatoire dont l'une supportait une lunette de 21 cm qui servait à Trouvelot pour observer les protubérances solaires avec un spectroscopie vers 1893.

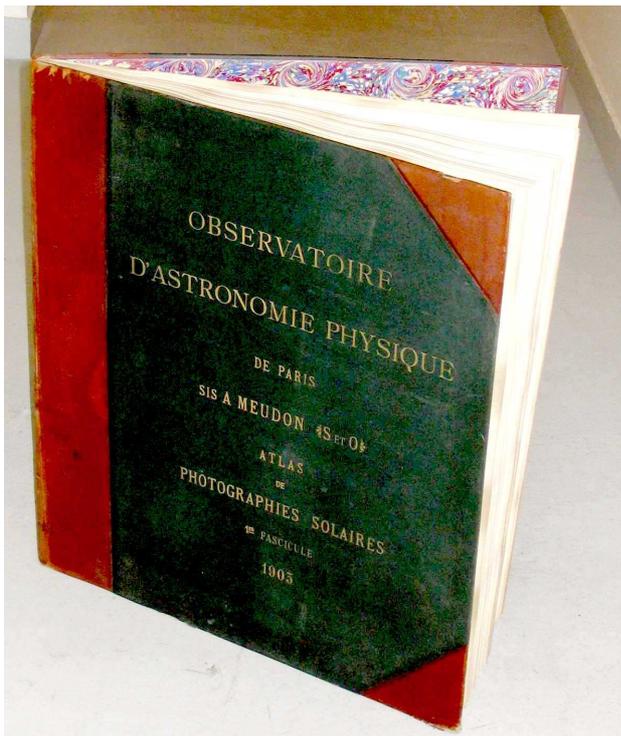




La lunette photographique de Janssen.



Objectif de 135 mm de la lunette. Collection de l'observatoire de Meudon.



Grand atlas de photographies de Janssen, 1903.



Boite à clichés solaire de Janssen.



Obturbateur de la lunette construit par Gautier. 18

Étude de la surface solaire par la photographie

Dans le tome premier des annales de l'observatoire d'astronomie physique de Paris, Janssen résume ses premiers travaux photographiques sur le Soleil. Ses images sont d'une telle finesse qu'elles resteront inégalées pendant une cinquantaine d'années. Il faudra attendre les travaux de Lyot à l'observatoire du Pic du Midi, avec l'objectif de 23cm, pour améliorer la résolution des images de la photosphère.

Les images avaient des diamètres de 30cm. Quelques images plus grandes de diamètres 50 et 70cm ont parfois été prises pour avoir plus de détails. Ainsi, jours après jours, Janssen a pu suivre l'activité solaire pendant une vingtaine d'années et constituer un véritable atlas photographique du Soleil. Les images montraient que les granules n'étaient pas des structures dont les formes sont constantes. On pensait autrefois, par l'observation visuelle que les granules avaient la forme de grains de riz. Les images de Meudon laissent présager que cette forme s'apparente davantage à une sphère plus ou moins déformée selon la taille du granule.

Janssen commence à entrevoir la nature de la granulation: *« Il résulte encore de ces considérations une conséquence très importante, c'est la preuve, découlant du fait même de la grande variété des formes des éléments granulaires, que ces éléments sont constitués par une matière très mobile qui cède avec facilité aux actions extérieures. L'état liquide ou gazeux jouit de ces propriétés; mais en ayant égard à d'autres considérations que nous développerons plus tard, on est conduit à admettre pour les granulations un état très analogue à celui de nos nuages atmosphériques, c'est-à-dire à les considérer comme des corps constitués par une poussière de matière solide ou liquide nageant dans un milieu gazeux. »*

On était encore loin de la vision moderne d'un milieu convectif.

Nous noterons également l'estimation de la taille des granules: *« Le diamètre des grains dans les points où la granulation est bien formée est généralement compris entre une et deux secondes d'arc. Un examen attentif montre qu'il existe un grand nombre d'éléments granulaires qui ont un diamètre beaucoup moindre et descendant jusqu'à 1/3 et même 1/4 de seconde. Quant aux dimensions supérieures à deux secondes, elles se rencontrent également avec fréquence, mais elles résultent de l'agglomération d'éléments plus petits, ainsi qu'on peut le constater sur les photographies de très bonne définition. »*

Cette analyse est très précise et pertinente, mais Janssen ne peut conclure sur la photométrie de la granulation. L'étude des photographies montrait des différences d'éclats d'un granule à l'autre mais sans pouvoir mesurer ces différences avec précision.

Nous arrivons maintenant à la découverte du « réseau photosphérique » qui est, nous le savons aujourd'hui, une erreur d'interprétation de ses clichés.

La découverte a été annoncée à l'Académie le 29 octobre 1877.

« Un examen attentif des photographies montre que la surface de la photosphère n'a pas une constitution uniforme dans toutes ses parties, mais qu'elle se divise en une série de figures plus ou moins distantes les unes des autres, et présentant une constitution particulière.

Ces figures ont des contours plus ou moins arrondis, souvent rectilignes, et rappelant le plus ordinairement des polygones.

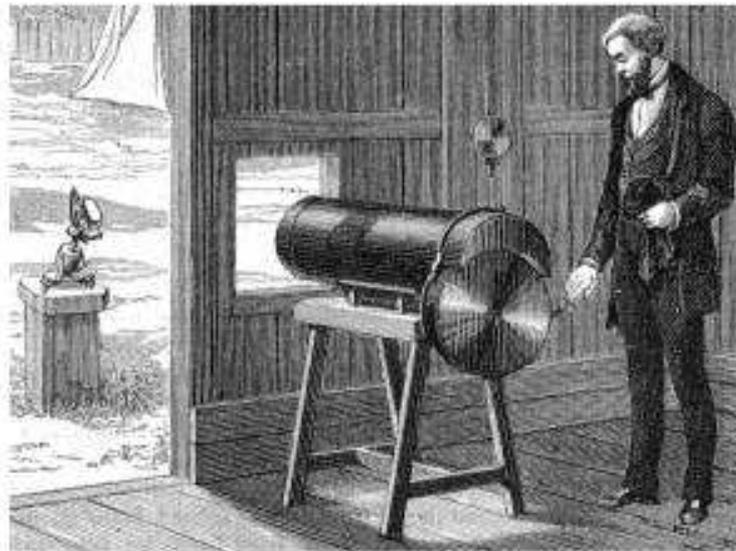
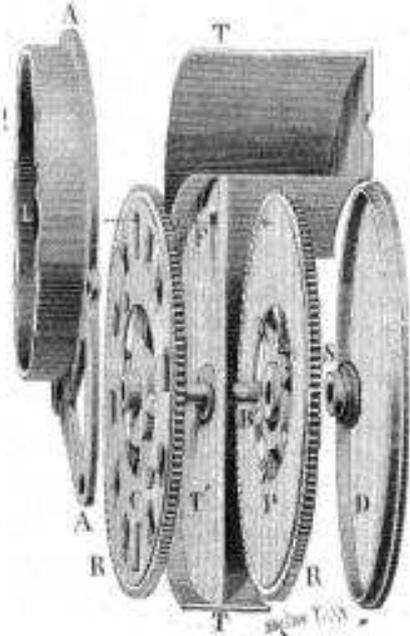
Les dimensions de ces figures sont très variables. Elles atteignent quelquefois une minute et plus de diamètre.

... Tout indique que dans ces espaces la matière photosphérique est soumise à des mouvements violents qui ont confondus les éléments granulaires.... »

Cette observation conduit Janssen à élaborer une théorie sur la circulation de la matière dans le milieu photosphérique. En réalité, le réseau photosphérique est un artéfact dû à la turbulence de notre atmosphère. On sait aujourd'hui que la turbulence produit plusieurs effets sur les images, des décalages et une défocalisation partielle de l'image. Les photos de Janssen montrent des zones nettes et d'autres floues qui sont produites par les petites cellules de convection de l'air entre la lunette et le ciel.

Janssen s'attache à faire une description qualitative des structures qu'il observe sur la photosphère, les facules et les taches. Cependant, il manque encore beaucoup d'éléments sur la physique du Soleil pour pouvoir élaborer une véritable étude physique de notre étoile, mais l'aventure ne fait que commencer. On ne peut pas évoquer l'œuvre de Janssen sans parler du révoluer photographique qu'il a mis au point en 1873.

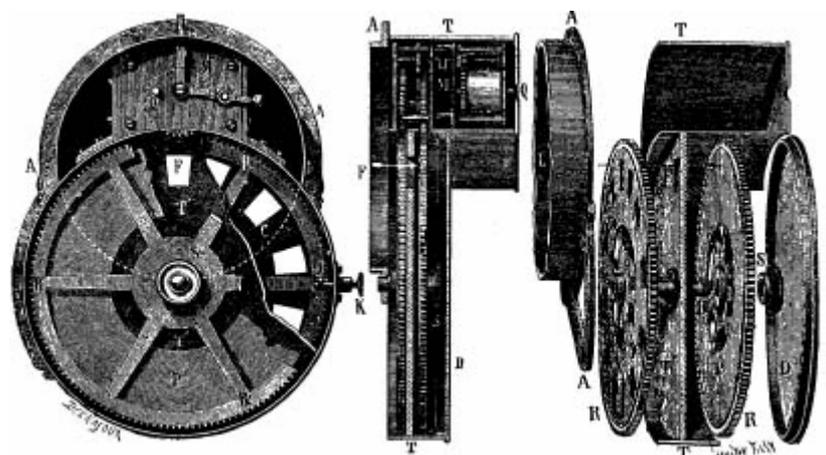
Ce révoluer a été construit par Redier pour observer au Japon le 8 décembre 1874 le passage de Vénus devant le Soleil. L'appareil se plaçait au foyer d'une lunette astronomique et pouvait enregistrer 47 images sur une plaque daguerrienne circulaire tournant en 72 seconde. Cette plaque mesure 19,5cm de diamètre. Elle est conservée au Conservatoire des Arts et Métiers. Si Janssen n'est pas considéré comme l'inventeur du cinématographe, il fut le premier à prendre des photographies successives d'un même mouvement et donc d'en faire l'analyse. C'est grâce à ses travaux et à ceux d'autres chercheurs comme Marey et Muybridge, que les frères Lumières, à l'aide de leur appareil, purent réaliser la synthèse du mouvement et faire une projection visible de toute une salle. Il existe encore deux exemplaires du révoluer de Janssen, l'un est au Conservatoire des Arts et Métiers et l'autre dans la collection de l'Observatoire de Paris.



Le révoluer de Janssen monté sur une lunette alimentée par un héliostat de Silberman.



Collection de l'Observatoire de Paris.



Les pièces du revolver.

L'observatoire du Mont Blanc

L'aventure du Mont Blanc est parfaitement complémentaire des travaux de Janssen à l'observatoire de Meudon. Nous allons retracer cette longue épopée en quelques dates clés. (D'après le texte de Jean-Marie Malherbe)

1888: Ascension de Janssen aux Grands Mulets à 3050m grâce à la « chaise échelle » qu'il avait inventée. Il y effectue des observations spectroscopiques complémentaires de ses travaux au Pic du Midi.

1890: Première ascension au sommet du Mont Blanc après avoir passé 3 nuit à l'Observatoire Vallot.

1891: Construction de l'observatoire météorologique du Club Alpin Français. Sondage infructueux de la calotte sommitale par Imfeld et abandon du projet Eiffel de coupole métallique sur une fondation rocheuse à moins de 12m sous la glace. Édification d'un édicule de bois au sommet du Mont Blanc pour tester la solidité de la neige. Janssen pense à poser son observatoire directement sur la glace.

1892: Test à Meudon de la résistance de la neige à l'enfoncement. Conception par l'architecte Vaudremer puis réalisation de l'observatoire Janssen. Le bâtiment est monté et démonté à Meudon puis expédié à Chamonix par la société PLM. Les pièces détachées sont transportées sur les pentes du Mt Blanc aux Grands Mulets (3050m) et aux Rochers Rouges (4500m) à dos d'hommes et à l'aide de traîneaux. Un chalet est construit à 4500m pour y loger les ouvriers pendant les travaux.

1893: Les pièces stockées sont retrouvées sous 8 mètres de neige. Tous les éléments sont montés au sommet pour y construire l'observatoire. Janssen monte pour la seconde fois au Mt Blanc le 11 septembre pour inaugurer l'Observatoire et y faire de la spectroscopie.

1895: Installation d'un météorographe à longue marche. Le 28 septembre, Janssen effectue sa dernière ascension en chaise, échelle et traîneau.

1896: Mise en route de la grande lunette à sidérostait polaire de 30cm et installation d'un second météorographe.

1897: Janssen préside une expédition au Mt Blanc depuis Chamonix.

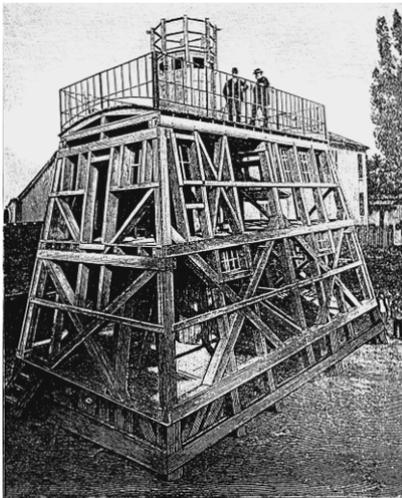
1899: Essais de télégraphie à fils dénudés posés sur le glacier entre les Grands Mulets et le Mt Blanc.

1904: Tentative de photographie de la couronne solaire hors éclipse et installation d'un spectrographe au foyer de la lunette.

1906: Construction d'un abri pour les touristes et travaux de nivellement.

1907: Mort de Janssen.

1909: Dislocation de la charpente sous la pression glaciaire et abandon.



**L'Observatoire
monté à Meudon.**

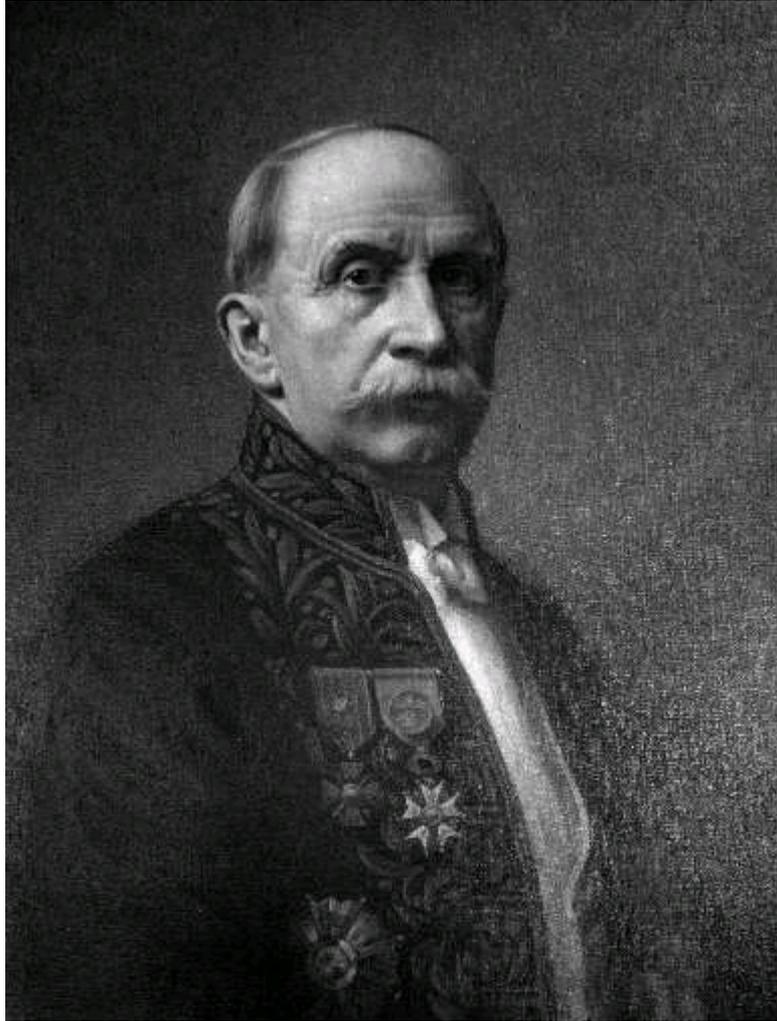
**Janssen
sur sa
chaise
échelle.**



**L'Observatoire
sur le Mont
Blanc.**



Henri-Alexandre DESLANDRES (1853-1948)



Deslandres, Henri Alexandre (24 juillet 1854 -15 janvier 1948) - Né à Paris, polytechnicien (1872), était capitaine du Génie et breveté d'État-Major depuis 1879 lorsqu'il démissionna en 1883 pour s'adonner à des recherches scientifiques. Docteur (1888), lauréat de l'Institut (1892, 1896), rédacteur au Bulletin astronomique (1897), il est nommé en 1897 astronome titulaire à l'Observatoire de Meudon ainsi que celui de Paris. Il dirigera ensuite ces établissements entre 1908 et 1926, puis trois ans encore après leur fusion en un seul organisme.

Henri Deslandres était un spécialiste de la physique solaire. Il fut attaché à l'observatoire de Meudon en 1897 à l'âge de 43 ans et succéda à Janssen en 1907. Deslandres avait soutenu sa thèse de doctorat à Auch en 1888 sur le spectre des métalloïdes et inventé, en 1891, le spectrohéliographe. Il tenta en vain d'observer la couronne solaire en dehors des éclipses mais réussit, en 1894, à photographier les protubérances solaires. Il fut, comme Janssen, un observateur assidu des éclipses totales. De 1893 à 1901, il se rendit au Sénégal, au Japon et en Espagne. Progressivement il cessera de porter un intérêt exclusif au Soleil et fit de nombreuses observations à la grande lunette de Meudon. Entre 1899 et 1903, il y fit des mesures de vitesses radiales d'étoiles, il observa des comètes, des novae et détermina par la spectroscopie la vitesse de rotation de la planète Uranus. A partir de 1921, il fit des recherches sur les étoiles à raies chromosphériques brillantes et vers la fin de sa vie, de 1941 à 1947, il s'intéressa à la chimie organique. Il fut l'auteur notamment d'un mémoire intitulé « Possibilité d'expliquer les supernovae par la libération des fortes énergies condensées dans les noyaux de leurs atomes » en 1945, l'année d'Hiroshima...

Le premier congrès de l'Union Internationale pour la Coopération dans les recherches solaires s'est tenu à Meudon en mai 1907. On peut le considérer comme l'ancêtre de l'Union Astronomique Internationale. Janssen y paraissait très âgé et mourut quelques mois plus tard à 83 ans. Bien que son activité ait été réduite, il a conservé son poste de directeur jusqu'à sa mort, car les postes de direction de l'époque, et les avantages qui s'y rattachaient, comme le logement à l'observatoire, étaient conservés à vie.

C'est donc Henri Deslandres qui est directeur adjoint depuis dix ans, qui prend la direction. Deslandres est un ancien élève de l'école Polytechnique. A sa sortie de l'école en 1874, il entre dans le Génie où il devient capitaine. Il démissionne en 1881 pour se diriger vers la recherche en physique. Il travaille sous la direction du professeur Alfred Cornu dans le laboratoire de l'école polytechnique pendant quelques années sur la spectroscopie.

Les débuts à Paris

En 1889, le directeur de l'Observatoire de Paris, l'amiral Mouchez fait appel à lui pour introduire l'astronomie physique dans cet établissement jusque-là voué à la mécanique céleste et l'astronomie de position. On crée pour lui un service de spectroscopie astronomique dans lequel il se distingue rapidement. Il développe le premier spectrohéliographe en utilisant le petit sidérost de Foucault et un spectrographe destiné à l'observation du Soleil. Il effectue également des mesures de vitesses radiales sur les planète par le déplacement des raies spectrales. Deslandres a adapté au télescope de 120cm un spectrographe. Il aura été l'un des rares utilisateurs de cet instrument à l'optique imparfaite dont le miroir a été réalisé par Martin, assistant de Foucault malheureusement décédé avant la fin du polissage.

En 1897, Loewy accepte le transfert de Deslandres à Meudon où il continuera ses travaux et ses développements instrumentaux.

Deslandres à Meudon

Les premières années à Meudon opposent régulièrement Deslandres à Janssen. Une direction de l'observatoire partagée par les deux hommes ne peut que poser des problèmes. Janssen a installé ses laboratoires dans les communs d'un côté des premières et secondes cours alors que Deslandres occupe ceux de l'autre côté. Le personnel de Janssen qu'il recrute à sa convenance est payé par l'observatoire. De son côté, Deslandres a peu de moyens et doit engager de jeunes assistants qu'il paye sur ses deniers. Il se charge de les instruire et les former si besoin est. Ayant une fortune personnelle, il peut à loisir réaliser ses instruments et développer ses travaux dans une totale indépendance, sans être tributaire des crédits de l'observatoire.

A partir de 1898, il installe sur la seconde terrasse un petit sidérost et un coelostat pour éclairer un spectrohéliographe expérimental.

Isolant une raie du spectre solaire, il obtient par balayage une image du Soleil correspondant à la couche de l'atmosphère solaire responsable de cette raie. Ce sont les premiers spectrohéliogrammes de Meudon qui vont faire par la suite la réputation de l'observatoire.

Le 26 décembre 1899, Deslandres fait une communication à l'Académie des Sciences:

« J'ai organisé déjà l'enregistrement quotidien de la Chromosphère du Soleil à l'Observatoire de Paris, après des recherches nombreuses sur la question... à partir de 1893, j'ai organisé à l'Observatoire de Paris deux spectrographes automatiques enregistreurs appelés spectrographe des formes et spectrographe des vitesses. Le premier donne la chromosphère projeté sur le disque avec ses plages brillantes, et aussi, mais avec une pose plus longue, les protubérances du bord extérieur. Le second donne les mouvements des vapeurs chromosphériques dans le sens du rayon visuel et, en plus, l'épaisseur de la chromosphère au bord.

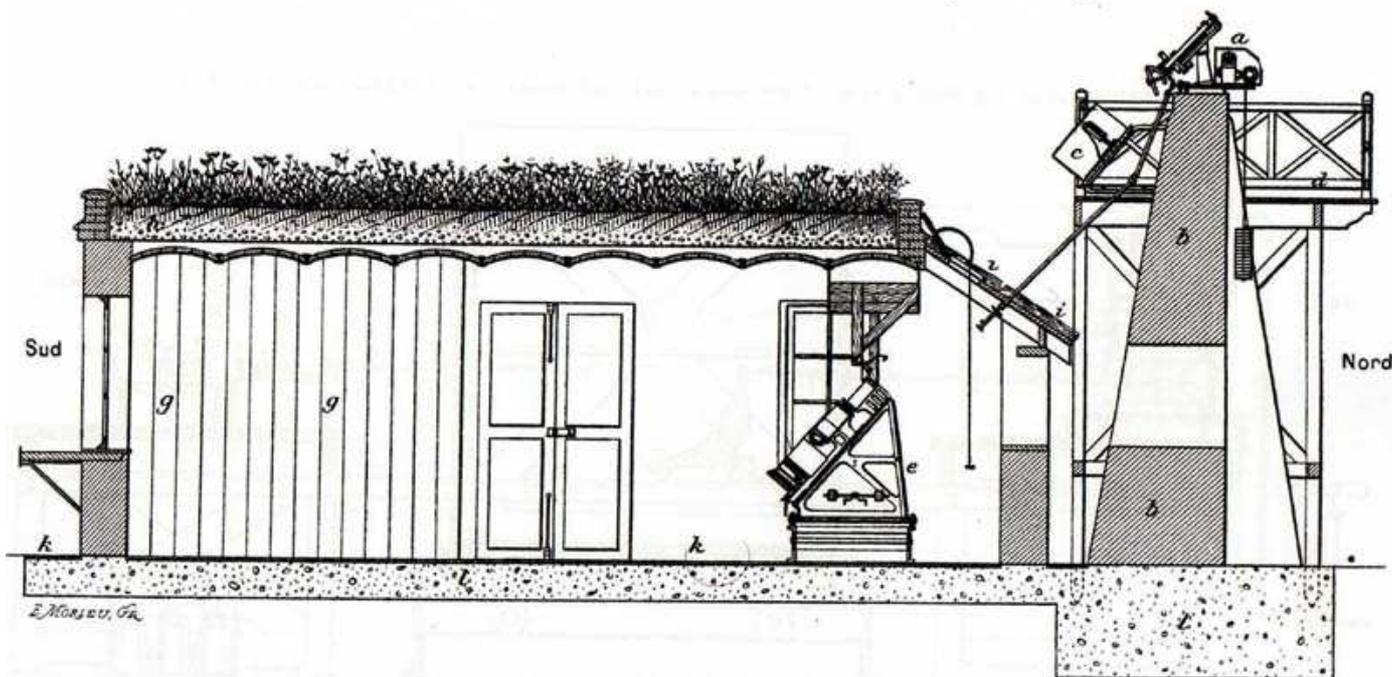
J'ai organisé ces mêmes appareils à l'observatoire de Meudon avec l'assentiment du directeur, M; Janssen, grâce à une subvention spéciale que l'académie a bien voulu m'accorder....

L'appareil comprend deux parties principales: 1° un sidérostat qui renvoie dans une direction constante les rayons solaires réfléchis et qui, complété par un objectif astronomique, donne une image du Soleil réelle et fixe; 2° un spectrographe mobile à deux fentes, qui reprend cette image réelle et en extrait la lumière spéciale de l'atmosphère sous la forme d'une ligne lumineuse, la lumière de l'astre étant éliminée, et qui, par le mouvement de la ligne lumineuse, reconstitue l'image même de l'atmosphère et des de ses plages brillantes...

A Meudon le seul sidérostat existant a été mis à ma disposition par M. Janssen. Il est polaire, plus simple que le précédant (celui de Paris) et de marche plus régulière, mais ne se prête pas aux grandes distances focales. Les rayons solaires sont réfléchis suivant une ligne parallèle à l'axe du monde, donc très inclinés sur l'horizon, le long de laquelle sont disposés l'objectif et le spectrographe... A la partie supérieure est le sidérostat sur un pilier indépendant dont la hauteur a été réglé sur la distance focale (3m,20) du seul objectif disponible d'ouverture égale à 0m,20. Le spectrographe et son chariot mobile sont à la partie inférieure, dans un bâtiment spécial que l'on a recouvert en pierre, terre et chaume, pour diminuer les variations de température... l'image chromosphérique atteint 92mm...

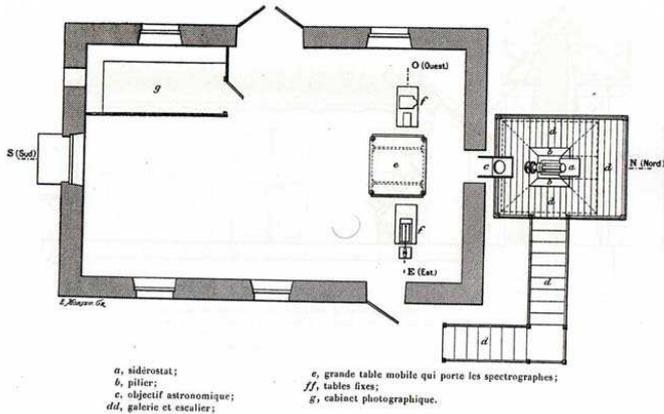
L'image chromosphérique offrait alors (maximum solaire de 1893) de larges plages très brillantes à l'emplacement des facules du disque, et, en outre, des petits maxima de lumière formant ce que j'ai appelé le réseau chromosphérique... »

Fig. 4. — Coupe suivant S.-N. (Sud-Nord) à la même échelle que dans la figure 3.



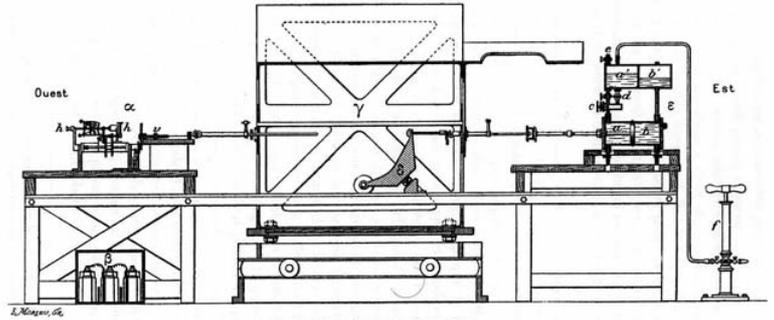
- hh, toit en fer et briques recouvert de terre et d'herbe;
- ii, toit en appentis recouvert de chaume traversé par un trou circulaire;
- k, asphalte;
- l, béton sur sol naturel.

Fig. 3. — Plan du pilier qui porte les appareils astronomiques et du bâtiment annexe qui contient les spectrographes



a, sidérostat;
b, pilière;
c, objectif astronomique;
dd, galerie et escalier;
e, grande table mobile qui porte les spectrographes;
ff, tables fixes;
g, cabinet photographique.

Fig. 5. — Coupe suivant O. E. (Ouest Est) faite à une échelle plus grande que dans les figures 4 et 5.



alpha, organe du mouvement discontinu;
beta, piles électriques;
gamma, grande table mobile porte-spectrographes;
delta, poids moteurs du mouvement continu;
epsilon, organe du mouvement continu.

Plan du bâtiment.

Le spectrohéliographe.

Ce premier travail est précurseur d'un nouveau spectrohéliographe, quadruple, de très grande dimension. Instrument qui va devenir par la suite fondamental pour l'étude des structures chromosphériques et à la base de toute la physique solaire développée dans le site de Meudon. Pour établir ce nouvel instrument, il doit faire construire un nouveau bâtiment, dans le parc de l'observatoire. Le corps principal mesure 24m sur 6 et est éclairé au nord par un grand sidérostat de Foucault dont le miroir plan mesure jusqu'à un mètre de diamètre (par la suite, il sera équipé d'un miroir de 75 cm). Au sud est installé un coelostat à deux miroirs plans. Le primaire mesure 50cm de diamètre. Il est sur un axe équatorial et tourne avec une vitesse de rotation deux fois plus lente que le mouvement de la Terre. Le second miroir plan, de 40cm est monté sur une fourche azimutale mobile sur un rail. On peut éloigner ou rapprocher le secondaire pour compenser la différence de hauteur du Soleil dans le ciel. Le primaire peut également être déplacé vers l'est ou l'ouest pour éviter le silhouettage du secondaire dans le faisceau.

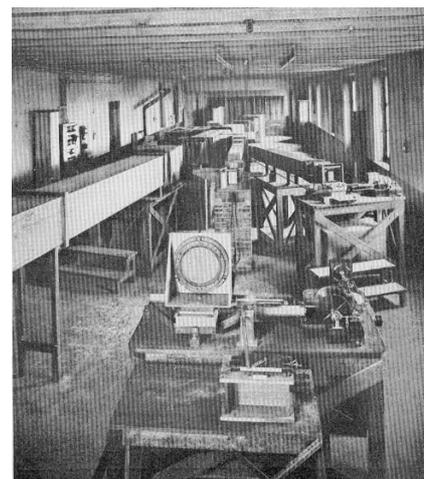
Sidérostat et coelostats sont protégés par des abris mobiles montés sur des rails. On nomme encore de nos jours ce bâtiment « le Grand Sidérostat ».

Parallèlement à ses travaux solaires, Deslandres observe à la grande lunette ainsi qu'au télescope de 1m. Il y fait des travaux de spectroscopie.

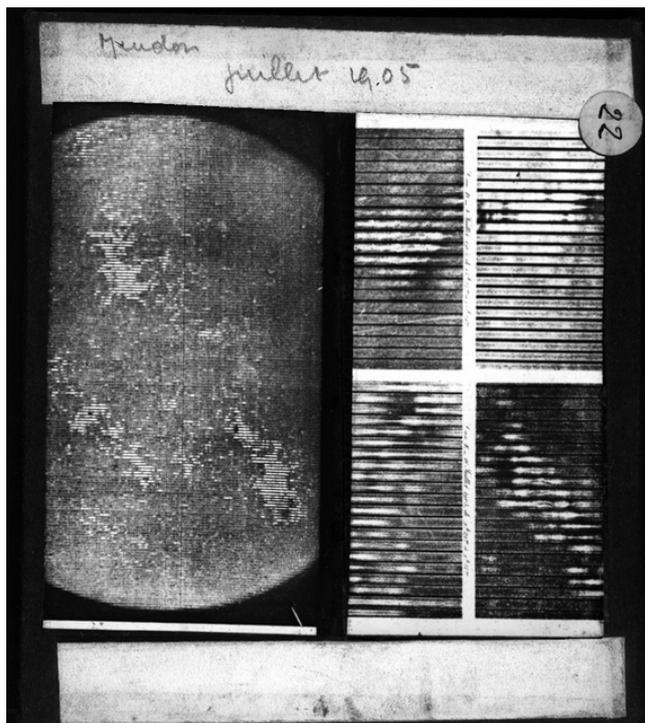
Lorsque la première guerre mondiale éclate en 1914 bien qu'âgé de 60 ans, il repart pour le service actif dans le génie avec le grade de major et plus tard lieutenant-colonel. Après l'armistice de 1918, il retourne à son bureau de Meudon jusqu'en 1927, le rapprochement des observatoires de Paris et de Meudon le désignant directeur des deux institutions jusqu'en 1929. En 1920, il est président de l'Académie des sciences, dont il avait été élu membre en 1902.

Deslandres reste un astronome très actif jusqu'à sa mort en 1948. Il avait prévu de transférer tous les instruments astronomiques sur le seul site de Meudon, en ne laissant à Paris que la partie administrative de l'observatoire, mais ceci ne fut jamais réalisé.

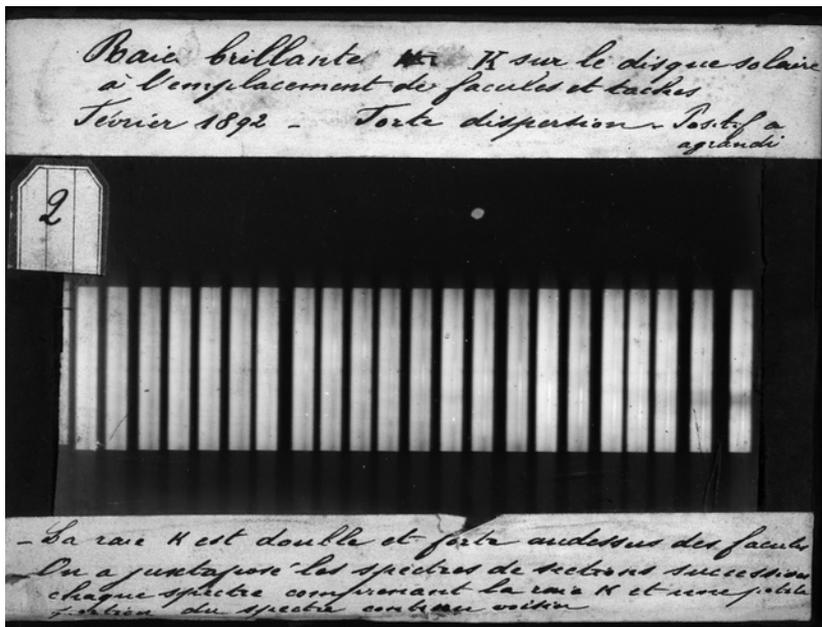
Le spectrohéliographe dans le bâtiment dit du Grand Sidérostat. On voit l'ancien objectif de 25cm ainsi que les deux bras du spectrographe. L'un de ces bras est destinée à la raie rouge de l'hydrogène et l'autre à celle du calcium dans le violet.



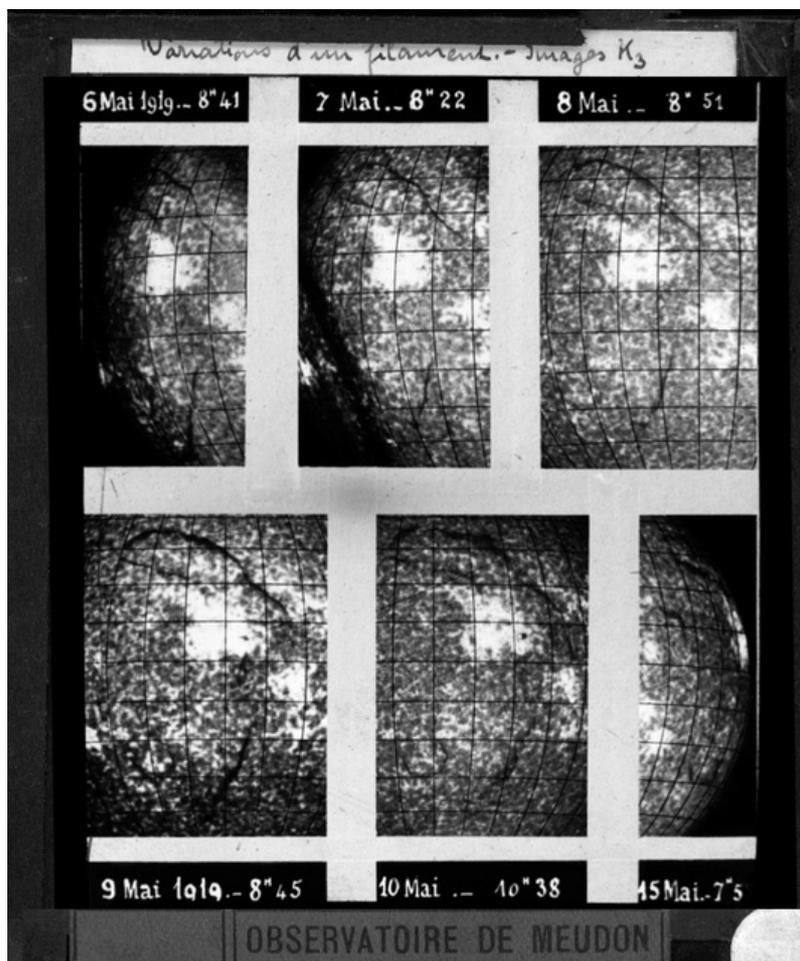
Spectrohéliogramme de juillet 1905 à gauche et à droite, enregistrement des vitesses des régions actives.



Clichés de la raie K du calcium brillante au niveau d'une facule en 1892. Ces clichés permettaient à Deslandres de mesurer les vitesses de la matière.



Deslandres à Meudon.



Spectrohéliogrammes montrant de déplacement d'un filament par les effets de la rotation solaire dans la raie K à 393nm du 6 au 15 mai 1919. Clichés Observatoire de Meudon.



K

H α

Le Spectre du Soleil.

Pour comprendre

Observation monochromatique du Soleil

L'observation du spectre de la lumière solaire montre des dizaines de milliers de raies d'absorption qui sont dues en majorité aux gaz de la photosphère. Pendant une éclipse totale, on voit pendant un bref instant apparaître des raies en émission. Certaines sont très brillantes, comme les raies H et K du calcium ainsi que la célèbre raie H α de l'hydrogène. On sait aujourd'hui, grâce aux nombreux travaux sur la physique solaire, que ces raies sont produites dans la haute atmosphère du Soleil, la chromosphère.

Certaines raies spectrales, comme celle de l'hydrogène à 656,3 nm ou celle du Calcium à 393,3 nm sont très denses. Si on isole l'une de ces raies, on constate qu'elle n'apparaît noire que par contraste sur le spectre continu. La raie comporte ainsi une quantité de lumière qui correspond à l'émission de la chromosphère. En isolant la raie, on accède ainsi à des informations sur la partie haute de l'atmosphère solaire.

C'est le principe de l'observation monochromatique: on rejette toute la lumière, sauf celle d'une raie précise. C'est Jules Janssen qui a imaginé une méthode pour observer le Soleil en lumière monochromatique. Il a imaginé le spectrohéloscope vers 1870. Le principe est simple : On projette l'image donnée par l'objectif d'une lunette sur la fente d'un spectroscopie visuelle. Au foyer de l'oculaire du spectroscopie, on place une fente fine centrée sur une raie du spectre, comme la raie H α . En donnant au spectroscopie un mouvement de va et vient de sorte que la fente d'entrée balaie la totalité du disque solaire, l'œil enregistre une image monochromatique de la chromosphère. En réalité, on ne voit que la raie qui se déplace dans le champ, mais la persistance rétinienne reconstitue l'image du disque entier. Cette méthode est assez empirique et n'a été que peu employée.

Principe et fonctionnement du spectrohélographe

Le spectrohélographe de Meudon a connu de nombreuses évolutions mais le principe de fonctionnement est resté le même.

La lumière solaire est renvoyée sur l'objectif par un cœlostate à deux miroirs plans. L'objectif de 25 cm de diamètre et 4 m de distance focale forme une image du disque solaire sur la fente d'entrée du spectrographe. Le premier objectif utilisé par Deslandres était d'une qualité ordinaire et il fallait modifier sa position selon le domaine spectral utilisé. L'objectif moderne est optimisé pour que les foyers rouge et violet soient parfaitement confondus.

Après avoir fait des tentatives sur les différentes raies du spectre solaire, ce sont les raies H α de l'hydrogène à 656,3 nm et la raie K du calcium à 393,3 nm qui ont été choisies pour l'imagerie monochromatique de la chromosphère. Ces deux raies larges mettent en évidence deux aspects de la chromosphère. La raie K est très sensible aux différences de températures dans le Soleil, elle permet ainsi de faire ressortir les plages brillantes, les facules. La raie H α est plus sensible aux différences de densité de la matière chromosphérique. C'est elle qui montre le mieux les filaments sur le disque ainsi que les structures fines de la chromosphère. Ces deux aspects solaires se complètent parfaitement.

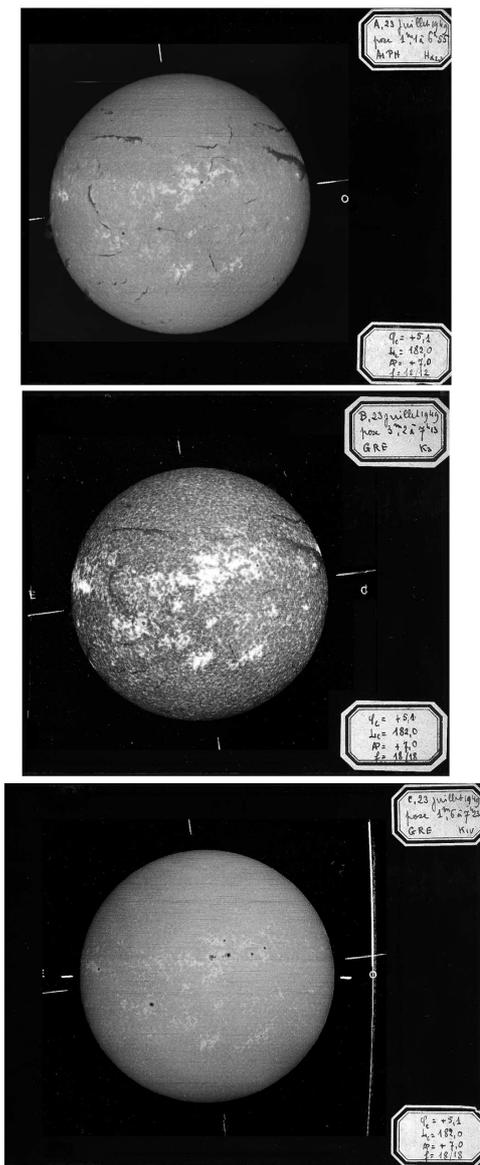
L'objectif forme une image sur la fente du spectrographe. L'image de cette fente est ensuite collimatée par un objectif. Le faisceau est dispersé par un réseau de diffraction qui forme ainsi un spectre. Au foyer de l'objectif de chambre du spectrographe, une fente est positionnée devant la raie à explorer. Cette fente sélectionne uniquement la lumière contenue dans la raie. On obtient donc une image monochromatique d'une mince bande sur le Soleil. Pour réaliser une image de la totalité du disque, l'objectif se déplace, faisant défiler l'image solaire devant la fente d'entrée. De la même manière et avec une vitesse parfaitement synchronisée, la plaque photographique se déplace devant la fente de sortie. Elle enregistre ainsi une image monochromatique de la chromosphère.

Les anciennes versions du spectrohéliographe comprenaient deux voies différentes. Une voie destinée à l'imagerie en H α , dans le rouge pour laquelle la dispersion était produite par un train de trois prismes. Une seconde voie, pour le violet de la raie K du Calcium utilisait un réseau de diffraction.

La version moderne du spectrohéliographe n'utilise qu'un seul réseau. On passe de la partie rouge du spectre à l'ordre 3 à la partie violette à l'ordre 5 suivant en interposant des filtres colorés derrière la fente d'entrée.

Depuis 2003, la photographie argentique a été remplacée par une caméra CCD. On n'utilise plus de fente sélectrice. Une seule rangée de pixels positionnée devant la raie du spectre fait office de fente. Elle enregistre une succession de spectres qu'un logiciel transforme ensuite en image monochromatique.

Nous verrons dans le chapitre suivant que cet instrument est à la base du service d'observation solaire qui représente encore aujourd'hui une spécialité de l'observatoire de Meudon.



Spectrohéliogrammes du 23 juillet 1949.

Le cliché du haut montre le Soleil dans la raie H α de l'hydrogène à 656.3nm. On y distingue parfaitement les filaments sur le disque

Au milieu, le spectrohéliogramme pris dans le centre de la raie K du calcium à 393.3nm met en évidence les plages faculaires qui sont des régions très brillantes. On distingue également les filaments mais ils sont nettement moins contrastés que dans l'hydrogène.

En bas, on a décalé la fente de sortie dans l'aile de la raie K. L'opacité diminue ce qui révèle les structures photosphériques. Ainsi, ce cliché nous montre les taches solaires.

Ces trois images successives permettent d'avoir un aperçu de l'atmosphère solaire à des altitudes différentes.

Lucien d'Azambuja (1884-1970)



D'Azambuja et Bernard Lyot (à gauche) à Louksor en 1952.

Né le 28 janvier 1884, Lucien d'Azambuja fait ses études primaires à l'Ecole Saint-Joseph de Bellevue, tout près de l'observatoire de Meudon. Il perd son père très jeune et sa mère souffrante est sans ressources. Il doit donc trouver un emploi très tôt. Le directeur de l'école recommande le jeune Lucien à Henri Deslandres qui cherche un assistant. D'Azambuja entre donc à l'observatoire le 24 avril 1899, à l'âge de quinze ans. L'effectif de l'observatoire se réduit à cinq personnes (environ 500 aujourd'hui) dont Jules Janssen, le directeur aidé de son assistant Louis Pasteur qui photographie quotidiennement les taches solaires. Il est manifeste que ce personnage utilise un nom d'emprunt. Deslandres, de son côté ne dispose toujours pas des crédits de l'observatoire. Le très jeune d'Azambuja se révèle d'une grande habileté et procure à Deslandres une aide très précieuse pour développer ses installations et effectuer ses observations et recherches. Ils partent ensemble pour observer les éclipses totales du 28 mai 1900 et du 30 août 1905 en Espagne.

De 1893 à 1906, les observations de Meudon constituent la plus grande collection au Monde d'images dans la raie K. Et Deslandres précise « *Comparables aux meilleures faites en Amérique avec des appareils plus volumineux et plus puissants* ». Il faut préciser qu'une certaine rivalité existe entre Hale et Deslandres. L'un comme l'autre dépouillent et analysent leurs clichés. Après avoir baptisé « filaments » les lignes sombres visibles sur le disque, Deslandres conteste l'appellation de « Flocculi » donnée par Hale aux régions brillantes au profit de « plages faculaires ».

A partir de 1907, Deslandres dispose de tous les moyens de l'observatoire pour mener à bien ses travaux. Ainsi il charge d'Azambuja d'installer le *grand spectrohéliographe quadruple* éclairé par le cœlostat à deux miroirs.

Laissons la parole à Henri Deslandres: « *C'est un appareil délicat et difficile à régler. Dans la recherche j'ai été aidé constamment par d'Azambuja, jeune astronome de talent dont le nom est associé au mien dans la découverte.* »

Les clichés dans la raie K puis à partir de 1909 dans la raie H α permettent des interprétations qui opposent parfois les deux hommes. Ainsi Deslandres persiste à affirmer que les filaments vus sur le disque se trouvent à côté des protubérances et ce malgré les contestations de son collaborateur. D'Azambuja, qui fait preuve d'une très grande patience, se rend vite compte de l'importance de l'obtention régulière de spectrohéliogrammes pour comprendre l'évolution des phénomènes. Parallèlement à son travail d'observateur et d'instrumentaliste, d'Azambuja reprend les études qu'il a interrompues trop tôt. Avec le soutien et parfois l'aide de Deslandres, il étudie le soir et obtient en juillet 1914 le second des trois certificats de la licence. Ce n'est qu'après la guerre pendant laquelle il est mobilisé, blessé et décoré, qu'il termine cette licence.

En 1919, les enregistrements quotidiens reprennent dans les trois longueurs d'onde, H α , K $_1$ et K $_3$ avec deux combinaisons du spectrohéliographe, utilisant alternativement les prismes et le réseau. En 1923 arrive à Meudon une jeune assistante du professeur Alfred Pérot qui enseigne à l'École Polytechnique. Elle se nomme Marguerite Roumens et son rôle est de mesurer les spectres enregistrés à Meudon. A la mort de Pérot en 1925, elle est engagée à Meudon comme assistante-auxiliaire. Cette même année, Deslandre est nommé directeur de l'Observatoire de Paris-Meudon car les deux établissements sont réunis en une seule entité avec une direction unique.

D'Azambuja est moins occupé par les observations systématiques, ce qui lui laisse du temps pour des études scientifiques sur le spectre solaire. Entre août 1925 et la fin de l'été 1927, 145 spectres sont photographiés avec le spectrographe double à trois fentes au grand sidérost et l'aide précieuse de Marguerite Roumens. Il en tire une étude très précise de onze raies spectrales d'éléments ionisés. Ces résultats l'ont conduit à publier une thèse de doctorat d'état ayant pour titre « *Recherches sur la Structure de la Chromosphère Solaire* ».

Parallèlement à ce gros travail, il établit les premières cartes synoptiques et en affine la représentation des filaments.

En 1928, l'Assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale à Leyde décide que les astronomes doivent fournir aux géophysiciens des indices quotidiens de l'activité solaire plus typiques que le simple nombre de Wolf qui ne concerne que les taches solaires.

La même année, d'Azambuja publie dans les Annales de l'Observatoire de Paris, section de Meudon, les cartes synoptiques de la chromosphère solaire et catalogue des filaments de la couche supérieure des 11 rotations de la période mars 1919 à janvier 1920. Notons qu'une collaboration est établie entre les observatoires de Meudon, de Kodaikanal aux Indes et du Mont Wilson aux États-unis pour assurer un suivi quotidien du Soleil. Pour mener à bien cette première publication, il a fallu mesurer avec précision 575 filaments. Ce travail l'a amené à communiquer à l'Académie des Sciences des résultats sur des « *mesures nouvelles de la vitesse de rotation des filaments – Évaluation de la hauteur de ces objets au dessus de la chromosphère solaire* ».

Aux vues de la qualité du travail effectué à Meudon, l'UAI nomme Lucien d'Azambuja Président de la commission des phénomènes chromosphériques en 1932. Il préside également la commission des relations Soleil-Terre. Ces fonctions occuperont une grande partie de son temps durant toute sa carrière. Il organise une coopération internationale pour la surveillance continue du Soleil et la détection des éruptions dont on vient de découvrir l'influence sur l'ionosphère.

Durant toute sa carrière, d'Azambuja gardera un œil sévère et vigilant sur l'établissement des cartes synoptiques.

L'étroite collaboration entre d'Azambuja et M. Roumens qui s'est établie à partir de 1926, ne reste pas purement scientifique. En 1935, les deux observateurs solaires se présentent devant Monsieur le maire et se jurent fidélité.

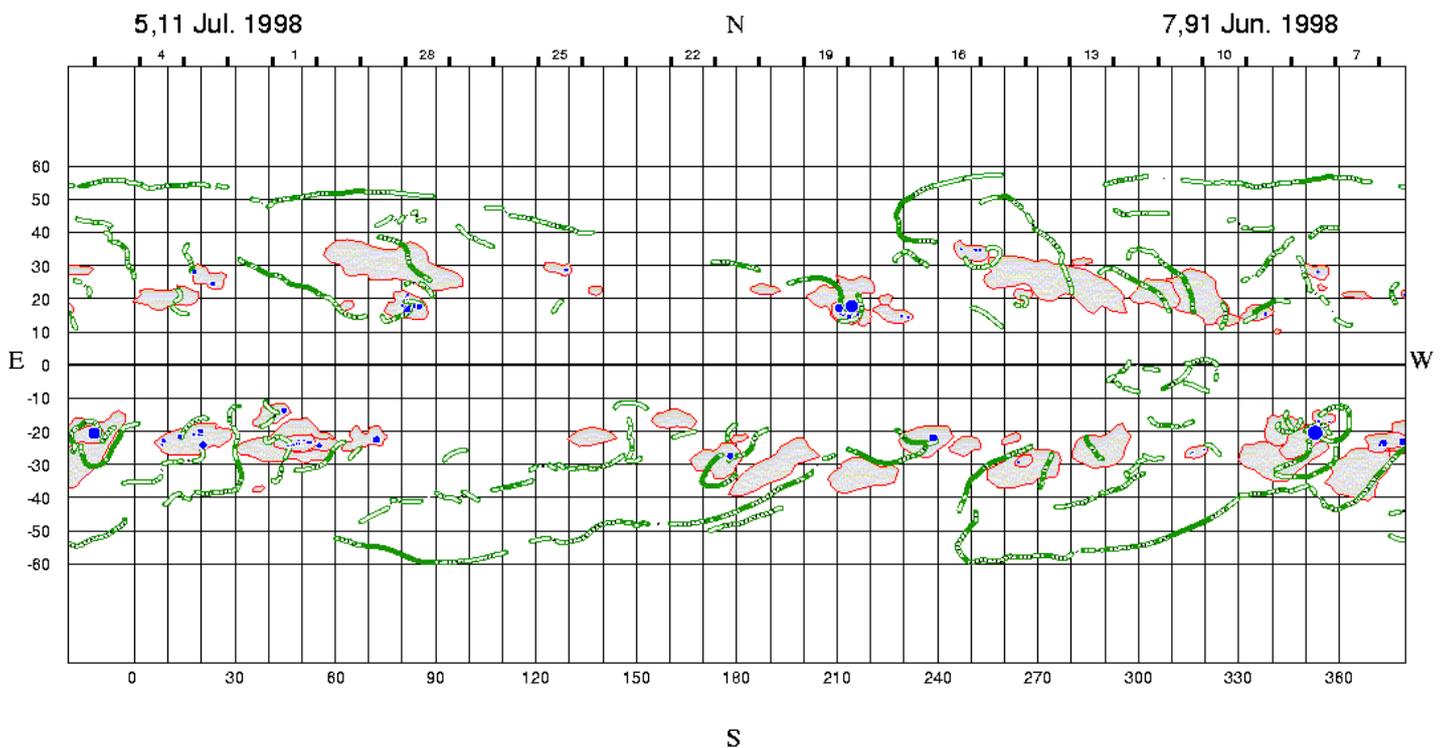
Fidèles, ils le sont dans le travail car ils publient ensemble en 1948 un volumineux mémoire intitulé « Étude d'ensemble des protubérances solaires et leur évolution effectuée à l'aide des spectrohéliogrammes obtenus à l'Observatoire de Meudon et des cartes synoptiques de la chromosphère publiées par l'établissement ».

Ce travail fait le point des connaissances de cette époque et constitue une base solide pour l'avancée de la physique solaire moderne.

Lucien d'Azambuja est reconnu pour le soin extrême qu'il a apporté à ses travaux mais il aura également été un directeur d'établissement. Après la fusion administrative des deux observatoires et le départ de Deslandres en 1929, c'est lui qui dirige en pratique le site de Meudon sous le regard approbateur des directeurs E. Esclangon puis A. Danjon. Ainsi, sous son autorité ont travaillé Fernand Baldet, Bernard Lyot, Henri Grenat, Charles Bertaud et Madame d'Azambuja.

C'est en avril 1959 que le couple se retire pour une retraite bien méritée. Mais, même loin de Meudon, Lucien d'Azambuja aimait à regarder au loin, de sa maison de campagne, le Pic du Midi qu'il visitait régulièrement. Lucien d'Azambuja s'éteint le 18 juillet 1970 à l'âge de quatre-vingt sept ans dont plus de soixante au service de l'astre du jour.

ROTATION 1937



Exemple de carte synoptique qui représente les taches, les facules et les filaments d'une rotation solaire complète. Ces cartes ont été réalisées pour chaque rotation jusqu'en 2003, date du départ en retraite de Madame Germaine Zlicaric. Elles ont toujours été faites à la main par une personne experte. Une étude est actuellement en cours dans le but de rendre ce travail complètement informatisé par des logiciels de reconnaissance de forme.

L'anamorphoseur de clichés solaires

L'anamorphoseur était un appareil destiné à une reproduction des spectrohéliogrammes déformés de telle sorte que l'image d'une sphère sur laquelle on a tracé des méridiens et parallèles, soit transformée en un quadrillage. On transformait ainsi des coordonnées sphérique en coordonnées orthogonales. Il permettait ainsi la confection des cartes synoptiques de la chromosphère qui étaient publiées depuis 1920.

Avant la mise en service de cet appareil, la mesure des structures solaires était un travail long et fastidieux. Après avoir marqué et numéroté chaque filament, l'opérateur s'enfermait dans une chambre noire et reportait dans un registre les coordonnées héliographiques des pieds des filaments et les dessinait sur une feuille de papier millimétré. Chaque filament apparaissait sous les différents aspects qu'il présentait pendant la rotation solaire. Ce travail demandait un apprentissage long et les opérateurs changeaient de poste à la première occasion.

En 1945, Roger Servajean imagina un moyen mécanique et photographique d'effectuer ce travail. Le principe de l'instrument consistait à former l'image des différents parallèles du Soleil sur la section droite d'un cylindre délimité par une fente. La photographie finale était intégrée par parallèles dont chaque image a une grandeur constante.

L'anamorphoseur se présentait sous la forme d'un agrandisseur constitué d'un banc optique sur lequel se déplacent deux chariots. Le cliché à reproduire et le papier étaient mobiles dans le sens vertical. Chaque point du Soleil défilait par parallèle sur la fente circulaire placée devant le cylindre. Le mouvement horizontal avait pour objet de maintenir constante, sur le cylindre récepteur, la dimension des parallèles quelle que soit la latitude. La constance de la dimension en longitude était assurée par la projection sur un cylindre.

Le papier photographique épousait la forme du cylindre porte-fente. Le cliché du Soleil était placé sur un chariot objet dont le mouvement vertical était proportionnel au sinus du temps.

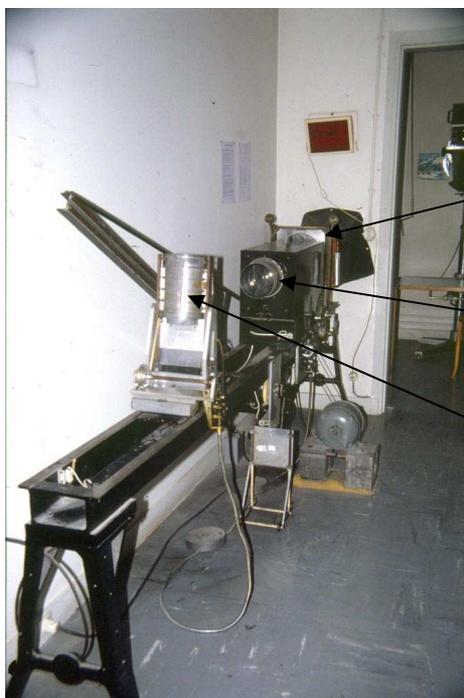
L'agrandissement variait en fonction de la latitude du parallèle en cours de reproduction.

Le cliché objet se montait sur une platine orientable selon l'angle de position du Soleil et le cylindre recevant le papier s'inclinait pour tenir compte de la latitude du centre du Soleil.

Toute la conception de l'instrument a été faite par Roger Servajean qui a bénéficié de l'aide d'Henri Grenat.

L'appareil a été réalisé entièrement dans l'atelier de mécanique de l'observatoire de Meudon par Marcel Brebion qui s'est vu décerner le titre de « un des meilleurs ouvriers de France » grâce à cette réalisation.

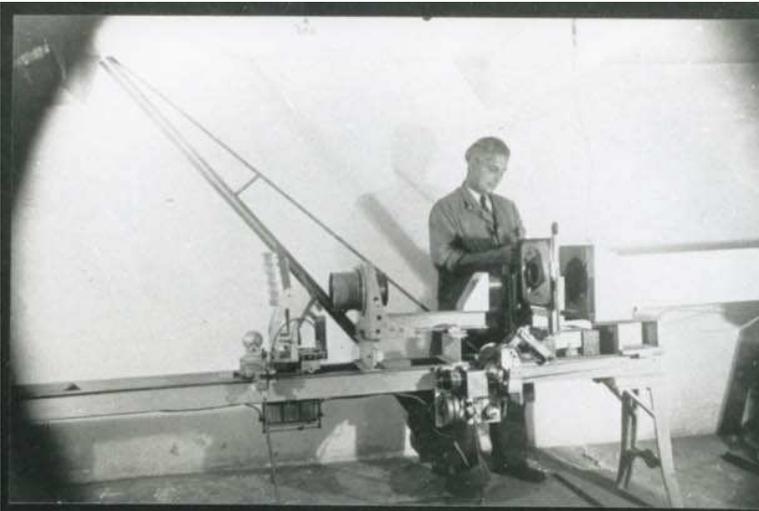
L'anamorphoseur a été mis en service au début de l'année 1949 et a servi sans discontinuer jusqu'en 1990. A partir de 1991, le travail pour lequel il avait été conçu pouvait se faire par une acquisition des données par ordinateur.



Cliché objet sur son chariot.

Objectif.

Demi-cylindre sur son chariot comportant la fente et le papier.



ci-contre

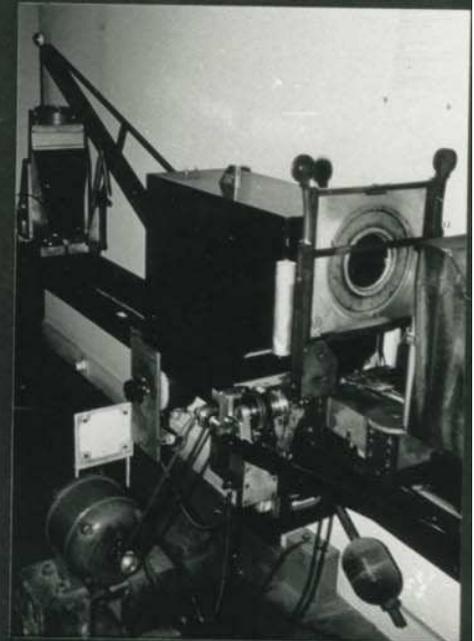
L'anamorphoseur au moment de sa mise en service.

M. BREBION, mécanicien à l'observatoire procède aux derniers essais de l'instrument qui devait lui valoir le titre de "Un des meilleurs ouvriers de France".



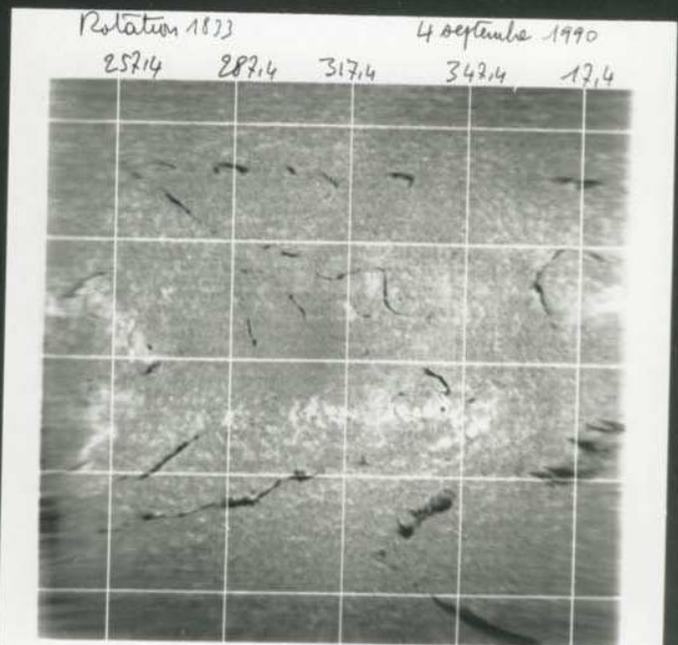
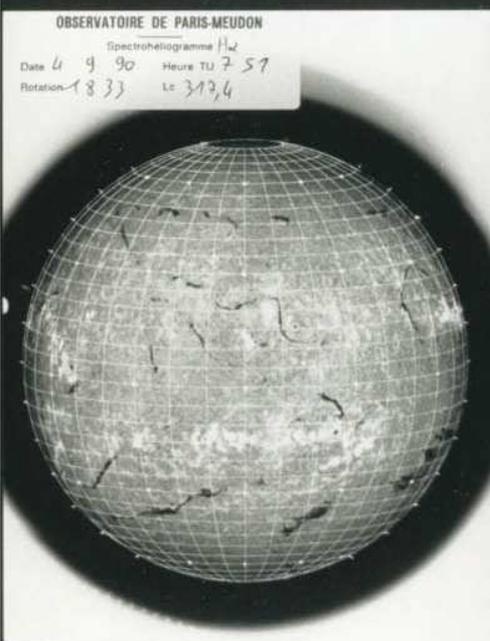
ci contre

Dernières vues de l'anamorphoseur avant son départ pour une retraite bien gagnée.



ci dessous

Un cliché du Soleil et sa traduction par l'anamorphoseur



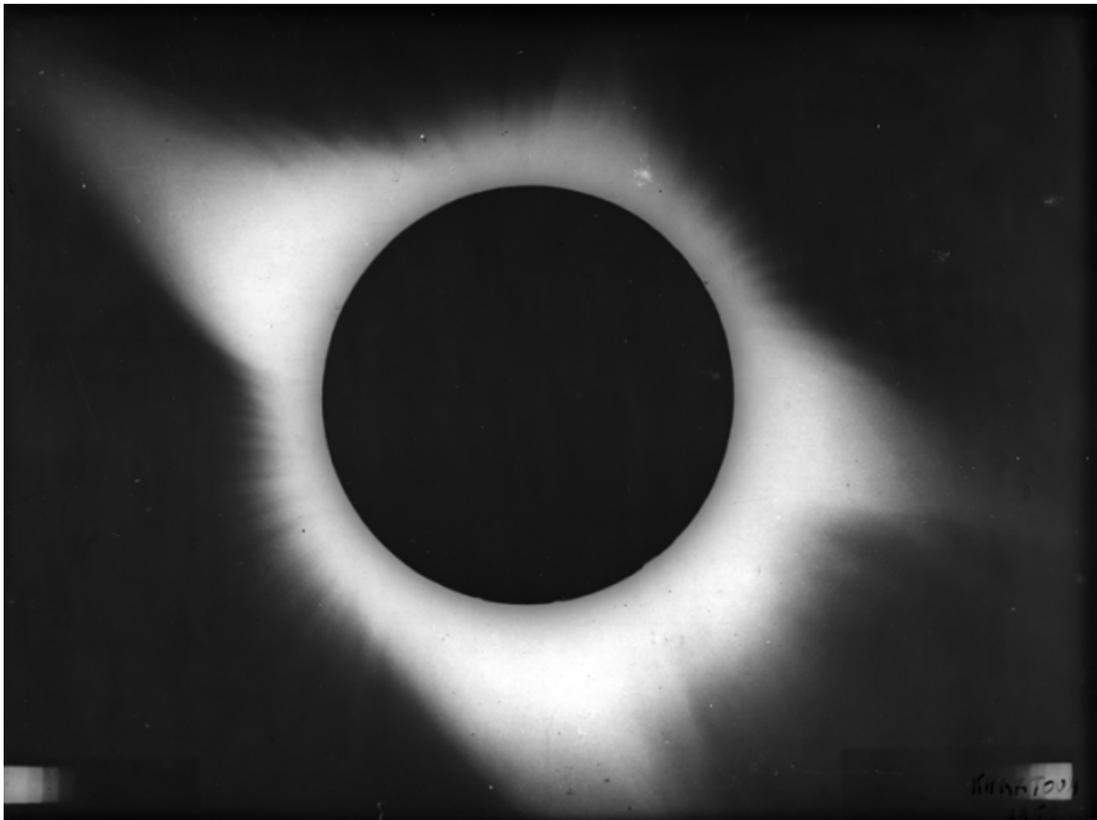
Bernard Lyot (1897-1952)



Nous arrivons maintenant à une époque charnière dans l'histoire des observations solaires à Meudon. Après Janssen, le créateur, Deslandres puis d'Azambuja une solide tradition d'observations solaires systématiques s'est ancrée dans l'observatoire. Le spectrohéliographe est un instrument magistral qui permet des études très complètes du Soleil et une grande partie de ce qui était réalisable a déjà été fait par les pionniers. Avec Lyot commence une nouvelle ère de la physique solaire, moins descriptive, plus pointue et visant à observer et comprendre les moindres secrets de l'astre du jour.

Nous ne pourrons pas tout dire sur l'œuvre de Lyot tant elle est vaste malgré la trop courte durée de sa vie. Nous commencerons par une biographie de l'homme et une description sommaire de ses travaux. Ensuite, nous aborderons deux de ses découvertes majeures pour la physique solaire, le filtre polarisant et le coronographe.

Né en 1897 d'un père chirurgien, Constant Lyot, le jeune Bernard connaîtra une carrière courte mais tellement riche qu'il ne se passe pas une journée sans que son nom ne soit cité à l'observatoire de Meudon. Il n'a que dix ans quand meurt son père et quelques années plus tard, c'est son frère aîné, Robert, qui décède à la Guerre. Nous sommes en 1916, et Bernard étudie à l'École Supérieure d'Électricité d'où il sort diplômé un an plus tard. Notons qu'il est déjà membre de la Société Astronomique de France. Il entre alors dans le laboratoire du physicien Alfred Pérot comme préparateur pour illustrer ses cours à l'École Polytechnique. Pendant onze années, il met au service de la physique ses talents créatifs et son habileté manuelle. Pendant cette période il invente deux procédés de radionavigation pour le Ministère de la Guerre. En 1920, il postule pour être l'assistant de Henri Deslandres mais ce n'est qu'en 1925 qu'il obtient le poste officiellement. Il n'attend pas sa nomination pour commencer ses travaux, ainsi il construit un premier polarimètre qu'il utilise avec sa lunette personnelle de 175 mm. Il observe aussi parfois avec la grande lunette de 83 cm de l'observatoire de Meudon. Ce travail dure huit ans après quoi il obtient une thèse de Doctorat en 1929 sur l'étude des planètes en lumière polarisée. En 1928, il commence à s'intéresser à l'observation de la couronne solaire en lumière polarisée. Celle-ci est extrêmement ténue et invisible en dehors des éclipses. De plus, il constate une très forte diffusion de la lumière solaire. Il monte alors au Pic du Midi pour bénéficier de la très bonne transparence du ciel et constate qu'une grande partie de la lumière diffusée provient de l'instrumentation. C'est le début d'une grande aventure scientifique qui commence avec l'invention du coronographe qui le rendra célèbre dans le monde entier. Après avoir contacté Charles Fabry qui dirige l'Institut d'optique de Paris, il étudie les problèmes de la diffusion instrumentale et monte en 1930 au Pic du Midi en compagnie de son épouse. Il a, dans ses bagages, un objectif de 80 mm (2 m de focale) et toutes les pièces qui lui permettront de construire ce premier coronographe. Le tube est des plus rustique car composé de lames de parquet (visible dans le hall du Château de Meudon), il le fixe sur le tube de la lunette du Pic. Il peut ainsi observer les protubérances solaires qui ont la couleur rose que l'on constate pendant les éclipses. Il mesure les taux de polarisation de la couronne et réalise un diagramme caractéristique de l'intensité de la couronne dans le plan du bord solaire. Avec un petit spectroscopie, il décèle les raies d'émission de la couronne. Ces premières observations de la couronne en dehors d'une éclipse fait l'effet d'une petite bombe dans les milieux professionnels mais aussi amateurs. Bientôt ces observations coronales vont révéler la haute température du plasma et les mouvements des protubérances. C'est en 1938 que les films de Lyot sur les protubérances solaires sont présentés lors d'une session de l'Union Astronomique Internationale à Stockholm. En 1939, âgé de 42 ans, il est élu à l'Académie des Sciences et devient le plus jeune académicien. En même temps, Lyot développe un filtre monochromateur en utilisant les propriétés biréfringentes de certains cristaux et la polarisation de la lumière. Ce filtre que nous détaillerons ultérieurement permet d'isoler une faible bande passante dans n'importe quelle partie du spectre. C'est encore une invention majeure qui trouve des applications immédiates en physique solaire. Il peut ainsi observer les protubérances et la couronne dans des raies spectrales. En août 1941, sous l'occupation allemande, il parvient à se procurer un laissez-passer et part observer les planètes au Pic du Midi. Il commence un grand programme qui se poursuivra jusqu'en 1973. La guerre terminée, il ramène des États-Unis, des cellules à multiplicateurs d'électrons qui lui permettent la construction d'un polarimètre photoélectrique. Avec cet instrument, il réalise un coronomètre photoélectrique permettant d'observer la couronne solaire depuis Meudon. Lyot est un esprit brillant qui a toujours de nouveaux projets en tête. André Danjon lui a un jour dit pendant une conférence : « *Vous ne vous intéressez à un sujet de travail qu'à partir du moment où il a été déclaré insoluble par les experts !* » En peu d'années, et grâce aux découvertes de Lyot, la connaissance du Soleil a progressé de façon drastique. Les instruments monochromatiques se sont allégés et il a imaginé un réseau de surveillance de la chromosphère en construisant des héliographes automatiques. Malgré toutes ses activités à Meudon, Lyot accepte de diriger la mission franco-égyptienne pour observer l'éclipse totale de Soleil à Khartoum le 25 février 1952. Le 2 avril de cette même année, il succombe à une crise cardiaque dans un train l'amenant au Caire. En plus d'un grand scientifique, Lyot était apprécié de tous ses collègues pour ses qualités humaines rares et précieuses dans un laboratoire.



Éclipse totale de Soleil du 25 février 1952 à Khartoum.



Lycot academicien
(photo chez g.servajean)



Pic du Midi 1937.

Le filtre polarisant de Lyot

Le principe du filtre polarisant a été énoncé par Bernard Lyot dès 1933, puis ses travaux ont été publiés entre 1941 et 1944. Ces filtres sont constitués par une série de lames cristallines à faces parallèles en quartz ou en spath dont les axes cristallographiques sont parallèles aux faces des lames. L'épaisseur des lames croît suivant une progression géométrique de raison 2. Entre chaque lame, et aux deux extrémités, sont interposés des polariseurs. Les plans de polarisation, parallèles entre eux, sont orientés à 45° des axes cristallographiques.

Chaque lame biréfringente transmet un spectre cannelé. La plus épaisse produisant les cannelures les plus fines. L'épaisseur de la lame détermine la sélectivité du filtre. Les autres lames, dont les épaisseurs décroissent, éliminent une cannelure sur deux en réduisant de moitié le nombre des bandes transmises par les précédentes. A la sortie de l'appareil, il ne reste que quelques fines cannelures séparées dans le spectre. Un filtre interférentiel étroit (<1nm) permet de sélectionner la bonne cannelure.

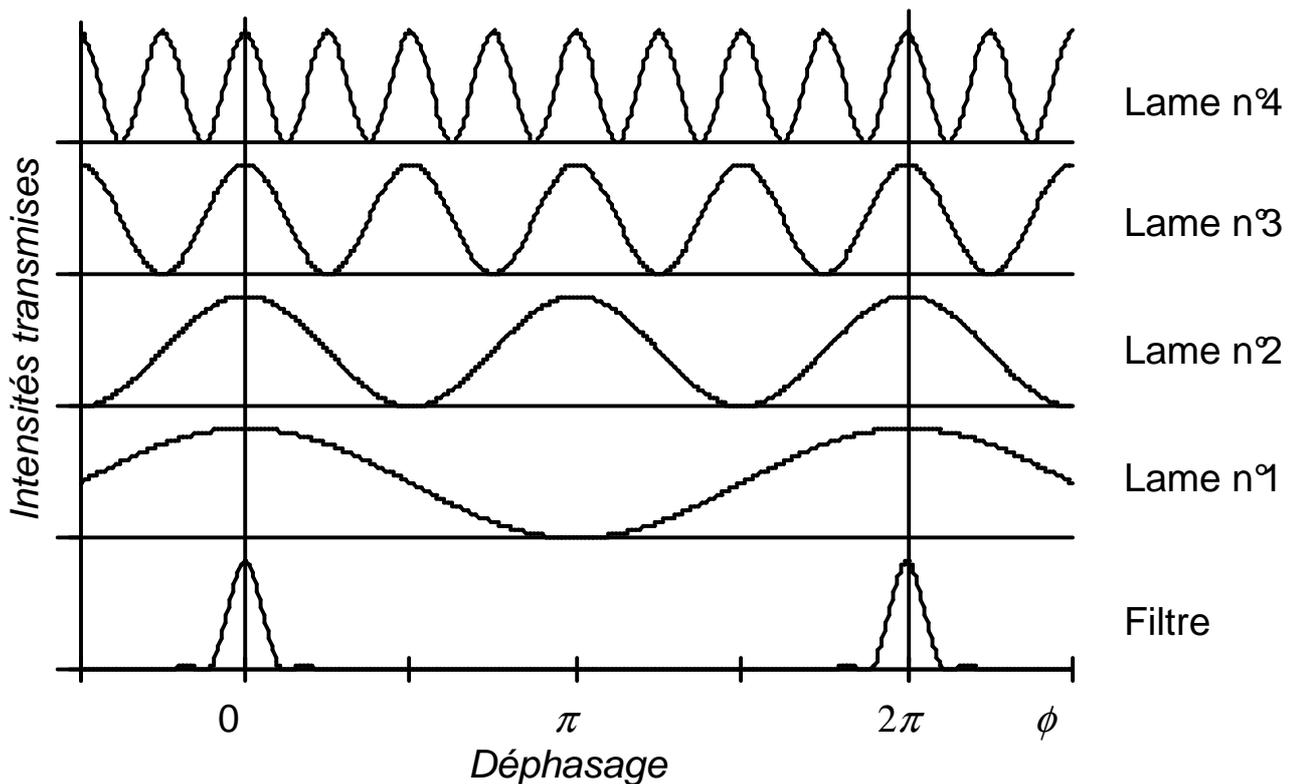
Les longueurs d'onde isolées varient avec la température, à raison de 0.69Å par degré pour le quartz et de 0.37 Å par degré pour le spath, dans le rouge.

La pile de lames est insérée dans un bloc en aluminium, très conducteur de chaleur, et entouré de bobinages chauffants sur toute sa longueur et enfin, le tout est inséré dans une enveloppe calorifuge.

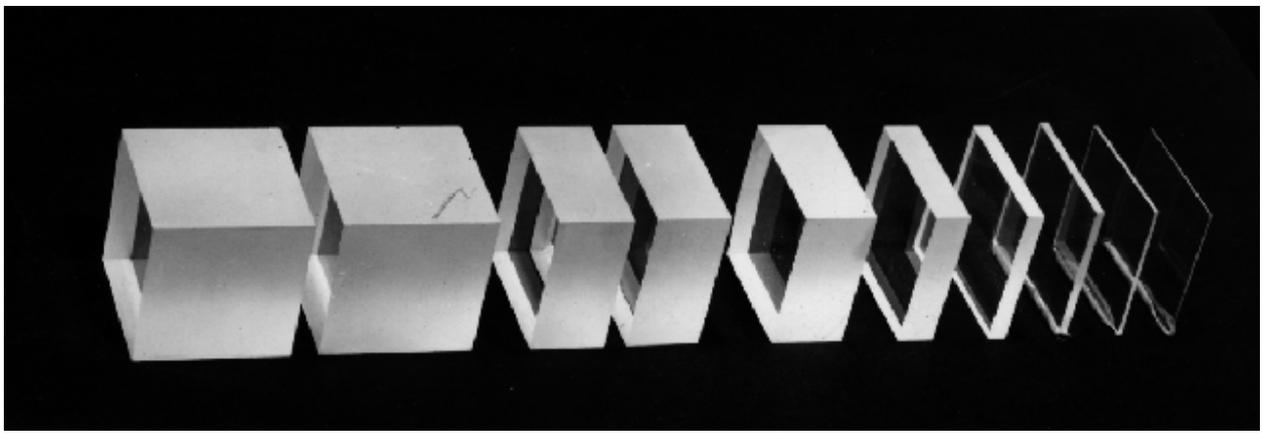
Un courant électrique permet de chauffer plus ou moins le dispositif qui est réglé par un thermostat très précis. En faisant varier la température, on modifie la position de la cannelure dans le spectre.

Dès que l'on a correctement centré la bande passante, il faut maintenir la température avec une précision de l'ordre du dixième de degré. En faisant varier la température, on peut déplacer la bande transmise sur une large plage. Ainsi le filtre de Lyot permet d'explorer la totalité du spectre en passant d'une cannelure à la suivante. Le filtre ne fonctionne correctement que pour des incidences normales, mais Lyot avait réussi à augmenter le champ de son filtre en jouant sur les propriétés de biréfringence des matériaux.

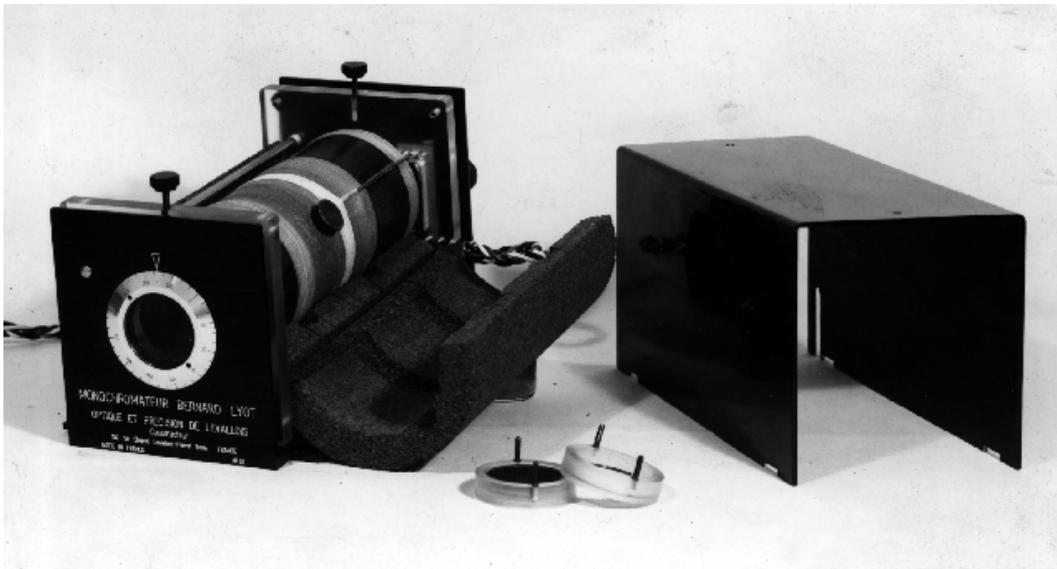
La Société Optique et Précision de Levallois avait construit au début des années 50 des filtres en petite série qui permettaient d'observer les raies chromosphériques du Soleil à 6563 Å et les raies de la couronne solaire à 5875 Å, 5303Å, 6374 Å et 4861 Å. Certains de ces filtres sont toujours en service.



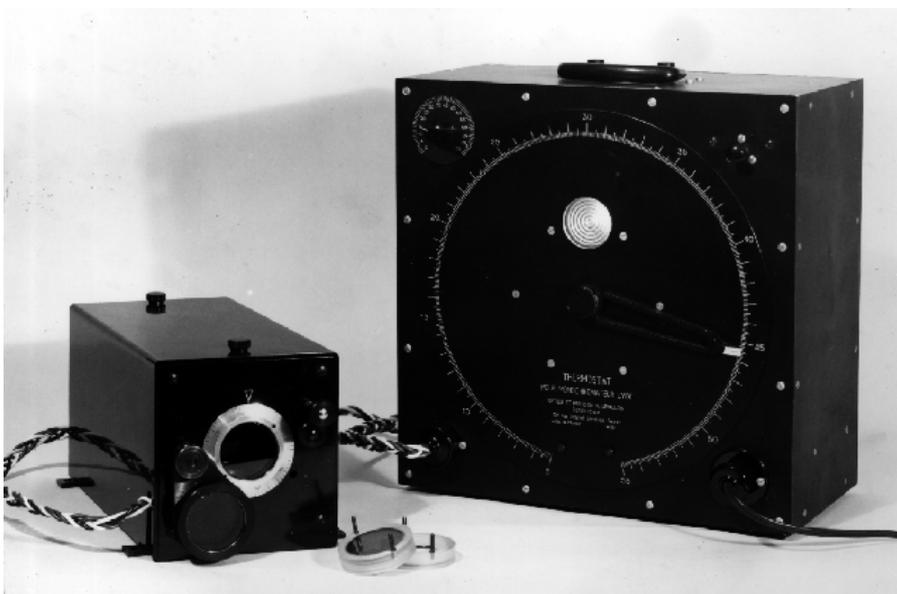
Principe du filtre de Lyot.



Les lames de spath du filtre polarisant.



Le bloc optique du filtre polarisant construit par la Société OPL.

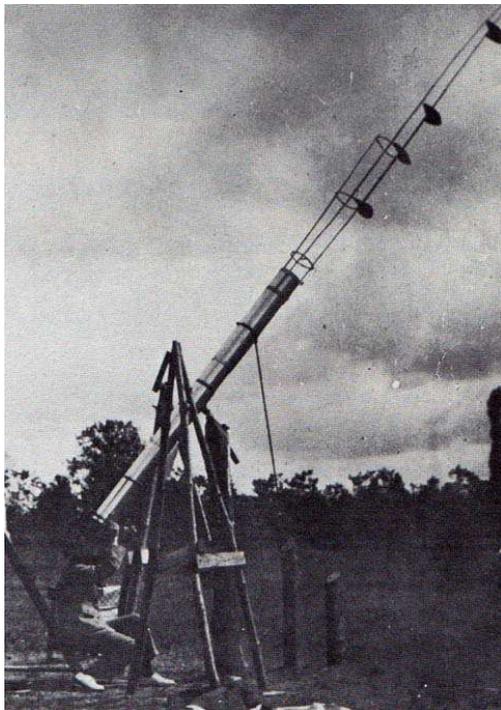


Le filtre complet avec son thermostat. Filtre réalisé en série par la société OPL.

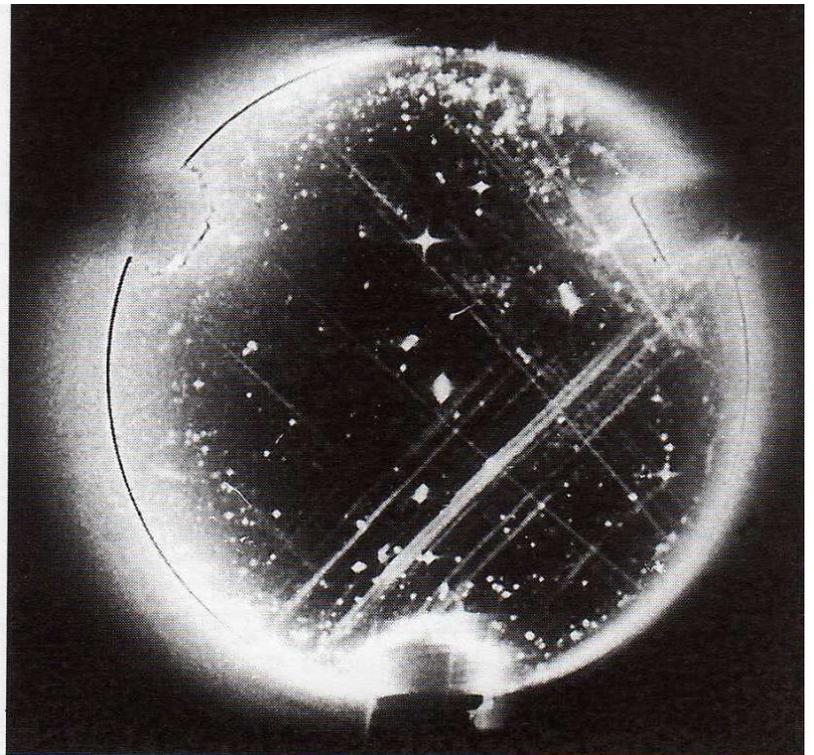
Le coronographe

La fabuleuse histoire du coronographe débute par une série d'entretiens entre Bernard Lyot et Charles Fabry à l'École Polytechnique vers 1928. Lyot venait de développer son polarimètre à franges et Fabry lui fit cette remarque: « *Lors d'une dernière éclipse, on a constaté que la lumière de la couronne solaire était polarisée. Ne croyez-vous pas que vous pourriez, avec votre polarimètre très sensible, essayer de déceler la couronne solaire, par le fait même que sa lumière est polarisée?* » (Propos relatés approximativement).

On avait jusqu'ici maintes fois essayé d'observer la couronne sans succès car tous les astronomes pensaient que la diffusion venait uniquement du ciel. Lyot comprit que l'optique diffuse également beaucoup de lumière. Il l'avait déjà compris dès 1924 en tentant d'observer la planète Mercure avec sa lunette de 175 mm devant laquelle il plaçait des écrans. Ce dispositif réduisait la diffusion lumineuse de l'objectif. Lyot commence ses essais par une expérience d'optique: il éclaire fortement une lentille et place un cache dans l'image de la source. De la sorte, en théorie, aucune lumière ne devrait être visible. En réalité, il observe une lumière diffusée par les défauts de polissage de la lentille. Les petites rayures sont fortement illuminées par la source. Il comprend alors que pour observer la couronne, il doit apporter au polissage des lentilles un soins extrême, jusque là rarement réalisé. Il polit alors une lentille en respectant ces conditions et refait des essais. Il observe de nouveau de la diffusion mais cette fois-ci, ce sont des inhomogénéités du verre qui en sont responsables. Il faut donc choisir un verre aussi parfait que possible. Une nouvelle lentille est réalisée puis soumise au tests. De la diffusion persiste, mais elle est provoquée par les petites poussières collées sur le verre. Pour éliminer de façon efficace l'adhérence des poussières, Lyot imagine de déposer à la surface de la lentille une couche de graisse d'épaisseur moléculaire. Il nettoie et dégraisse parfaitement la surface, puis imbibe légèrement un coton de la graisse de l'aile son nez. Il frotte ensuite le coton sur la lentille, ce qui dépose un film graisseux extraordinairement mince, et efficace.



Lyot observant Mercure à côté du Soleil en réduisant la diffusion par des caches devant la lunette de 175 mm.



Étude d'une lentille de coronographe par Bernard Lyot. Cette lentille est bien polie mais présente des défauts de matière et des poussières sur sa surface.

Après ce traitement, la lentille est parfaitement polie et propre mais Bernard Lyot constate encore deux gros défauts; une tache centrale brillante et un rebord lumineux. Le premier est provoqué par les reflets de la lumière sur les faces de la lentille et le second est une conséquence de la diffraction. Pour remédier à ces défauts, Lyot introduit dans le montage une lentille de champ, et une pastille centrale qui occulte la lumière du centre. Un diaphragme occulte la lumière diffractée. « *Tout est simple, quand on a du génie!* » s'est écrié Louis de Broglie en voyant le montage.

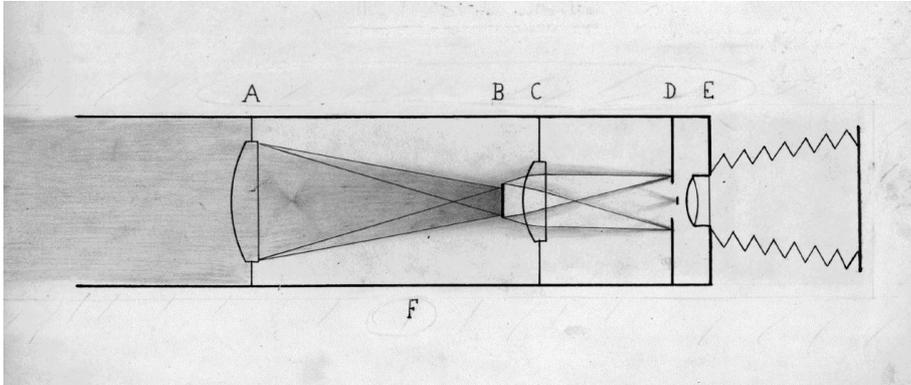


Schéma du coronographe.

En A, l'objectif constitué d'une lentille simple. B, disque occulteur qui est généralement un cône qui renvoie la lumière. C, lentille de champ. D, diaphragme. E, lentille.

Premières observations de la couronne en dehors de l'éclipse

En 1930, Lyot monte au Pic du Midi pour y observer la polarisation de la planète Mercure à la lunette équatoriale. Il y glisse son polarimètre et un pare-soleil devant l'objectif. Il a, dans ses bagages, les pièces qu'il a mises au point pour monter son coronographe. Profitant d'une grande période de beau temps, il peut monter et régler son appareil. Le 27 juillet, figure sur son carnet de notes en plus des mesures de polarisation de Mercure un dessin de protubérances solaires réalisé avec son premier coronographe, et pour la première fois au monde, sans spectrographe.

Le 29 juillet, il relie son polarimètre au coronographe et explore la répartition de la polarisation de la lumière autour du Soleil. Une polarisation est provoquée par des jets coronaux qu'il peut suivre au jour le jour. Lyot peut ainsi explorer la couronne grâce son appareil.

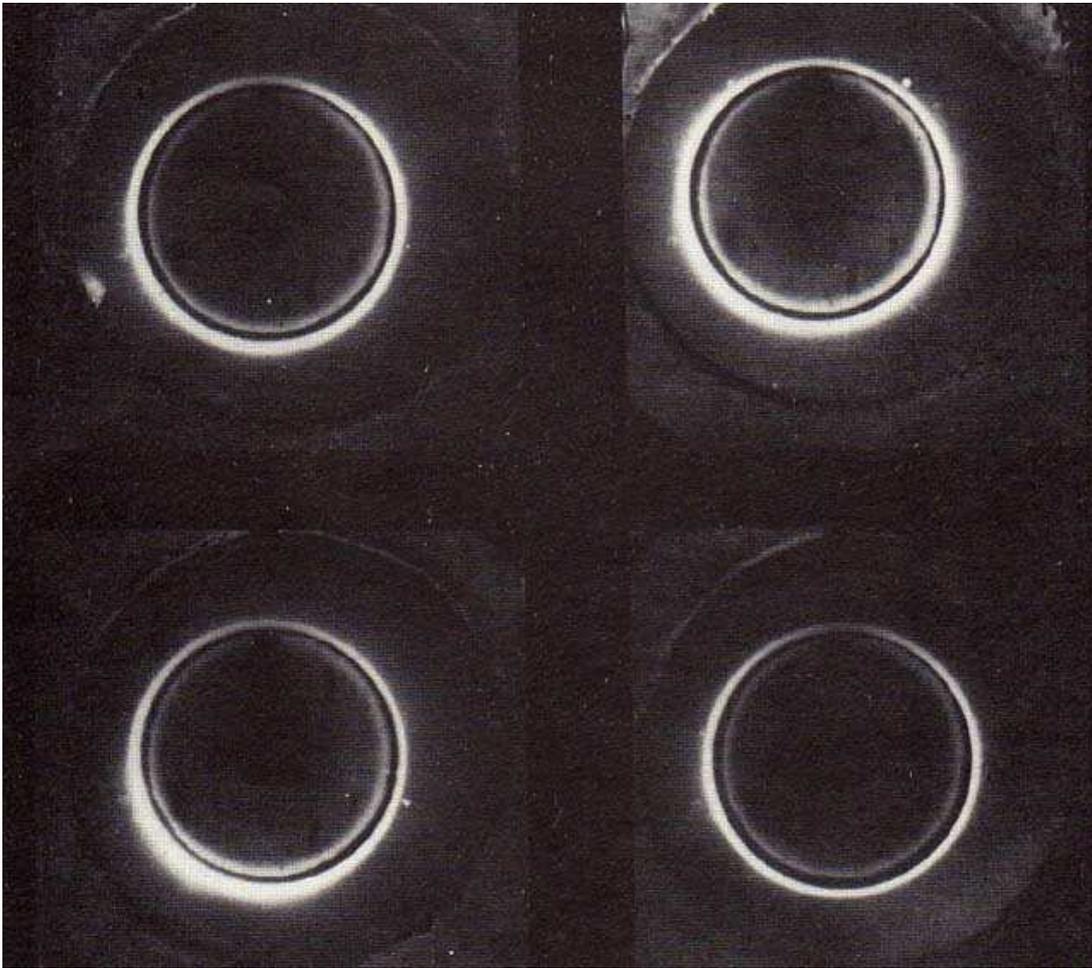
Il détecte ensuite les raies spectrales à 5303 Å et 6374 Å en plaçant un spectroscopie à la sortie du coronographe. En novembre de la même année, Ernest Esclangon présente à l'Académie des sciences une communication de Lyot intitulée : "L'observation de la couronne solaire en dehors des éclipses."

La photographie de la couronne

A cette époque, les connaissances sur la couronne solaire sont extrêmement réduites, tout reste à faire. Après le premier coronographe improvisé de 1930, Lyot construit un second appareil plus élaboré comprenant un objectif de 17 cm et un tube en lattes de parquet. Ce montage très expéditif contraste avec le soin apporté à la réalisation de l'optique et les réglages inhérents.

L'instrument est coudé pour permettre le renvoi de la lumière coronale vers un spectrographe. Un porte-châssis mobile permet un balayage de l'image de la couronne solaire. Tout est réalisé en planches de bois, cornières, rondelles ou pièces de monnaies percées et autres astuces mécaniques qui donnent à l'ensemble l'aspect d'un génial bricolage.

Armé de cet appareil, il peut durant l'été 1931 réaliser ses premières photographies des jets de la couronne solaire. Pour discriminer parfaitement les jet des défauts instrumentaux, il fait tourner le coronographe entre chaque prise de vue. Les clichés sont ensuite composites, c'est-à-dire qu'il les additionne sous l'agrandisseur pour renforcer le contraste de la couronne. Les défauts instrumentaux, eux, sont étalés et dilués.



**Première
photographie directe
de la couronne
solaire le 21 juillet
1931.**

Reproduction d'une partie de la plaque originelle; quatre images sont obtenues successivement, après rotation de l'ensemble du coronographe de 40° autour de son axe entre chaque pose. Ces images seront ensuite tournées en sens inverse et additionnées, ce qui restituera la couronne mais étalera les défauts.
Source Observatoire de Paris.

L'étape suivante consiste à photographier la couronne en lumière monochromatique. Lyot tente tout d'abord d'examiner le profil spectral des rais coronales et fait une étrange découverte. La raie d'émission coronale est plus large que la raie d'absorption solaire. Cette stupéfiante constatation l'amène à penser que la température est responsable de cette élargissement. Il calcule une température de la couronne qui avoisine le million de degré, ce qui semble invraisemblable à l'époque. Si nous savons aujourd'hui que Lyot avait entièrement raison, nous sommes toujours incapables d'expliquer en totalité les mécanismes de chauffage de la couronne solaire. Lyot réalise ensuite un spectrohéliogramme de la couronne dans la raie à 5303\AA qui montre la répartition de l'émission monochromatique de la couronne autour du Soleil.

**Bernard Lyot à l'observatoire
Vallot sous le Mont-Blanc à
4350 m d'altitude le premier
août 1934.**

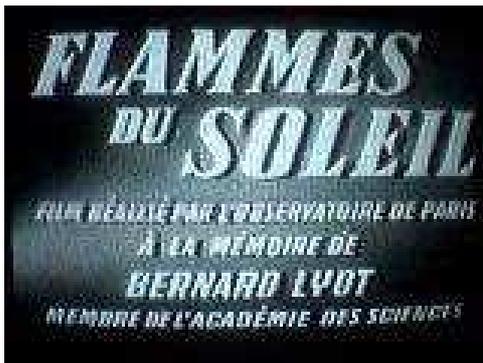
Instruments pour mesurer la diffusion de la lumière autour du disque solaire.
Document Observatoire de Paris.

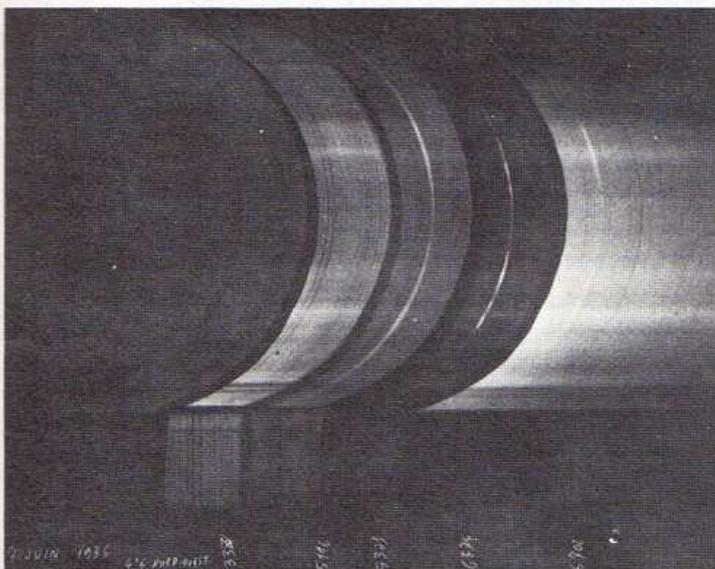
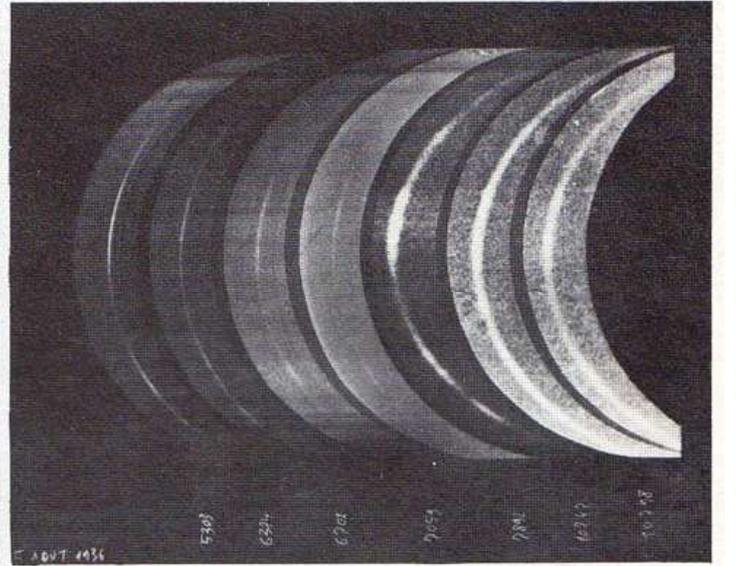
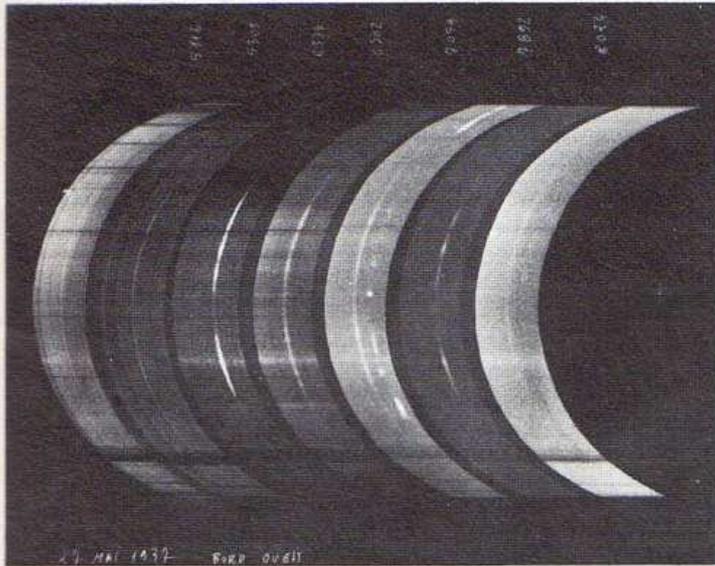
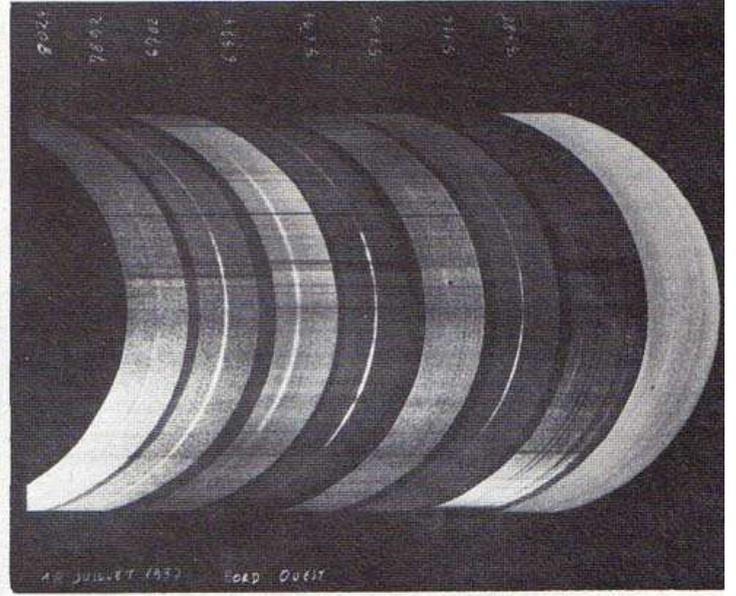
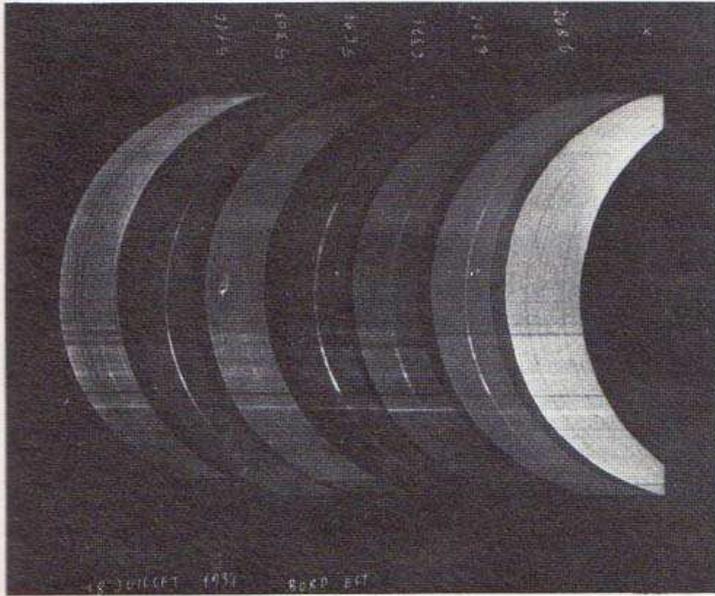


Après 1931, une baisse de l'activité solaire permet à Bernard Lyot de préparer la prochaine génération du coronographe. Il laisse l'observation solaire pour se consacrer aux problèmes instrumentaux. Le 21 novembre 1932 il publie une Note à l'Académie de Sciences : « Un monochromateur à grand champ utilisant les interférences en lumière polarisée », c'est le filtre polarisant décrit précédemment. Lyot désire connaître la variation de la diffusion de la lumière par l'atmosphère en fonction de l'altitude. Pour cela il se rend à l'observatoire Vallot près du sommet du Mont-Blanc. Quelques semaines plus tard, c'est au Jungfraujoch, à 3600 m d'altitude, qu'il monte pour observer les premiers jets coronaux du nouveau cycle solaire avec un petit coronographe.

Au début de l'année 1935 le nouveau grand coronographe du Pic est achevé. Il est installé au début du mois juin 1936 pour observer l'éclipse qui a lieu le 19 du même mois. Lyot adjoint au coronographe un spectrographe à fente annulaire ce qui lui permet d'enregistrer les émissions de la raie rouge à 6374 Å, puis de la raie verte à 5303 Å. Il constate que les régions d'émission ne coïncident pas; nouvelle énigme à résoudre!

Il adapte à son coronographe une chambre photographique de grand format et réalise des séries d'images destinées à constituer un film en accéléré. Pour cela, il observe régulièrement jusqu'à douze heures d'affilées. Il parvient ainsi à filmer l'évolution des jets coronaux. Ces images en lumière blanches demandent beaucoup de soin et d'adresse que seul un artiste de la science comme Bernard Lyot est alors en mesure d'apporter. Les films révèlent également les mouvements des protubérances qui seront mis en scène dans le très célèbre « Flammes du Soleil » qui regroupe les plus belles séquences. Les observations de Lyot ne peuvent être expliquées en cette première moitié du vingtième siècle car des éléments théoriques manquaient encore. Ce n'est qu'avec le développement des principes de la magnétohydrodynamique que les chercheurs parviennent aujourd'hui à percer quelques secrets de la couronne solaire.





— Les séries de raies d'émissions de la couronne obtenues par Bernard Lyot en 1936 et 1937.

- En haut, huit raies obtenues simultanément, aux bords Est et Ouest le 18 juillet 1937.
- Au centre à gauche, sept raies obtenues le 27 mai 1937.
- Au centre à droite, sept raies y compris les deux raies infrarouges du FeXIII, le 5 août 1936.
- En bas, cinq raies y compris la raie ultraviolette à 3 388 Å, le 27 juin 1936.

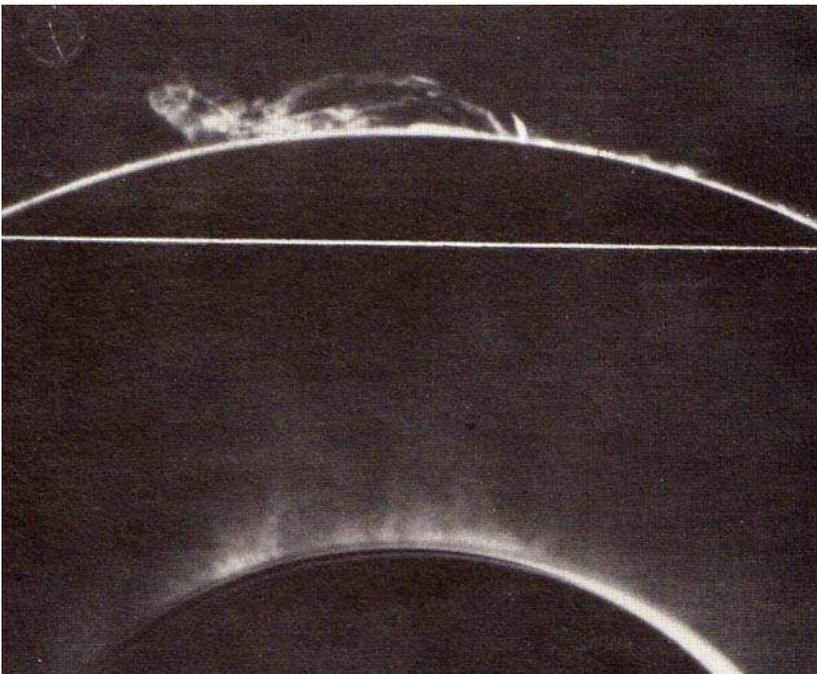
(Assemblage inédit d'Audouin Dollfus.)

(Document Audouin Dollfus)

Lyot continue l'étude des raies d'émission de la couronne avec son appareil. On connaissait certaines raies qui sont visibles pendant les éclipses totales, mais celles-ci sont trop brèves. Avec le coronographe, les poses peuvent durer jusqu'à une heure. Il confirme l'élargissement de toutes les raies coronales puis explore de nouveaux domaines spectraux dans l'ultra-violet et l'infrarouge. Il découvre ainsi quatre nouvelles raies dont deux dans l'infrarouge du fer très ionisé près de celle de l'hélium (1083 nm) protubérantiel. La formation de ces raies pose de nouveaux problèmes de physique qui seront solutionnés par un scientifique suédois, B. Edlèn. La haute température de la couronne produit des atomes fortement ionisés et la raréfaction du milieu entraîne des modifications des conditions d'émission. Il en résulte l'apparition de raies dites « interdites » car impossibles à créer dans les conditions habituelles des laboratoires. Les calculs théoriques donnent les positions observées. C'est une grande avancée pour la compréhension du milieu coronal. Lyot cherche à photographier le plus de raies possible durant la même séance de travail, ce qui l'oblige à permuter les optiques et les pièces mécaniques. Il parvient à traiter huit raies en une seule journée.

Le filtre polarisant

Dès 1939, Lyot dispose au foyer du coronographe le « filtre polarisant » dont nous avons exposé le principe. Ayant exploré de nombreuses raies coronales, il désire alors réaliser des images monochromatiques, en isolant ces raies avec un filtre monochromatique à bande passante étroite. Il réalise le filtre en alignant les lames biréfringentes convenablement accordées qu'il associe à de grands prismes de spath. L'ensemble est encastré dans un carénage que contient un cylindre calorifugé. Le filtre est réglé sur la raie d'émission verte à 5303 Å et celle à 6374 Å dans le rouge, ainsi que sur la raie H α des protubérances.



Premières photographies monochromatiques de la couronne solaire obtenue avec le filtre polarisant par Bernard Lyot le 10 août 1939 en haut dans la raie H α , en bas dans la raie verte du FeXIV.

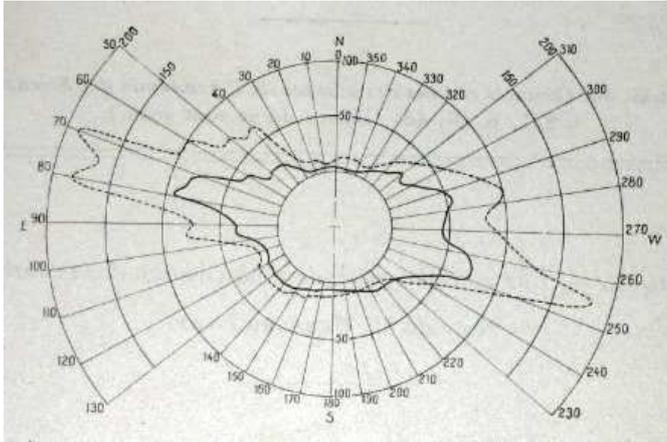
(Fer treize fois ionisé, ce qui n'est possible que par la très haute température de la couronne solaire.)

Lyot commence alors l'imagerie dans les trois longueurs d'onde en mettant en évidence les émissions coronales ainsi que les formes et les évolutions des protubérances. Il constate des différences entre l'émission rouge et verte et la finesse des structures monochromatiques par rapport à la couronne blanche. Les observations des protubérances en H α conduiront par la suite Lyot à imaginer l'héliographe monochromateur qui sera réalisé en plusieurs exemplaires.

Il constate également une différence de morphologie de la couronne selon le cycle solaire. Il incite alors Jules Baillaud qui dirige le Pic du Midi à organiser une surveillance systématique de l'activité coronale par la photométrie. Rapidement, cette activité systématique s'est mise en place et l'on sait aujourd'hui l'importance que revêt cette observation pour ce qui est devenu la météo de l'espace. Elle se poursuit au vingt et unième siècle avec l'instrument CLIMSO géré par les amateurs du groupe « les observateurs associés ».

Le coronomètre de Lyot

Le coronomètre photoélectrique de Lyot est un instrument qui permet d'observer les émissions monochromatiques de la couronne solaire avec une lunette ordinaire. Au foyer de l'instrument, une rondelle métallique masque le disque solaire. Un petit orifice mobile autour du centre du disque explore la couronne à une minute de degré autour du bord solaire. Un prisme à deux réflexions ramène sur l'axe la lumière qui a traversé l'orifice puis celle-ci traverse un filtre monochromatique polarisant qui en isole une bande spectrale de 2\AA autour de la raie coronale verte à 5303\AA . Le filtre est suivi d'un polarimètre photoélectrique de Lyot qui module la bande spectrale pour transmettre alternativement et rapidement la raie coronale et deux bandes symétriques de part et d'autre de celle-ci. Le signal photoélectrique est proportionnel à l'intensité de la raie.



La couronne monochromatique autour du disque solaire le 6 mai 1950. En trait plein: à Meudon avec le coronomètre. En trait interrompu: au pic du Midi avec le coronographe.

Le coronomètre est conçu par Lyot en 1949 puis placé au foyer de la lunette de 16 cm qui est parallèle au télescope de un mètre de Meudon. La première détection de la couronne est réussie le 28 février 1950. Elle est mesurée dans la raie rouge à 6374\AA du FeX de 5° en 5° à $1'$ autour du bord solaire. Après la mort de Lyot, le principe du coronomètre est repris à Meudon par son service. Audouin Dollfus étudie un filtre spécial qui est réalisé par les établissement OPL. Une première version de l'appareil est conçue par Henri Grenat. En 1961 Pierre Charvin réalise une version plus définitive de l'appareil qu'il installe sous une cabane mobile dans le parc de l'observatoire de Meudon. A partir de juin 1962, les observations de la couronne dans la raie rouge commencent. Le coronomètre est complété en 1964 pour permettre des mesures de polarisation des radiations coronales. P. Charvin décide ensuite d'installer un nouvel appareil au pic du Midi, dans la coupole qui porte aujourd'hui son nom. Cet instrument, en service à partir de 1970 sera amélioré par la suite par Jean Arnaud.



Lyot observant la couronne à Meudon en 1950.



Le coronomètre de Charvin en 1962.

Les hommes de Meudon

Nous voici arrivés au terme de la partie historique de notre étude. Avant de clore ce chapitre, nous allons dire quelques mots sur les personnalités de Meudon. En plus de grands scientifiques, ces astronomes étaient des hommes avec leurs qualités et leurs petits travers. Janssen est réputé pour son caractère difficile et ses colères. Pendant les ascensions au Mont Blanc il insultait parfois ses porteurs. On attribue à Janssen la collection de clichés solaires, mais en réalité c'est son assistant, Pasteur, qui prenait tous les clichés. Louis Pasteur, dont on ignore le véritable patronyme, était d'origine Suisse. Il avait eu une vie assez mouvementée et Meudon a été pour lui un havre de paix. S'il était très bon technicien, ses compétences se limitaient à la prise de vue. De nombreux clichés étaient rognés sur les bords par un mauvais centrage ce qui ne l'inquiétait aucunement. Pasteur étant tout aussi colérique que son patron, les affrontements, parfois violents, ne manquèrent pas.

La distraction de Deslandres est légendaire. Plusieurs anecdotes circulent à son sujet. Si elles ne sont pas forcément authentiques, elles n'en manquent pas moins de piquant. Deslandres qui travaillait dans le laboratoire de Cornu devait se fiancer avec Mademoiselle Cornu. Le jour du dîner de fiançailles de Deslandres, celui-ci, absorbé à des travaux de laboratoire, oublia de se rendre au dîner. Les fiançailles furent évidemment rompues. Une autre fois, il était invité à un mariage. Il arriva au préalable en habit à l'observatoire pour vérifier des clichés de spectres pris la veille. Il ôta son manteau et enfila un vieux vêtement pour se protéger des acides. En repartant, au lieu de remettre son élégant manteau, il enfila un vieux veston rongé par les produits chimiques et se rendit ainsi vêtu à la cérémonie.

D'Azambuja a rapporté l'anecdote suivante: M. Deslandres un jour, dînant avec sa femme, apparaît préoccupé, et madame l'interroge:

- « *Qu'avez-vous donc, mon ami, qui vous préoccupe?*
- *Eh bien, tout à l'heure, en descendant l'avenue du Château, une dame m'a souri, mais figurez-vous que je n'arrive pas à mettre un nom sur son visage !*
- *Ne cherchez pas plus longtemps, mon ami, c'était moi ».*

D'Azambuja, que tout le monde appelait d'Azam, était réputé pour la précision de ses travaux mais aussi pour la rigueur qu'il imposait à son service. Il était très exigeant sur la qualité du travail et extrêmement économe. Il craignait tellement le gaspillage que les locaux étaient à peine chauffés et les produits divers achetés avec parcimonie. L'esprit donné au service solaire par d'Azambuja a fortement marqué les générations successives d'observateurs.

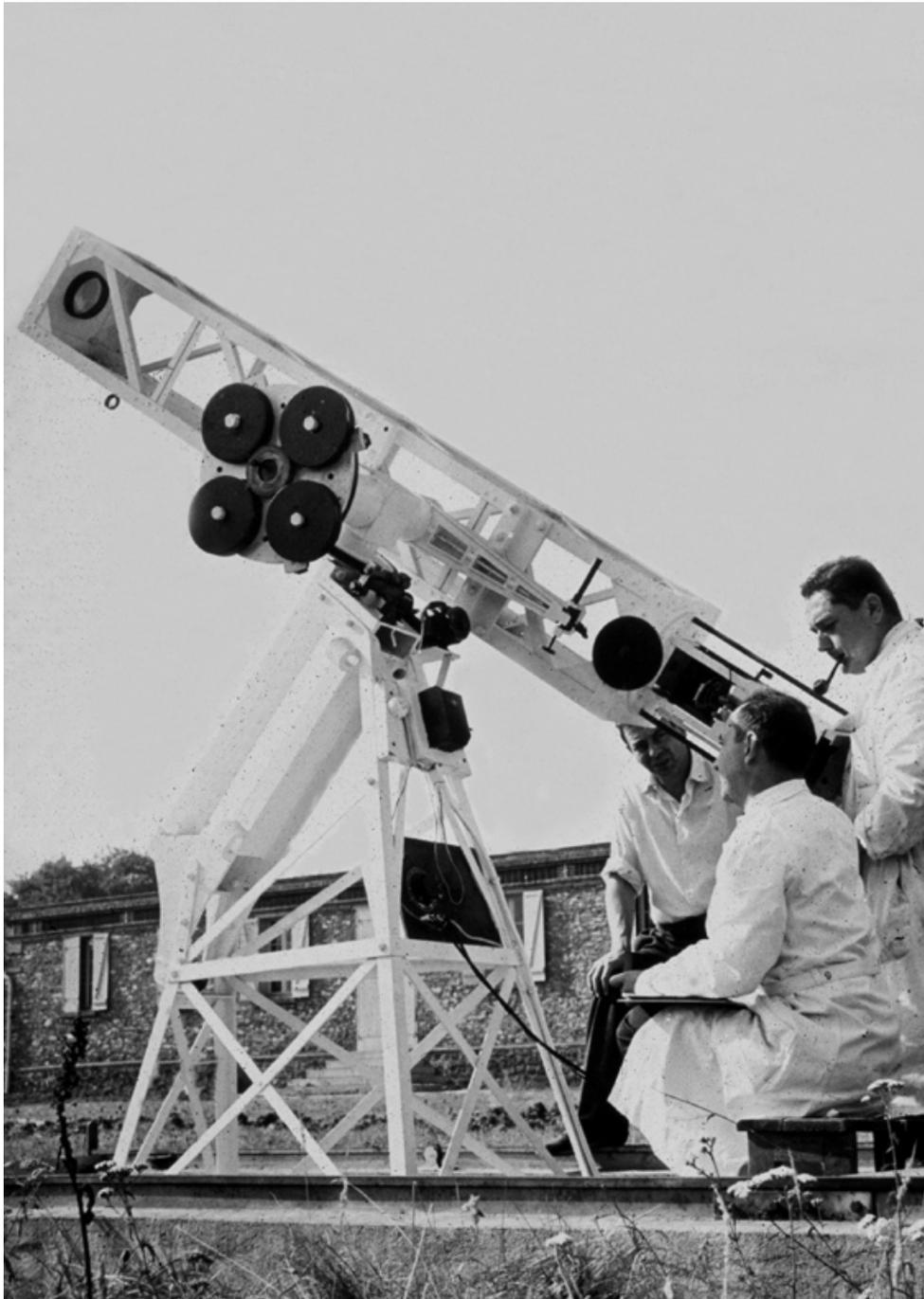
Aux antipodes de d'Azambuja, nous trouvons Henri Grenat. Ce polytechnicien n'avait aucune ambition personnelle. Il aimait rendre d'innombrables services à ses collègues mais ne nourrissait pour lui-même aucune aspiration à la notoriété. Il possédait un grand sens de l'humour et ne faisait par conséquent d'ombre à personne à la grande satisfaction de tous ses confrères. Cela ne l'empêchait pas d'être un brillant théoricien qui avait prédit, par le calcul, la température de la couronne solaire, ce qui passa complètement inaperçu.

Bernard Lyot a laissé un grand vide dans l'observatoire après sa mort. Il était réellement apprécié de tous pour sa gentillesse et sa bonne humeur. Il possédait en plus d'un véritable génie inventif une habileté manuelle qui lui a permis de concrétiser toutes ses idées. Ce qui était possible à cette époque le serait difficilement aujourd'hui. On imagine mal un astronome isolé qui s'enferme dans son laboratoire pour monter un instrument à base de lattes de parquet, de pièces de Meccano et de divers éléments de récupération. Il faut aujourd'hui soumettre des projets et demander plusieurs mois à l'avance un travail de mécanique. Lyot possédait une grande collection de vieilles lentilles, verres de besicles et autres morceaux de glace. Ses « petits trésors » sont gardés dans la collection de l'observatoire de Meudon. Seuls de rares initiés en connaissent la valeur!

Lyot était également un grand distrait, voici une anecdote racontée par Audouin Dollfus: « *Un soir que Lyot rentrait chez lui, il trouva une assemblée de sommités qui l'attendait pour dîner. Son épouse lui dit : As-tu oublié que nous avons des invités? Lyot de répondre : Pardonne-moi, je vais me changer et je viens dîner tout de suite. Bernard Lyot va se changer et tout naturellement enfila son pyjama et se met au lit !* »

Deuxième partie

Période moderne, évolution des techniques



Instrument solaire sur la pelouse de Meudon
R. Servajean, R. Michard, G. Olivieri.

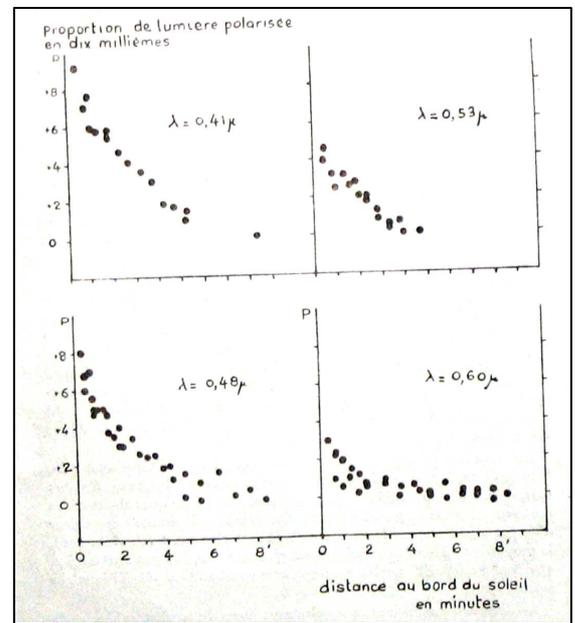
Nous arrivons maintenant à une nouvelle période, l'ère moderne. Nous la faisons arbitrairement commencer après la mort de Lyot. Jusque là, l'astronomie solaire était pratiquée à Meudon dans le but de décrypter les mécanismes de l'atmosphère du Soleil. Janssen, avec ses photographies journalières de la photosphère, a parfaitement montré la rotation du Soleil et l'évolution des taches. Le spectrohéliographe de Deslandres nous montre la chromosphère avec les plages faculaires, les filaments et les protubérances. D'Azambuja a su décrire à la perfection les mouvements de toutes ces structures. Bernard Lyot, en inventant le coronographe et le filtre polarisant nous a donné les outils pour étudier la couronne et suivre l'activité solaire régulièrement. Mais nous sommes encore loin de comprendre ce qui se passe réellement dans notre étoile. On sent bien que les phénomènes sont liés au magnétisme mais sans connaître encore les bonnes théories fondamentales, la physique solaire reste à ses balbutiements. A partir des années cinquante, les choses vont évoluer très rapidement. La spectroscopie prend peu à peu le pas sur la simple imagerie. Meudon se voit doté des plus grands spectrographes pour étudier les champs magnétiques dans les régions actives. On va développer un réseau de surveillance des éruptions solaires grâce aux héliographes. Les observations se feront tantôt à Meudon, tantôt au Pic du Midi, quand ce ne seront pas à partir d'un ballon. Le Pic du Midi est alors indissociable de Meudon et nous en décrivons les installations. A partir des années soixante, c'est l'emballement, les moyens ne manquent pas et la physique solaire va connaître son âge d'or. La tour solaire permet de mesurer les vitesses des fines structures de la chromosphère alors que le magnétographe du Grand sidérostatis mesure les champs magnétiques. Les théoriciens ne manquent pas d'observations pour développer la magnétohydrodynamique qui va permettre enfin de mieux comprendre ces étranges phénomènes dont certains interagissent avec l'environnement terrestre. On essaie de prévoir les éruptions pour protéger nos satellites et les astronautes dans l'espace. Les bons résultats des instruments en œuvre permettent de faire des projets d'avenir. C'est ainsi que le fleuron des télescopes solaires, THEMIS est étudié sur une table à dessin dans le bâtiment Soleil-Terre de Meudon avant d'être érigé sur l'île de Ténérife aux Canaries.

Il serait incorrect de ne pas évoquer les développements de la radioastronomie et de l'astronomie spatiale qui ont permis de si grands progrès dans la connaissance du Soleil. Mais nous bornerons cette étude aux observations optiques. Les lecteurs trouveront de plus amples informations sur ces domaines en consultant le site du pôle solaire du LESIA, <http://www.lesia.obspm.fr/solaire/index.html>.

Nous allons nous intéresser à quelques thématiques qui ont amené d'importants développements instrumentaux.

Le polarimètre photoélectrique solaire

En 1954, Audouin Dollfus a mis au point un polarimètre photoélectrique de très grande précision pour l'analyse du Soleil. La lumière à analyser rencontre d'abord des compensateurs de polarisation qui permettent de faire les mesures par méthode de zéro. Elle traverse ensuite un modulateur composé d'un disque tournant comprenant des lames biréfringentes pour faire varier périodiquement de 90° la direction de polarisation de la lumière. Le faisceau est ensuite séparé par un prisme biréfringent et envoyé sur deux cellules photoélectriques montées en opposition. La lumière naturelle traverse sans modification le modulateur et ne donne aucun signal électrique au point milieu des deux cellules alors que la lumière polarisée crée un courant alternatif qui est amplifié et redressé avant d'être mesuré. L'instrument permet de déceler sur la surface solaire un taux de polarisation de un cent millièmes.



Proportion de lumière polarisée de la photosphère solaire vers le limbe en 1960.

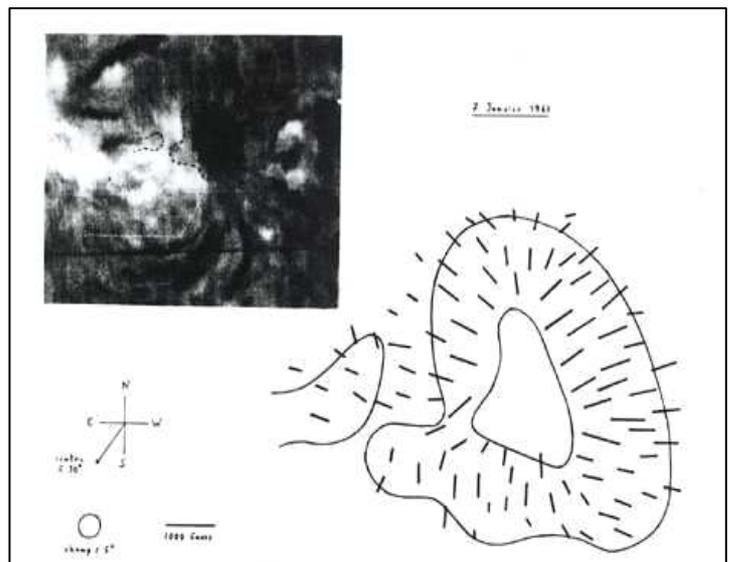
Le champ magnétique transversal

Les champs magnétiques du Soleil affectent certaines raies par l'effet Zeeman ce qui permet d'en mesurer la composante longitudinale. La composante transversale peut être mesurée par la polarisation de la lumière dans certains domaines spectraux. De telles mesures ont été effectuées au niveau de la photosphère à l'aide du polarimètre. Elles ont constitué la thèse de Jean-Louis Leroy.

Audouin Dollfus a mis au point une lunette solaire polarimétrique qui fut montée sur la table équatoriale de Meudon avant d'être installée sur une petite monture indépendante abritée par une cabane roulante. Cette monture porte le nom de « Pied de Caroline » car elle avait servi à Janssen au cours d'une mission sur l'île Caroline dans le Pacifique. A Meudon, on observait les champs magnétiques dans les centres actifs et la polarisation au bord du disque solaire. L'instrument a également permis de mesurer le diamètre de la planète Mercure par polarimétrie lors de son passage devant le disque solaire.



La lunette solaire polarimétrique dans le parc de Meudon vers 1960.



Champ magnétique transversal dans une tache solaire mesuré le 7 janvier 1961 par Jean-Louis Leroy.

Le polarimètre coronal

« La couronne solaire, à cause de sa température très élevée et de la raréfaction du milieu, acquiert des propriétés très spéciales. Le milieu est conducteur et il est aussi magnétique. Il y a action des champs magnétiques, avec apparition de forces et de mouvements. Les forces magnétiques dominent et la matière coronale obéit. Des concentrations de matière se forment, avec des panaches et des jets.../... »

Nous voyons la couronne lumineuse autour du Soleil, pendant les éclipses, parce que le milieu diffuse la lumière solaire. Cette lumière diffusée est en partie polarisée. Le polarimètre photoélectrique, en décelant cette polarisation de la lumière coronale, permet de révéler la couronne sans éclipse... »

Extrait du livre « 50 ans d'Astronomie » par A. Dollfus.

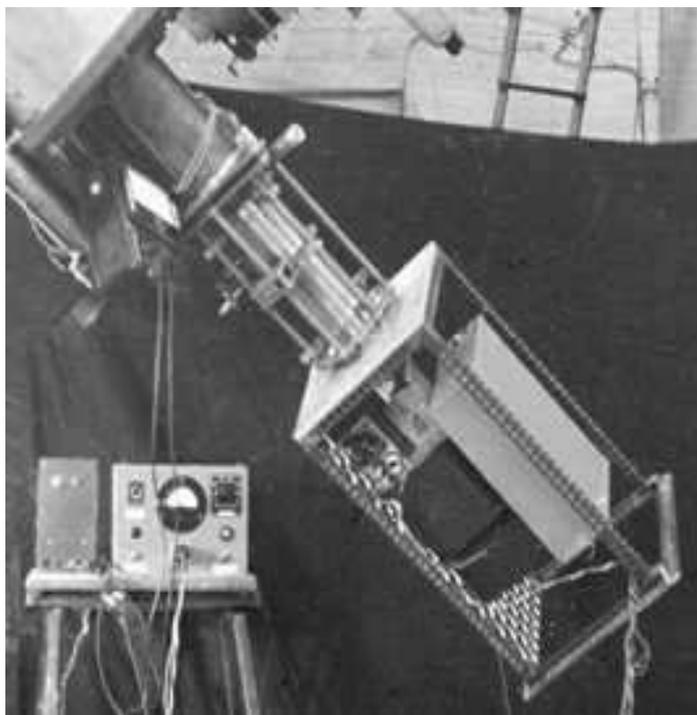
Le polarimètre conçu et réalisé à Meudon a été adapté pour être installé sur le coronographe du pic du Midi par Audouin Dollfus en 1956. Le polarimètre coronal ainsi constitué permettait de déceler sans éclipse la couronne de plasma et sa structure en jet tout autour du disque du Soleil jusqu'à une distance beaucoup plus grande que ne le permettait le coronographe classique. Il a ainsi montré la couronne jusqu'à deux rayons solaire au delà du limbe. Les premières images de la couronne ont été obtenues le 29 septembre 1956 et la cartographie complète a été effectuée en 1958.

L'instrument comportait trois parties distinctes:

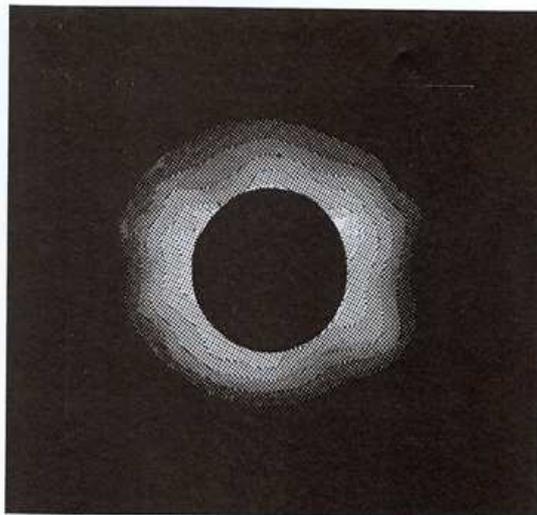
Le tronçon avant portant un diaphragme pupillaire.

Un tronçon médian avec un oculaire de guidage et la commande de rotation.

Un boîtier arrière avec un dispositif de balayage focal en spirale, un modulateur de polarisation, un détecteur et un amplificateur.



Le polarimètre coronal en 1956.

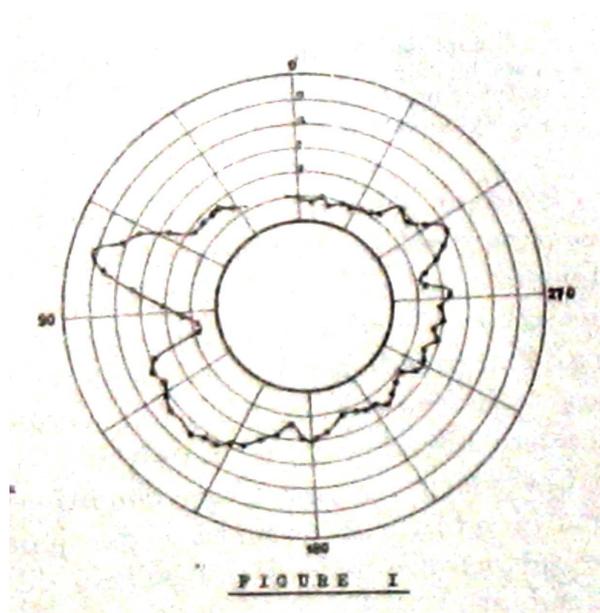


LA COURONNE SOLAIRE le 17 mai 1958
réconstituée point par point
par balayage polarimétrique.
Coronographe du Pic du Midi
et polarimètre photoélectrique.

**La couronne solaire le 17 mai 1958
reconstituée point par point par
balayage polarimétrique obtenu au
coronographe du pic du Midi avec
le polarimètre photoélectrique.**

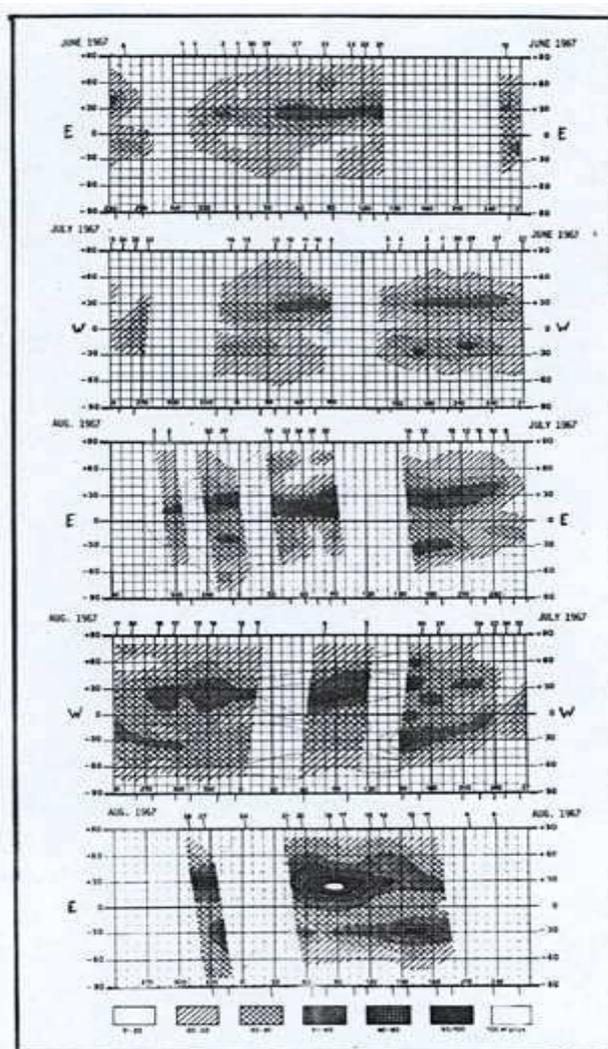
La lunette solaire polarimétrique

La sensibilité du polarimètre permettait de détecter la couronne solaire de plasma, par sa polarisation, directement depuis l'observatoire de Meudon. En 1959, une carte synoptique de la basse couronne a été établie depuis Meudon.



Première observation de la couronne de plasma à Meudon le 19 août 1959 par Audouin Dollfus.

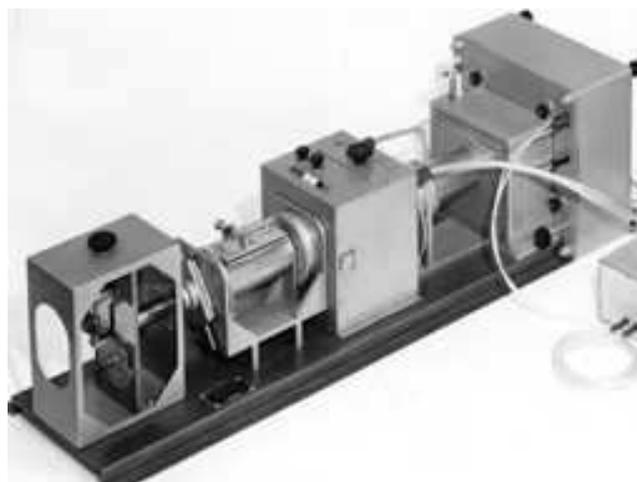
Cartes synoptiques successives de la couronne de plasma de juin à août 1967



Pour suivre régulièrement la couronne de plasma en fonction de l'activité solaire, le polarimètre mis au point par A. Dollfus en 1954 a été fabriqué en petite série par les établissements R. Danger dans le cadre de l'Année Internationale du Soleil Calme. Le polarimètre se montait sur une lunette coronale polarimétrique aussi construite par la même société. Au pic du Midi, entre 1964 et 1975, elle a permis un suivi de l'activité de la couronne de plasma pendant un cycle solaire complet sous la direction de A. Dollfus puis de Jean-Louis Leroy. On y cartographiait la densité électronique dans la basse couronne et étudiait les jets coronaux.

Polarimètre construit par les établissements R. Danger sur le modèle de Dollfus.

Ce polarimètre était destiné à équiper les observatoires du pic du Midi, Meudon, Nice, Zurich et Uccle.



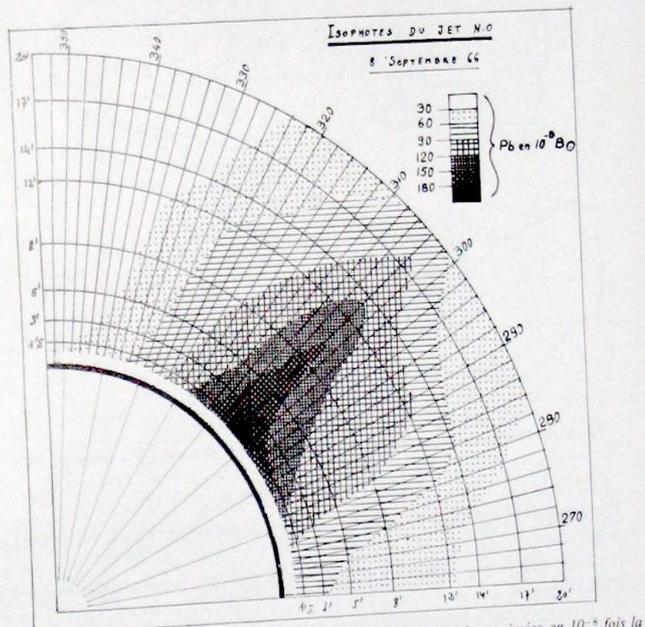
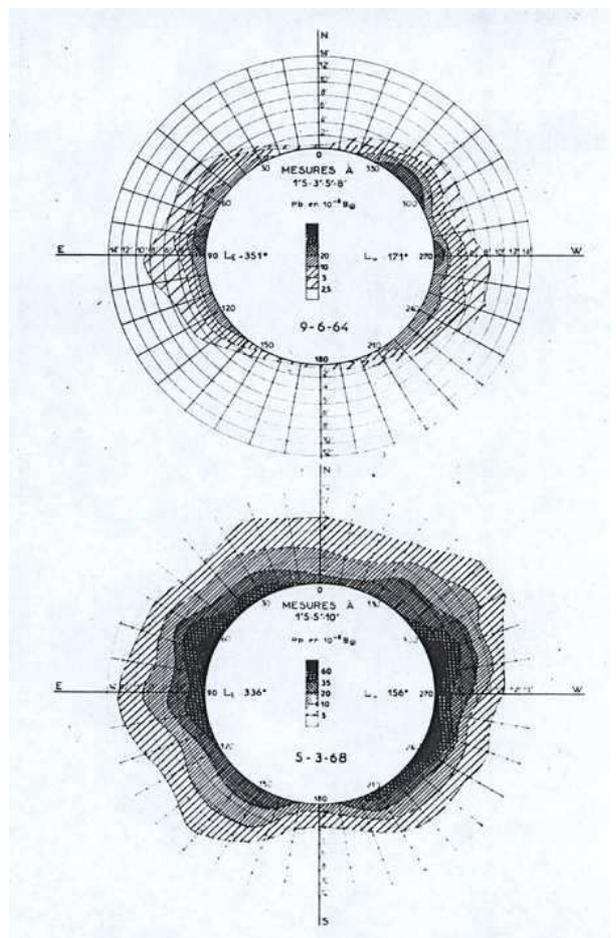
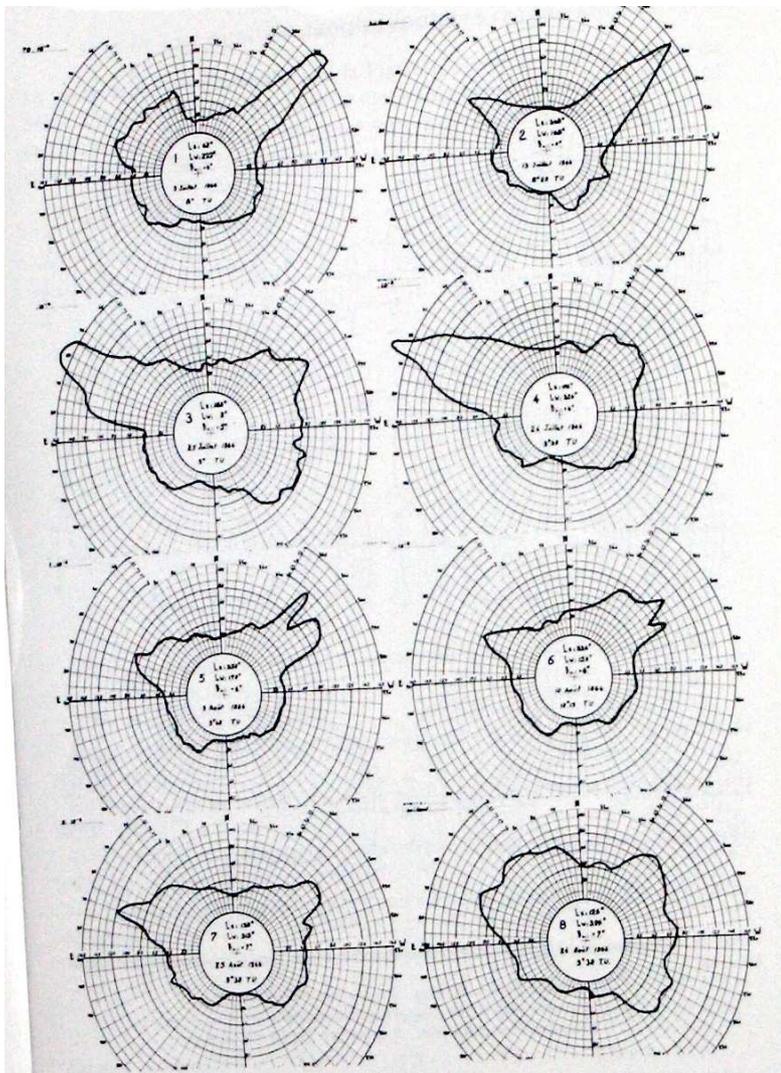


FIG. 18. Isophotes du jet au bord ouest le 8 septembre 1966 (intensités exprimées en 10^{-8} fois la luminosité du disque solaire).

Observation d'un jet exceptionnel le 8 septembre 1960. L'interprétation de ce phénomène était difficile à cette époque mais nous savons aujourd'hui qu'il s'agissait d'une éjection de masse coronale ou CME.



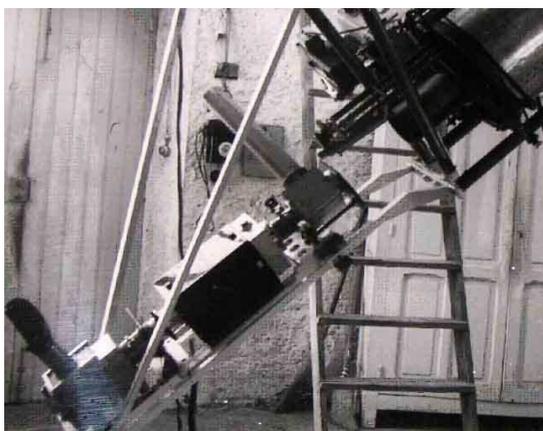
Observation de la couronne solaire autour du disque en 1964, pendant le minimum d'activité en haut et en bas pendant le maximum de 1968.



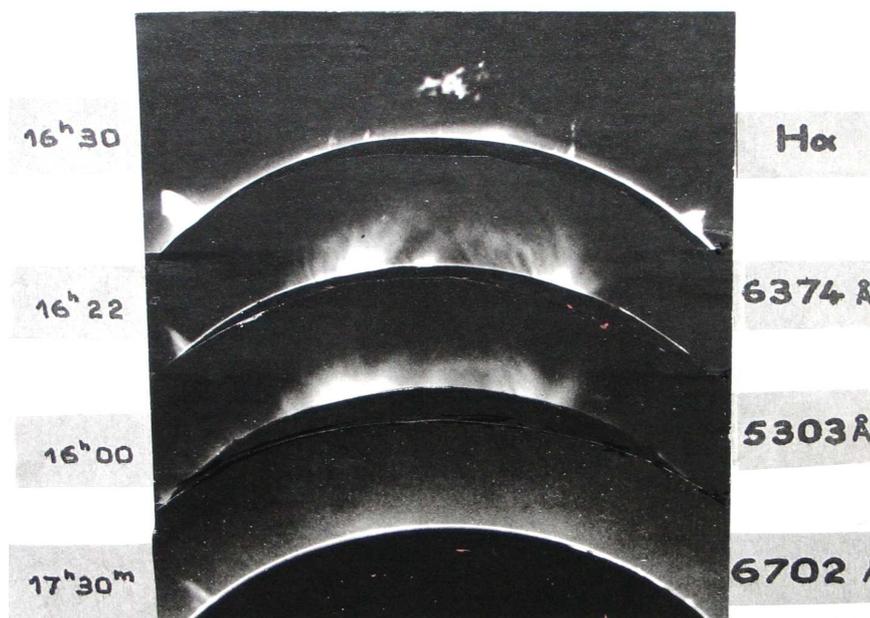
Évolution du jet coronal lié à l'évènement à protons du 7 juillet 1966. Images entre le 9 juillet et le 26 août 1966.

L'étude de la couronne monochromatique

Dans un précédent chapitre, nous avons abordé l'invention du coronographe et le développement du coronomètre qui permettait de détecter la couronne solaire dans une raie d'émission de celle-ci. Dès 1954, A. Dollfus a effectué des observations monochromatiques de la couronne dans le but d'étudier la morphologie de celle-ci par l'émission des atomes fortement ionisés. En 1954, il monte derrière le coronographe du pic du Midi un filtre polarisant particulier pour isoler les radiations à 530.3 nm et 637.4 nm. L'instrument a fourni de nombreuses images jusqu'en 1963. En 1959, il a été utilisé conjointement avec un autre filtre, auroral et coronal, pour fournir des images coronales en quatre radiations. Ces appareils ont donnés de nombreuses séries d'images et des séquences cinématographiques concernant la morphologie, l'évolution, la température et l'ionisation du milieu coronal en émission. Ces filtres permettaient l'étude des structures et des mouvements de la couronne solaire aux niveaux d'ionisation suivant: 233 ev (raie 637.4 nm du Fe X), 355 ev (raie 530.3 nm du Fe XIV), 422 ev (raie 670.2 nm du Ni XV) et 814 ev (raie 569.4 nm du Ca XV). Les clichés étaient ensuite calibrés photographiquement et mesurés photométriquement par un balayage circulaire autour du disque solaire.



Montage des filtres polarisants derrière le coronographe au pic du Midi en 1959.

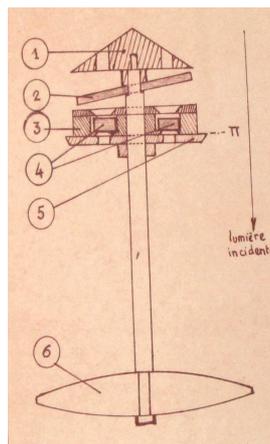


20 Juin 1960 Bord Ouest

Ce document montre la couronne solaire à différentes longueurs d'onde qui correspondent à des températures différentes. En H α , la température des protubérances n'est que d'environ 10000 K. A 637.4 nm, elle est de 2 millions de K, 2.5 millions de K dans la raie à 530.3 nm et 3.5 millions de K à 670.2 nm.



Les clichés de la couronne solaire monochromatique étaient mesurés photométriquement en effectuant des balayages circulaires autour du disque solaire pour mesurer la densité de 5° en 5°. Un disque étalonneur produisait sur la plaque des plages circulaires d'intensités croissantes connues.



Le disque étalonneur était fixé au centre de la lentille de champ du coronographe

La couronne solaire par ballon nacelle

Grâce à tous ces instruments, nous avons un aperçu des différentes composantes de la couronne solaire.

Le polarimètre coronal montrait la diffusion du rayonnement photosphérique sur les électrons de la couronne interne, dite couronne K avec une très grande sensibilité.

La lunette solaire polarimétrique permettait aussi de détecter cette diffusion, elle était moins sensible mais permettait un travail de routine.

Les observations monochromatiques permettaient quant à elles de mettre en évidence les émissions des atomes fortement ionisés.

Il fallait ensuite trouver un moyen d'observer les grands jets dans la couronne. Pour cela, il fallait des conditions impossibles à réunir sur Terre. Cette nouvelle expérience donna lieu à une coopération avec le CNES pour développer un instrument coronographique embarqué en ballon.

Pour observer la couronne externe du Soleil en dehors des éclipses totales, il faut utiliser un coronographe dans l'espace, hors atmosphère. Une telle expérience a été menée dans les années soixante en utilisant des ballons du Centre National d'Étude Spatial (CNES) sous la direction scientifique d'A. Dollfus.

Un disque occulteur était positionné à l'avant d'une lunette portée par une poutrelle métallique de plusieurs mètres. La périphérie du disque était munie d'un grand nombre de petites dents polies avec soin de sorte que la lumière diffractée par le bord du disque soit renvoyé latéralement. Une lunette équipée d'un coronographe était placée dans le cône d'ombre généré par le disque. Afin d'étaler parfaitement la lumière, les lentilles étaient continuellement en rotation sur leur axe grâce à un petit moteur électrique.

Le « coronographe à occultation externe » était emporté par une nacelle stabilisée baptisé « Astrolabe » réalisée par le CNES. Un dispositif de pointage automatique du Soleil rendait l'instrument autonome. La nacelle était emportée par un volumineux ballon en feuilles plastiques.

Le premier vol a eu lieu le 28 juin 1967 et la lunette est montée à l'altitude de 32000 mètres. Le retour sur Terre s'effectua en parachute. Les clichés ont montrés de grands jets coronaux jusqu'à deux millions de kilomètres du bord solaire.

Onze vols de durées croissantes ont permis l'analyse des grandes structures lumineuses. Deux séquences d'observation a duré jusqu'à 7 heures consécutives. On a ainsi pu mettre en évidence que le plasma coronal s'allonge en lames surmontées de grands panaches persistants qui se modifient lentement suivant les lignes du champ magnétique solaire.

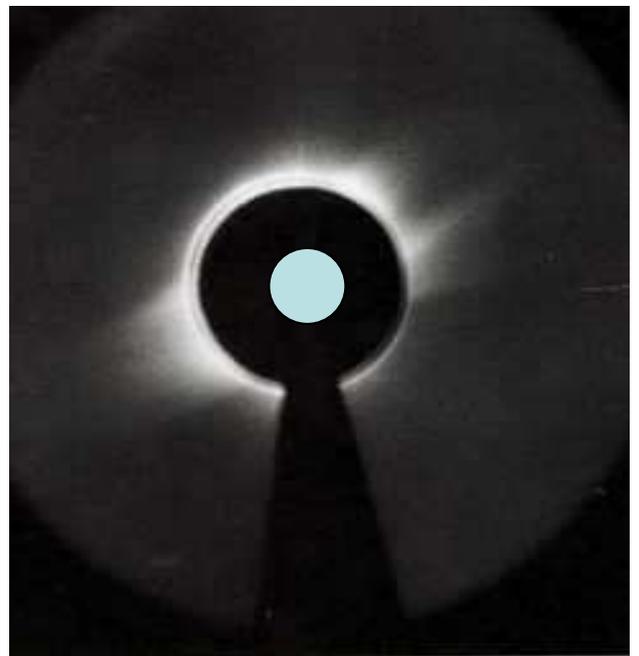
Le coronographe à occultation externe a été ensuite adopté dans de nombreux autres instruments solaires dans l'espace.

Le 31 juillet 1971, un grand halo lumineux contenant des jets a été photographié par un astronaute en orbite autour de la Lune. Ces élancements prolongeaient des structures coronales observées peu de temps avant par le ballon. Les jets s'élevaient à 20 fois le rayon solaire.

Ces observations ont permis la détermination de la température dans les jets, soit 1.6 millions de degrés.

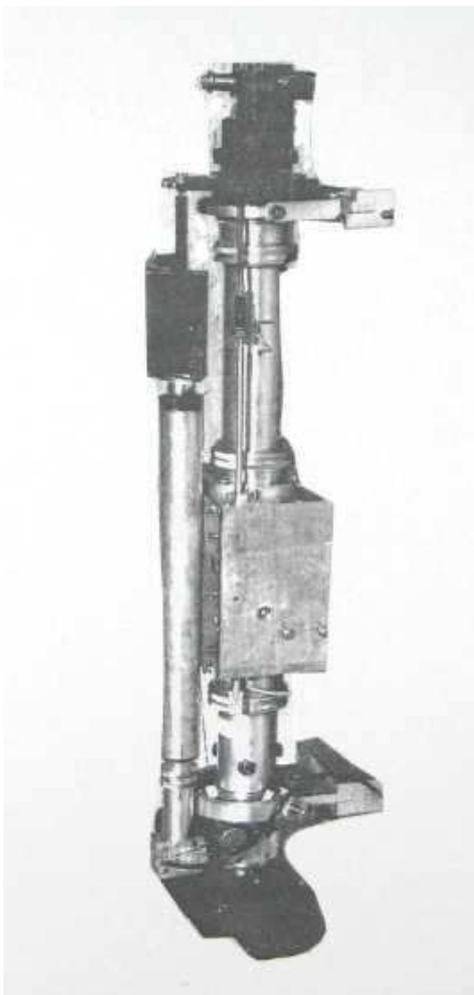


La nacelle avec en bas le coronographe à occultation externe.



COURONNE SOLAIRE LE 29 JUIN 1973
la veille de l'éclipse totale de Soleil
Photographies obtenues à 32 000 mètres d'altitude
par ballon stratosphérique
Laboratoire "Physique du Système Solaire" de
l'Observatoire de Paris - MEUDON
Cliché = A. DOLLFUS - F. COLSON

La couronne solaire le 29 juin 1973. Le disque bleu représente le diamètre apparent du soleil. Le disque occulteur est trois fois plus grand pour masquer les parties basses de la couronne.



Le coronographe.



Lâcher du coronographe à Aire sur Adour.

La granulation solaire

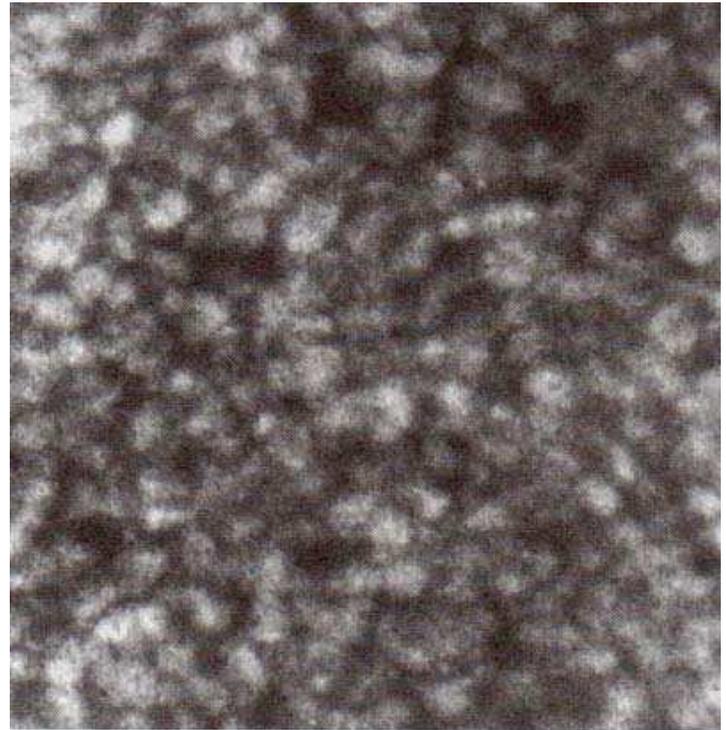
L'observation de la surface du Soleil révèle un aspect granulaire que Janssen avait réussi à photographier à l'aide de sa lunette. Ces granules apparaissent comme des petites cellules lumineuses qui mesurent entre une et deux secondes de degré chacune. En ce milieu du vingtième siècle, la nature de cette granulation est encore assez mystérieuse. Les clichés de Meudon pris par Jules Janssen et Louis Pasteur couvrent 41 ans et ont une résolution qui est à la limite de l'instrument utilisé, soit un peu moins d'une seconde d'arc. Ces images sont restées une référence pendant une soixantaine d'années. D'autres astronomes dans le Monde se sont essayés à l'imagerie de la photosphère, mais aucun n'a réussi à obtenir une meilleure résolution spatiale que Janssen. L'imagerie solaire est fortement contrainte par les phénomènes liés à la turbulence atmosphérique d'une part, et à la turbulence instrumentale d'autre part. La première est directement causée par l'échauffement du sol par les rayons du Soleil. Seules quelques rares périodes de l'année permettent d'obtenir des images fines. C'est le plus souvent au printemps, en fin de matinée que ces conditions sont requises lorsque la nuit a été douce. Une élévation rapide de la température, en été, provoque des cellules de convection au niveau du sol qui détruisent la qualité de l'image. De la même manière, l'hiver, par temps froid, la moindre source de chaleur provoque d'importants effets turbulents. La turbulence instrumentale est liée à l'échauffement des pièces du télescope par le flux solaire. Déjà en 1943, Lyot avait fait une première tentative pour améliorer la résolution des clichés de la granulation. Pour cela, il avait choisi le pic de Midi à 2870 m d'altitude. Ce site est réputé pour ses conditions exceptionnelles qui permettent la haute résolution. Il a utilisé l'objectif de 23 cm de la coupole Baillaud et a disposé au foyer de l'instrument une plaque métallique en contact thermique avec un serpentín parcouru par un courant d'eau refroidie. Il obtint ainsi des films montrant les déformations et les mouvements de la granulation avec une résolution parfois inférieure à 0.8". Par la suite, Jean Rösch, au pic, a réussi avec la même technique à obtenir des images à 0.7".

La nature même de la granulation posait alors un problème. Deux écoles s'opposaient. L'Allemand Siedentopf proposait un modèle d'atmosphère solaire dans lequel les granules étaient des cellules de convection. L'Américain Schwarzschild les considérait comme la manifestation d'un processus de turbulence. Pour départager les deux théories, il fallait améliorer la qualité des images. L'hypothèse convective prévoyait que toutes les cellules ont des dimensions comparables alors que dans le cas de la turbulence, il devait y avoir des structures beaucoup plus petites et plus nombreuses. Seules des images plus fines pouvaient apporter une réponse définitive.

C'est Audouin Dollfus qui entreprit une expérience hors du commun pour départager les deux théories. Fils de l'aéronaute Charles Dollfus (fondateur du Musée de l'Air et de l'Espace) et élève de Bernard Lyot, Audouin Dollfus est l'un des pionniers de l'astronomie spatiale. En 1956, il équipe un ballon d'une lunette de 30 cm de diamètre et s'envole à 6000 m d'altitude pour y photographier la granulation solaire. Cette expérience a été montée grâce à une collaboration entre l'observatoire de Meudon et le Dr Blackwell de Cambridge en Angleterre. A une telle altitude, la différence d'indice de réfraction entre l'air et le vide est réduite de moitié, ce qui diminue considérablement les déphasages introduits par l'inhomogénéité des masses d'air. De plus, il n'y a plus de troubles dus à la convection thermique. Il devient donc possible d'atteindre la résolution théorique de l'objectif. Nous ne décrivons pas les détails de cette passionnante aventure scientifique et humaine et renvoyons pour cela le lecteur à l'excellent livre « Un siècle d'Astronomie » édité par Vuibert et la Société Astronomique de France.

Ces vols ont permis d'obtenir d'importants résultats scientifiques. Grâce au temps de pose très court des clichés (0.2 milliseconde) et à la finesse des grains du film Kodak Microfile, la résolution a pu être meilleure que 0.6" avec un contraste très élevé. Les images permettent de distinguer des points distants de 220 km sur le Soleil. On constate que très peu de granules sont plus grandes que 2" et peu sont plus petites que 0.8", soit 300 km. Les clichés ont été mesurés avec précision pour tracer des courbes isophotes qui ont montré le désordre de la structure granulaire. Ces mesures ont également déterminé le contraste qui existe entre la brillance des granules et celle des régions interstitielles, soit 10%. Ces variations de brillances ont été interprétées comme des variations de température de l'ordre de 500°.

Ces premiers résultats permettaient de conclure à la nature convective de la granulation solaire par la relative uniformité de la taille des granules.



Le premier cliché télescopique obtenu hors de la surface terrestre. Image très granulée d'une portion de soleil, obtenue le 1^{er} avril 1957, à 6 000 mètres d'altitude, en ballon.

Audouin Dollfus dans la nacelle aux commandes de la lunette.

Extrait du livre « 50 ans d'Astronomie » de Audouin Dollfus, édition EDP SCIENCES.

« Au premier voyage, le 22 novembre 1956, la fixation de la longue lunette sous la nacelle, avant le départ, demanda du doigté. Il fallait maintenir la nacelle près du sol, grâce à des câbles, et y fixer par-dessous les organes du télescope. La grande enveloppe, sollicitée par la brise matinale irrégulière, obligeait l'équipe au sol à suivre la nacelle dans des embardées que nous n'avions pas pu simuler lors des répétitions. Après une envolée franche, tout s'enchaîna normalement dans un vol emmené à grande altitude avec détermination. La descente, engagée à 6000 mètres, devait être rapide, menée vers le sol sans retour ; elle ne fut arrêtée que par le largage du télescope en parachute, à moins de 150 mètres du sol, opération que des bâtiments de ferme, juste au dessous de nous, rendirent délicate. Brusquement délesté, l'aérostat décrivit alors une grande orbe qui l'amena par inertie jusqu'au ras du sol, avant de remonter lentement ; c'était exactement le scénario prévu. Ramené au cas d'une ascension plus classique, je posais le ballon sans encombre dans une petite clairière qui se présenta devant nous.

Le second vol commença aux aurores, le 1^{er} avril 1957, par une belle journée sans nuage, sans vent. Tout alla comme prévu jusqu'à la descente finale ; cherchant alors à déterminer l'importance et la direction du vent près du sol, je scrutai depuis le bord les fumées et les bancs de brume, et je fus surpris de déceler une fumée d'usine qui tordait ses panaches de façon inquiétante. Il devenait évident que le vent s'était levé en grand. En approchant du sol, la campagne, sous notre corbeille, se mit à défiler.

.../...

Ce grand mouvement uniforme, rien ne peut l'arrêter. C'était dans ces conditions qu'il fallait se poser. Parvenu près du sol, je larguai le télescope juste avant une forêt ; le vent, dans le parachute, vint le plaquer contre les premiers arbres. Puis les cimes défilèrent en dessous de nous, très vite. J'estimai la vitesse horizontale à 50 km/heure. Le bruit du vent dans les branches s'élevait en une sourde rumeur. Il fallait maintenir le ballon très bas, mais sans toucher les branches, car l'absence de feuilles, avec la vitesse, représentait un danger. Devant nous, juste après la forêt, bien dans l'axe du vent, une prairie dégagée ; l'espace parut suffisant. Il fallait y plonger sans hésiter.

Le premier choc fut rude, avec presque toute la vitesse, car le guiderope freine peu dans ces conditions. Puis ce fut le traînage, nacelle couchée, en labourant le sol sur près de 200 mètres. Un bon traînage, pour l'aéronaute, exerce une fascination ; pour le passager, c'est une expérience unique. Finalement tout s'immobilisa dans l'herbe fraîche et l'odeur des champs. Il ne fut pas facile de retrouver le télescope, de l'autre côté de la forêt... »

La lunette Jean Rösch

Les images de Dollfus ont apporté un gain considérable dans la connaissance de la granulation solaire, mais il faut encore améliorer la résolution. C'est au pic du Midi que le pas va être franchi grâce aux travaux de Jean Rösch avec la lunette de la coupole Baillaud puis à la lunette de la coupole-tourelle, rebaptisée Lunette Jean Rösch en 2004 en hommage à son concepteur.



La lunette Jean Rösch autrefois appelée coupole-tourelle à cause de sa forme.



Jean Rösch (1915-1999).

En 1943, Bernard Lyot avait imaginé un télescope à tube fermé entièrement optimisé pour les observations à haute résolution angulaire qui minimiserait les effets de la turbulence instrumentale. En 1954, l'atelier de Bagnères de Bigorre entreprend à l'instigation de Jean Rösch la construction d'une coupole de 5 mètres de base dans laquelle le cimier de fermeture se prolonge pour envelopper le tube de la lunette. Des rideaux et des joints sont prévus pour que la coupole soit entièrement fermée au niveau de l'objectif qui dépasse de plusieurs mètres de la coupole. L'instrument est supporté par une monture équatoriale à fourche réalisée par l'Atelier de construction de Tarbes. L'axe horaire est constitué d'une grande toupie engagée dans un roulement par sa pointe sud et appuyé le long d'un grand cercle lisse de 240 centimètres de diamètre sur deux galets porteurs et moteurs.

Au début, l'instrument pouvait recevoir soit l'objectif de 38 centimètres de l'observatoire de Toulouse pour filmer la granulation, soit un objectif de coronographe de 26 centimètres associés à différents spectrographes.

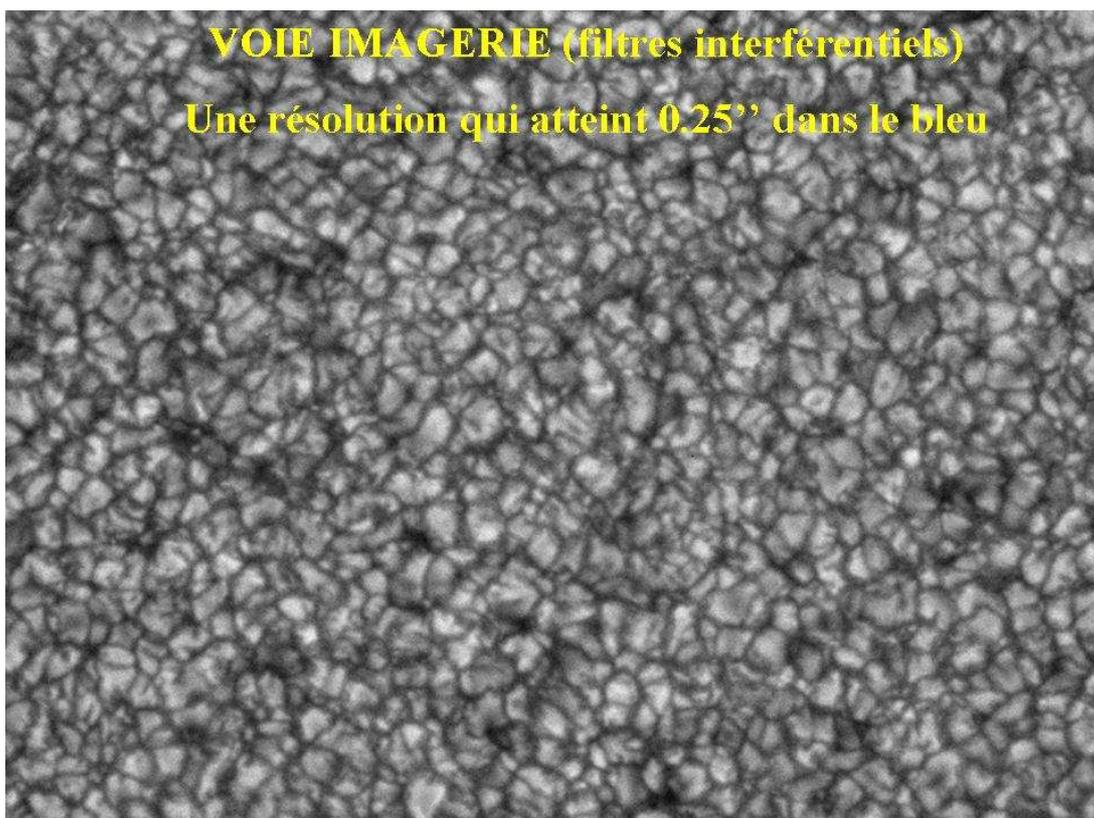
La lunette a donné ses premières images à l'occasion de l'éclipse du 15 février 1961. Elle possède un dispositif de refroidissement inspiré du système imaginé par Lyot pour évacuer l'énergie apportée par le faisceau lumineux. Un disque à double paroi dans lequel circule un fort courant d'eau ne laisse passer qu'une petite portion du Soleil par un trou de 5 millimètres. La coupole est calorifugée pour éviter l'échauffement par l'air extérieur. On a placé la coupole sur la crête est du pic afin d'éviter les échanges thermiques avec les autres parties de l'observatoire.

Le principe des observations repose sur une sélection, à posteriori, des meilleures images d'une séquence. C'est ainsi que Rösch installe dès 1962 une caméra cinématographique à manivelle. Avec cet équipement il parvient à filmer des granules explosifs avec une résolution qui atteint 0.35 secondes d'arc, ce qui est une réelle performance. En 1969, Richard Muller filme une tache solaire pendant 3 heures et met en évidence l'évolution de ses structures. En 1972, Jean Texereau taille, à l'atelier d'optique de l'Observatoire de Paris, un nouvel objectif de 50 centimètres pour la lunette et on dispose devant la lentille un anneau dit de Peter Mehlretter (du nom de l'astronome allemand qui en formula le principe) en tôle blanc qui réduit l'échauffement différentiel des verres par le barillet. Muller utilise pour ses clichés un filtre centré sur la bande G à 430.5 nm, redécouvrant ainsi les principes énoncés par Janssen. Il étudie ainsi les contreparties optiques des tubes de flux magnétiques dans la photosphère solaire. Il parvient à saisir l'évolution des granules sur des séquences de film 35 mm. Dans les années 80 et 90, avec Thierry Roudier les recherches portent sur les effets de l'interaction entre le champ magnétique et la convection à la surface du Soleil. Ils mettent en évidence une variation de la taille des granules au cours du cycle d'activité.

Les astronomes de Meudon utilisent la lunette régulièrement. En 1980, Zadig Mouradian l'équipe d'un spectrographe et une équipe autour de Pierre Mein (Jean-Marie Malherbe, Christian Coutard, Roland Hellier et François Colson) d'un dispositif de double passage soustractif multicanaux pour mesurer les vitesses Doppler dans l'atmosphère solaire (photosphère et chromosphère).

En 1981, Rösch monte un Héliomètre pour déterminer de diamètre solaire. Cet appareil est aujourd'hui utilisé par Jean-Pierre Rozelot de l'Observatoire de la Côte d'Azur.

Actuellement, la lunette est principalement utilisée pour des mesures de spectropolarimétrie (Jean-Marie Malherbe y a installé des polarimètres à cristaux liquides originaux) ainsi que l'imagerie à très grand champ de la photosphère avec la caméra CALAS mise au point par l'équipe composée de Nadège Meunier, M. Rieutord, Sylvain Rondi et Th Roudier.



Les héliographes monochromatiques

La coopération internationale pour la surveillance de l'activité solaire a commencé au début des années 30. Hale fit réaliser plusieurs exemplaires d'un spectrohéloscope standard qu'il diffusa dans plusieurs observatoires qui se virent attribuer des créneaux d'observations quotidiennes. A Meudon, le spectrohélographe a été doté d'un système visuel dont le principe est le suivant. On plaçait devant la fente d'entrée du spectrographe un cube de verre en rotation. Un dispositif équivalent, auquel on avait ajouté un oculaire, était positionné derrière la fente de sortie. La mise en rotation des cubes provoquait un effet stroboscopique. En déplaçant l'image du Soleil devant la fente d'entrée, l'observateur en percevait une image monochromatique. Il fallait observer deux heures par demi-journée pour détecter le plus possible d'éruptions.

Dès 1946, Lyot équipait une lunette fabriquée rapidement dans une boîte à obus d'un filtre polarisant en H α de son invention et réalisa des observations visuelles qui lui donnèrent une image plus lumineuse qu'au spectrohéloscope. Il était possible également de photographier ou filmer l'image directement derrière le filtre. On pouvait ainsi détecter beaucoup plus d'éruptions solaires. Lyot imagina et étudia vers 1950 la réalisation d'un héliographe automatique que l'on pourrait construire en plusieurs exemplaires et répartir dans le monde.

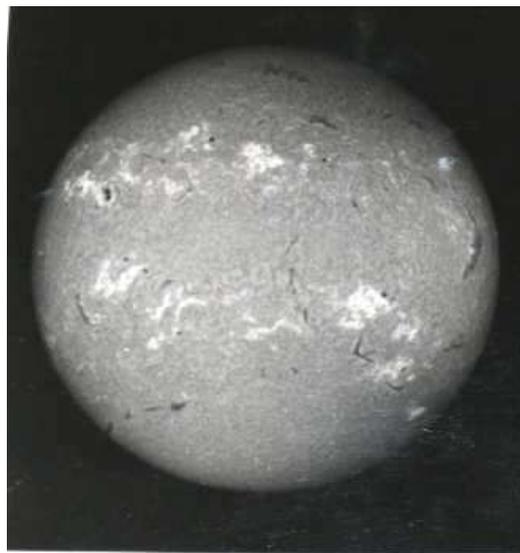
En prévision de l'Année Géophysique internationale, l'Union Astronomique Internationale désigna pendant son congrès tenu à Rome en septembre 1952, l'observatoire de Meudon comme organe de liaison entre les observatoires engagés dans l'étude cinématographique de la chromosphère. Lucien d'Azambuja dirigerait les opérations. Après la mort de Lyot, en 1952, Henri Grenat et Georges Laborde réalisèrent le premier prototype de l'héliographe. L'instrument a été installé dans une cabane non loin du grand sidérostat et fut mis en service par Grenat et Laborde.

L'héliographe était constitué d'une lunette qui formait une image monochromatique du Soleil entier de 15 mm à travers un filtre polarisant de Lyot construit par la société OPL. L'enregistrement se faisait sur film 35 mm à raison de 2 images par minute. Un guidage automatique permettait de garder la lunette pointée vers le Soleil, un photomètre réglait automatiquement les temps d'exposition. Un oculaire latéral permettait l'observation visuelle. La mécanique de cet instrument avait été faite à l'atelier de l'observatoire par Brebion.

Entre temps on avait décidé de faire réaliser une série d'héliographes sur le même modèle par une société industrielle et de les vendre aux observatoires intéressés. La société SECASI, de Bordeaux fût désignée pour cette réalisation. L'héliographe de Meudon resta en service de 1953 à 1964 et fournit de nombreuses bandes cinématographiques étudiées par le service solaire dans le cadre de la coopération internationale pour la surveillance des éruptions et la recherche sur le Soleil.



LE PROTOTYPE DE L'HELIOGRAPHE MONOCHROMATIQUE A FILTRE POLARISANT DE B. LYOT, 1954 - CONSTRUIT PAR SES ELEVES A L'OBSERVATOIRE DE MEUDON.



LA CHROMOSPHERE SOLAIRE EN H α AVEC L'HELIOGRAPHE MONOCHROMATIQUE A FILTRE POLARISANT DE BERNARD LYOT.

Héliographe monochromatique réalisé par Grenat et Laborde en 1953.

L'héliographe de la société SECASI a été livré en 1956 pour l'Observatoire de Haute Provence. Un accord existait entre l'OHP et Meudon pour assurer le service et l'entretien de l'instrument. Les films étaient envoyés à Meudon pour leur dépouillement, la maintenance a été assurée par Olivieri. L'électronique a été modernisée par François Colson de sorte que l'héliographe a donné entière satisfaction jusqu'en 1990.



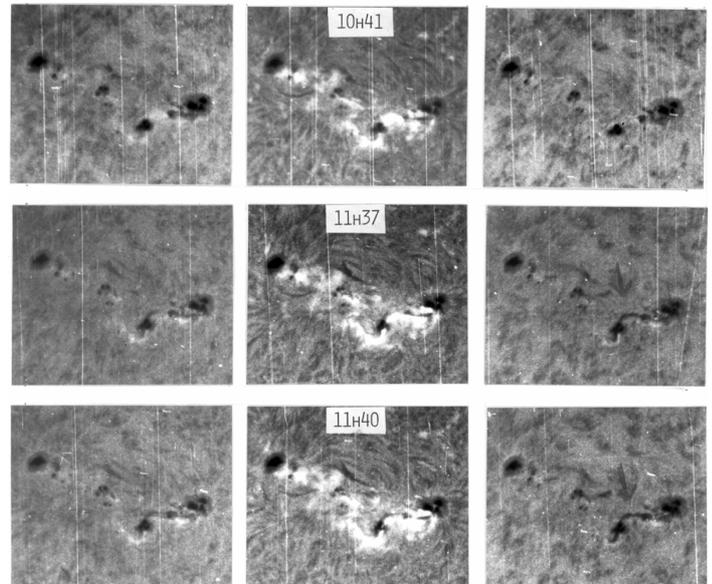
L'héliographe original de Meudon a été exploité jusqu'en 1964 date à laquelle Raymond Michard acheta une monture équatoriale à la société REOSC et elle a été posé sur une extension du toit du bâtiment du Grand Sidérostas pour y fixer l'héliographe de routine. En même temps, il décida de doubler l'héliographe monochromatique par un héliographe à longueur d'onde variable basé sur le même principe et utilisant les mêmes organes mais pouvant donner trois images successives. La première étant centrée sur la raie H α et les deux autres sur les ailes rouge et bleue de la raie à raison d'une séquence par minute. Conçu par G. Olivieri, l'instrument a été monté sur l'équatorial REOSC dans une cabane mobile, parallèle à l'héliographe existant. Le champ ne couvrait alors qu'une partie du Soleil centrée sur une région active. En 1970, l'instrument a été monté sur l'équatorial d'Eichens et abrité dans une cabane mobile dans le parc pour être ensuite provisoirement transporté à Sinès, au Portugal pour deux campagnes d'étude d'un site d'observation solaire dans le cadre du programme JOSO (Joint Organisation for Solar Observations), par G. Olivieri.



Montage sur l'équatorial REOSC sur le toit du bâtiment du grand sidérostas en 1966.
A gauche, l'héliographe à longueur d'onde variable et à droite l'héliographe Michard-Olivieri de 1960. Devant, la lunette de guidage photoélectrique et la lunette de pointage visuel.



Héliographe à lambda variable en 1970.

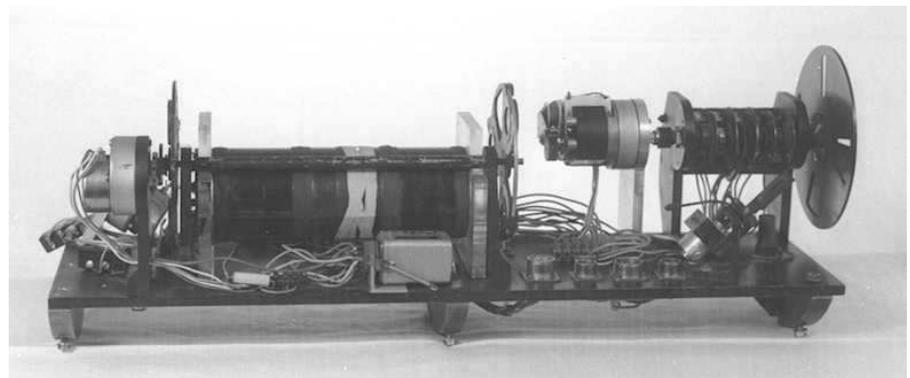


Observation du 29 janvier 1970.

A gauche H α -0.5Å, au centre H α et à droite H α +0.5Å.

Mécanisme de l'héliographe à lambda variable.

De gauche à droite: Filtre et mécanisme de changement de longueur d'onde; moteur, roue à 3 polaroïds, filtre polarisant et roue à 3 polaroïds. Bloc de droite, séquenceur de pose et obturateur; moteur, programmeur à cames et roue obturateur à fentes.



En septembre 1984, les deux Héliographes (Soleil entier et lambda variable sur une région active) ont été remplacé sur la monture REOSC par un modèle unique permettant d'imager le Soleil entier avec une longueur d'onde variable. L'objectif de marque CLAVE a un diamètre de 150 mm pour une focale de 2250 mm. Commandé par microprocesseur, il donne des images de tout le disque solaire pour 1 à 5 longueurs d'ondes programmables dans un intervalle de 3 Angströms de part et d'autre de la raie H α . Une lame demi onde à l'entrée peut tourner par pas de 1/16^{ème} de tour pour les analyses polarimétriques. L'appareil a été conçu par G. Olivieri et la mécanique par M. Marteau. L'électronique est due à M. Fruteau de Laclos. Le filtre polarisant spécial, à lames biréfringentes en spath à grand champ et à longueur d'onde variable a été conçu et réalisé par J. Demarcq au laboratoire d'optique de l'observatoire de Nice.

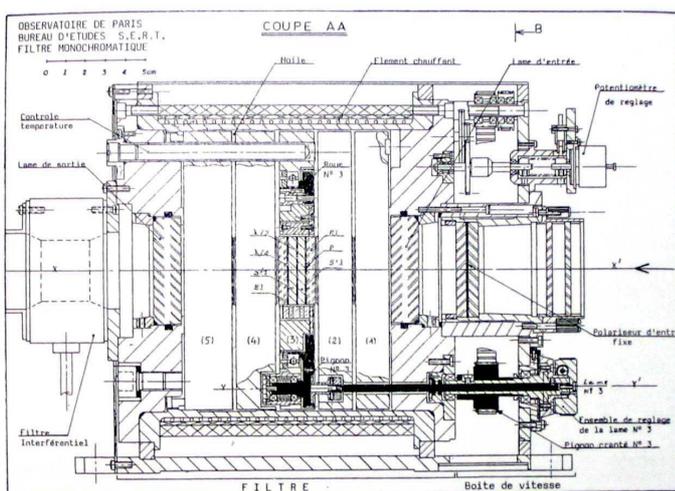


Fig. 4. — Chaîne cinématique de la lame n° 3, identique aux autres lames (1, 2, 3, 4 et 5).

Montage mécanique des lames de Demarcq sur bagues tournantes associées par un jeu d'engrenages.

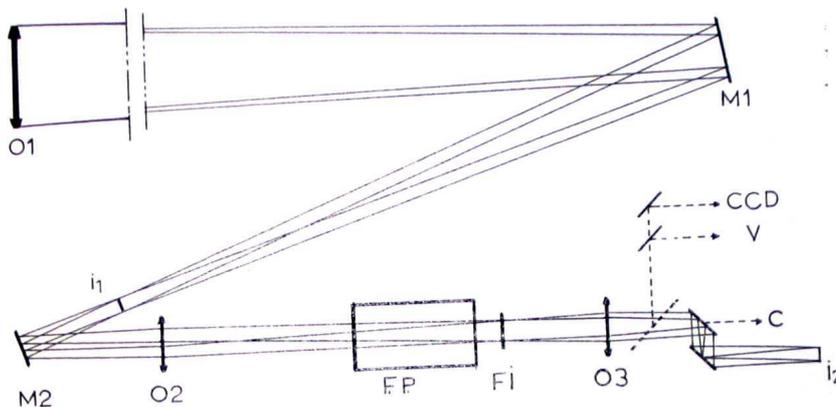


Fig. 7. — Schéma optique de l'instrument.

- O1 Objectif d'entrée \varnothing 150 mm $f = 2250$ mm
- M1 M2 Miroirs plans en zérodur
- O2 O3 Objectif $f = 360$ mm
- FP Filtre polarisant
- FI Filtre interférentiel
- i1 Image primaire
- i2 Image finale
- V Oculaire d'observation visuelle
- CCD Emplacement d'une caméra CCD
- C Cellule photoélectrique de réglage de l'exposition.

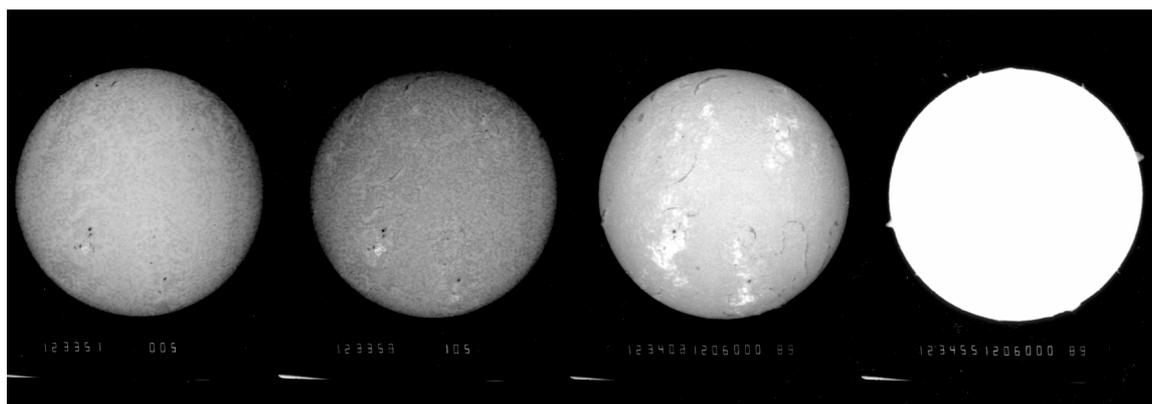
L'héliographe à lambda variable sur monture REOSC en 1985



Par la suite, l'instrument a subi des modifications comme le remplacement des films par une caméra CCD. Les séquences numériques étaient compilées et mises en ligne sous la forme d'un film dans la base de données solaires BASS2000 (<http://bass2000.obspm.fr>) où elles sont toujours consultables. J.C. Hénoux a récupéré le tube de l'ancienne version de l'héliographe pour monter un polarimètre à éruptions en $H\alpha$ sur la même monture. Il a été démonté en 2007. L'héliographe est tombé en panne en 2004 et est actuellement (en 2008) en cours de restauration. Depuis 2007, la monture supporte une lunette centrée sur la raie K du calcium avec une largeur de 1.5\AA et un objectif muni d'un filtre interférentiel à 530 nm. Ces deux instruments délivrent des images de la photosphère et la chromosphère du Soleil entier qui complètent les images du spectrohéliographe.



Tube de l'héliographe réutilisé par J.C. Hénoux pour l'étude polarimétrique des régions actives.



Portion de bande cinématographique obtenue avec l'héliographe le 12 juin 1989.

L'héliographe photographique de la monture d'Eichens

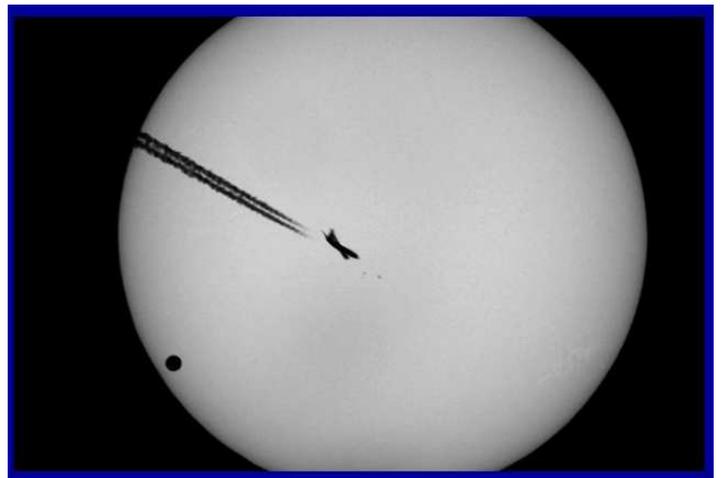
A partir de 2002, la monture d'Eichens a été affectée à l'imagerie de la photosphère. Cette petite monture était très simple d'utilisation et avait, à de nombreuses reprises, été utilisée pour des montages provisoires. La photosphère n'était plus photographiée depuis très longtemps et il a été décidé de mettre sur la base de données BASS2000 une image quotidienne des taches solaires. Sous la direction scientifique de Jean-Marie Malherbe, c'est R. Le Cocquen qui s'est chargé de monter un instrument et de réaliser les clichés. Une lunette de 120 mm de diamètre et 1 mètre de focale a été munie d'un appareil photo numérique. Le développement récent des appareils réflex numériques permettait des acquisitions beaucoup plus simples qu'une caméra CCD classique. L'appareil utilisé possédait 6 millions de pixels. L'échantillonnage était alors d'une seconde d'arc par pixel. En contrepartie, le capteur de cet appareil était muni d'une matrice de Bayer qui restitue les couleurs. Elle est composée de deux pixels verts pour un bleu et un rouge. Ce principe réduit considérablement la résolution angulaire du capteur. Cet ensemble très simple délivrait toutefois des images d'une grande qualité, parfaitement adaptées au site. L'appareil a également permis des démonstrations publiques à l'occasion des passages de Mercure, puis de Vénus devant le Soleil en 2003 et 2004. Un film du passage de Vénus a été réalisé à la monture d'Eichens et est toujours disponible dans la galerie du site BASS2000.

L'instrument n'était pas ouvert tous les jours et n'assurait pas un service aussi régulier que le spectrohéliographe. Par la suite, le montage d'une lunette « Vixen » muni d'une caméra CMOS sur l'héliographe REOSC a remplacé le dispositif de l'Eichens.

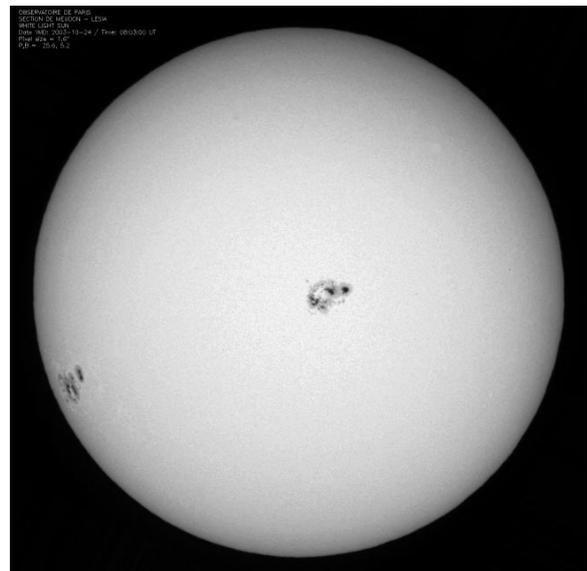


La monture d'Eichens avec la nouvelle lunette de 10 cm.

Le Soleil le 20 octobre 2003 pris à l'Eichens avec un appareil photo numérique. Les deux grands groupes de taches ont eu une activité magnétique très importante provoquant des orages magnétiques et des aurores visibles en région parisienne.



Le passage de Vénus devant le Soleil le 8 juin 2004. Un dispositif automatique déclenchait une image toutes les minutes. Le hasard a permis de saisir le passage d'un avion devant le disque.



Depuis 2007, la monture est équipée d'une lunette de 10 cm de diamètre et de 1.5 mètre de distance focale. Un filtre de densité 3.8 est placé devant l'objectif. Une caméra CMOS de 1024 X 1280 pixels en 10 bits est montée directement au foyer. On place différents filtres colorés pour renforcer le contraste et s'affranchir du chromatisme résiduel de l'objectif. Les pixels mesurent 6μ de sorte que l'échantillonnage est de 0.8 seconde par pixel.

Une seconde lunette est montée en parallèle; Il s'agit d'une petite lunette Coronado (marque américaine) isolant la raie K du calcium à 3933\AA avec une bande passante de 2.2\AA . Le diamètre optique de la lunette est de 7 cm pour une focale de 40 cm. Une lentille de Barlow permet d'obtenir le même échantillonnage que la lunette principale. La caméra est du même type que la première.

L'instrument permet d'imager les régions actives au niveau de la photosphère et de la chromosphère. Les images dans le calcium sont comparables aux spectrohéliogrammes K1v.

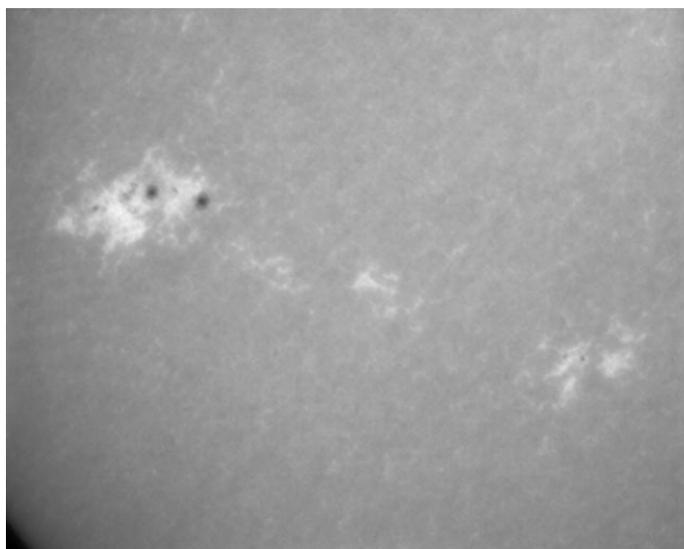
L'intérêt de cette instrumentation légère est la rapidité et la simplicité des acquisitions. On l'utilise principalement pour les campagnes d'observations coordonnées ainsi que pour tester certains filtres et caméras. La monture d'Eichens est aussi un excellent outil pour former les stagiaires que nous recevons à l'imagerie astronomique.



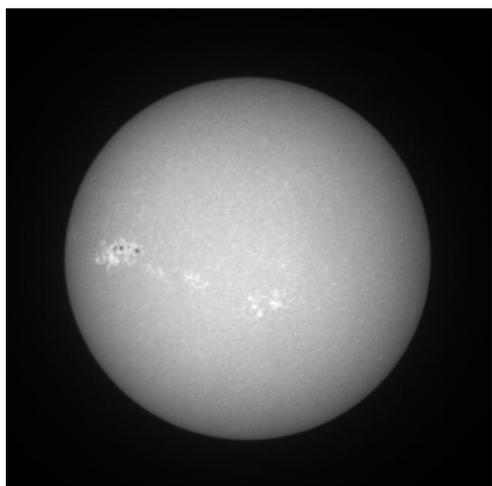
La lunette Coronado est un instrument d'une grande simplicité dédié à l'imagerie. Les images ont une résolution adaptée au site. Sur la pelouse de l'observatoire, on peut espérer résoudre des détails aussi fins que 1.5 secondes.



Taches solaires au foyer de la lunette de 10 cm.



Région active dans le Calcium. La bande passante est assez large pour que l'image révèle à la fois les taches de la photosphère et les facules brillantes de la chromosphère.



Soleil entier dans le Calcium. L'image est réalisée au foyer de la lunette, sans la lentille de Barlow.

La spectroscopie

Après l'imagerie monochromatique et la surveillance quotidienne, nous arrivons à un tournant de notre étude. Le spectre du Soleil délivre une grande quantité d'informations sur les conditions physiques qui règnent dans son atmosphère. Les chercheurs de Meudon vont construire de très grands spectrographes destinés à étudier ces conditions avec une excellente résolution spectrale mais aussi spatiale. Encore une fois, le pic du Midi est très lié aux travaux de Meudon. Ainsi, le spectrographe de 9 mètres installé dans le bâtiment du petit sidérostas ne sera qu'un essai avant de construire un instrument plus performant au pic. Nous allons décrire en détail ces deux appareils qui ont été très importants pour la communauté solaire, puis nous nous intéresserons au spectrographe du Grand Sidérostas dans lequel fonctionnait le magnétographe qui est le précurseur de THEMIS.

Le spectrographe solaire de 9 mètres de Meudon

Ce spectrographe est décrit avec de nombreux détails dans un article signé par G. Laborde, R. Michard et R. Servajean et publié dans les Annales d'Astrophysique de novembre-décembre 1957.

Ce spectrographe a été mis en service en juillet 1956 pour l'étude spectrographique des structures fines de la chromosphère et de la photosphère ainsi que pour celle des taches et des phénomènes associés. Le miroir du télescope a été taillé par M. Bacchi, membre de la Société Astronomique de France dont les optiques sont très réputées. Les autres miroirs du spectrographe ont été réalisés à l'atelier de l'Observatoire de Paris par l'équipe dirigée par A. Couder avec le concours de J. Texereau. Le spectrographe était installé dans le bâtiment dit du Petit Sidérostas qui avait permis à Deslandres de mettre au point le spectrohéliographe. Un coelostat permettait au faisceau de pénétrer dans le laboratoire.

L'optique du spectrographe

Le faisceau issu de la fente était rendu parallèle par un miroir collimateur de 7,4m de focale. Il tombait ensuite sur un réseau par réflexion. Le miroir de chambre de 9 m de focale était situé à côté du collimateur et l'image du spectre se formait légèrement en arrière de plan de la fente d'entrée. Une portion du spectre de 30 cm était recueillie dont les deux extrémités tombaient dans deux oculaires coulés, la partie centrale pouvant être enregistrée sur l'émulsion.

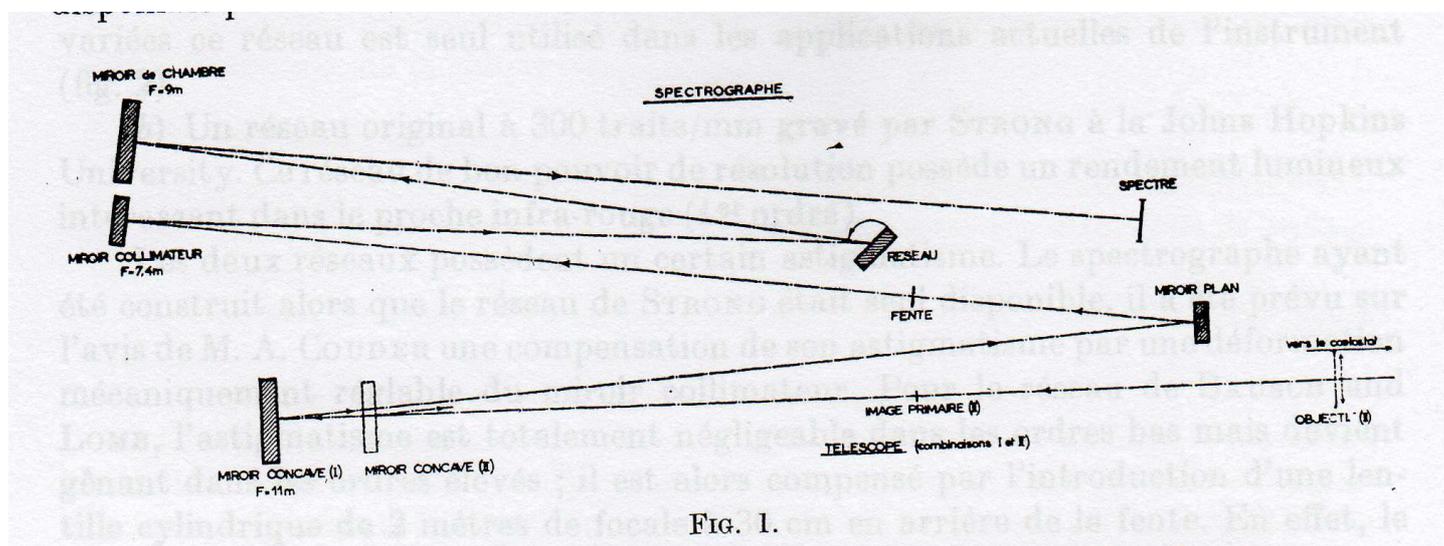


FIG. 1.

Schéma général du spectrographe solaire de 9 m et des deux télescopes qui l'ont alimenté.

Combinaison I : Le faisceau tombe sur un miroir concave et forme une image solaire de 10 cm de diamètre sur la fente après réflexion sur un miroir plan.

Combinaison II : Un objectif forme une image qui est agrandie par un miroir concave. Après réflexion sur un plan, l'image du disque solaire mesure 13 cm.

Deux réseaux pouvaient être montés ; un Bausch and Lomb de 600 tr/mm d'une surface gravée de 180X127 mm dont le rendement maximum se situait vers 500 nm dans le second ordre et un réseau à 300 tr/mm gravé par Strong à la Johns Hopkins University dont le rendement était bon dans le proche infrarouge. La fente de 20 mm était précédée d'une préfente au centre d'un disque en métal blanc qui permettait de visualiser l'image du Soleil.

Le télescope

En 1956, le télescope consistait en un miroir de 50 cm de diamètre, 11 m de focale, et d'un miroir plan. L'année suivante, le miroir a été monté au pic du Midi et remplacé par un objectif à lentille qui formait une image de 5 cm du Soleil. Un miroir concave donnait un agrandissement de 2.5X. Le dispositif n'était pas achromatique et ne permettait pas d'observer dans l'ultraviolet.

Le télescope était doté d'un « rotateur d'image » à 3 miroirs plans.

Le réseau était équipé d'un mouvement lent en rotation pour l'enregistrement photoélectrique des spectres.

Le spectre était enregistré sur plaque 9X24 cm ou sur film 35 mm de 24 cm de long. On pouvait également utiliser une caméra et filmer une faible portion du spectre pendant que l'image du Soleil défilait devant la fente d'entrée du spectrographe.

La résolution du réseau Bausch and Lomb était de 200000 dans le second ordre.

Les observations au spectrographe de 9 mètres

Ce spectrographe n'a été utilisé que pendant trois années à Meudon. Les premières observations avaient principalement pour but de qualifier l'instrument et d'en déterminer toutes les possibilités. Une machine simple a été réalisée pour étudier la forme précise des raies sur une portion de 2 mm de la plaque photographique. Ces mesures permirent de mettre en évidence la fluctuation de longueur d'onde d'une raie dans son ensemble. Elles ont l'aspect de lignes zigzagantes dont les fluctuations sont dues à des structures de 1 à 2 secondes d'arc de dimension angulaire. Roger Servajean a commencé son travail sur l'effet Evershed à Meudon avec ce spectrographe.

Un important travail sur la raie H α a permis une étude des spicules de la chromosphère.

Voici un court extrait de l'article de R. Michard qui décrit ce travail:

« Grâce au faible contraste de l'émulsion, les films montrent fort bien les structures chromosphériques H α aussi bien dans les ailes que dans le centre de la raie.

Des résultats particulièrement intéressants ont été obtenus dans un balayage du bord solaire avec fente tangente. On peut suivre d'une image à l'autre les variations du profil de H α sur chaque spicule avec la hauteur. ...3 cas de spicules sont particulièrement frappants car on peut les suivre depuis l'altitude $h = 5500$ km jusqu'au niveau de la photosphère. On constate qu'à leur base les spicules sont sensiblement plus gros qu'aux altitudes où on les observe normalement. Leur émission est complètement oblitérée au centre de H α par les couches situées en avant sur la ligne de visée, mais elle se manifeste par des ailes brillantes très étendues discernables à plus de 2Å du centre de la raie. A mesure que la fente coupe le spicule à un niveau plus élevé, ces deux ailes brillantes se rejoignent à travers le centre de H α devenu progressivement transparent, et l'on obtient finalement un profil d'émission simple.

L'interprétation de ces ailes brillantes de la raie H α émise à la base d'un spicule ne saurait être immédiate ; cependant, il paraît probable qu'il existe à la base d'un spicule un « point chaud » où la fonction-source de la transition H α est particulièrement grande : ce point ne peut se voir qu'aux longueurs d'ondes pour lesquelles l'épaisseur optique de la chromosphère est petite, c'est-à-dire dans les ailes de la raie...

...Nous concluons en remarquant que le spectrographe permet de « voir » les spicules plus près du limbe que les filtres, de mesurer leurs profils et leurs effets Doppler et également d'étudier les structures correspondantes sur le disque... »

Ce même article décrit un procédé expérimental qui avait pour but les mesures d'effet Zeeman détaillées susceptibles de fournir en chaque point la grandeur et la direction du champ. Un appareil a été construit qui devait déterminer par photométrie photographique le taux de polarisation rectiligne et la direction du plan de polarisation ainsi que la polarisation circulaire pour chaque composante.

La lumière correspondant à un petit domaine spectral était recueillie dans le plan focal du spectrographe et séparée en deux vibrations rectangulaires par un prisme biréfringent spath-verre. On obtenait à la fois les deux spectres correspondants sur film 24X36. L'analyseur pouvait prendre par rapport à la fente des orientations variables 0, 15°, 30°, et 45°. Une lame quart-d'onde était interposée pour mesurer la polarisation circulaire. Ce dispositif, qui est resté purement expérimental aurait du permettre de déterminer entièrement la géométrie du champ. L'idée préfigurait toutefois les futurs travaux sur la mesure des champs magnétiques.

Ce spectrographe a été démonté puis remonté au pic du Midi au printemps 1959 pour bénéficier de conditions plus propices aux observations à haute résolution. En peu de temps il a tout de même apporté une grande contribution à la physique solaire moderne.

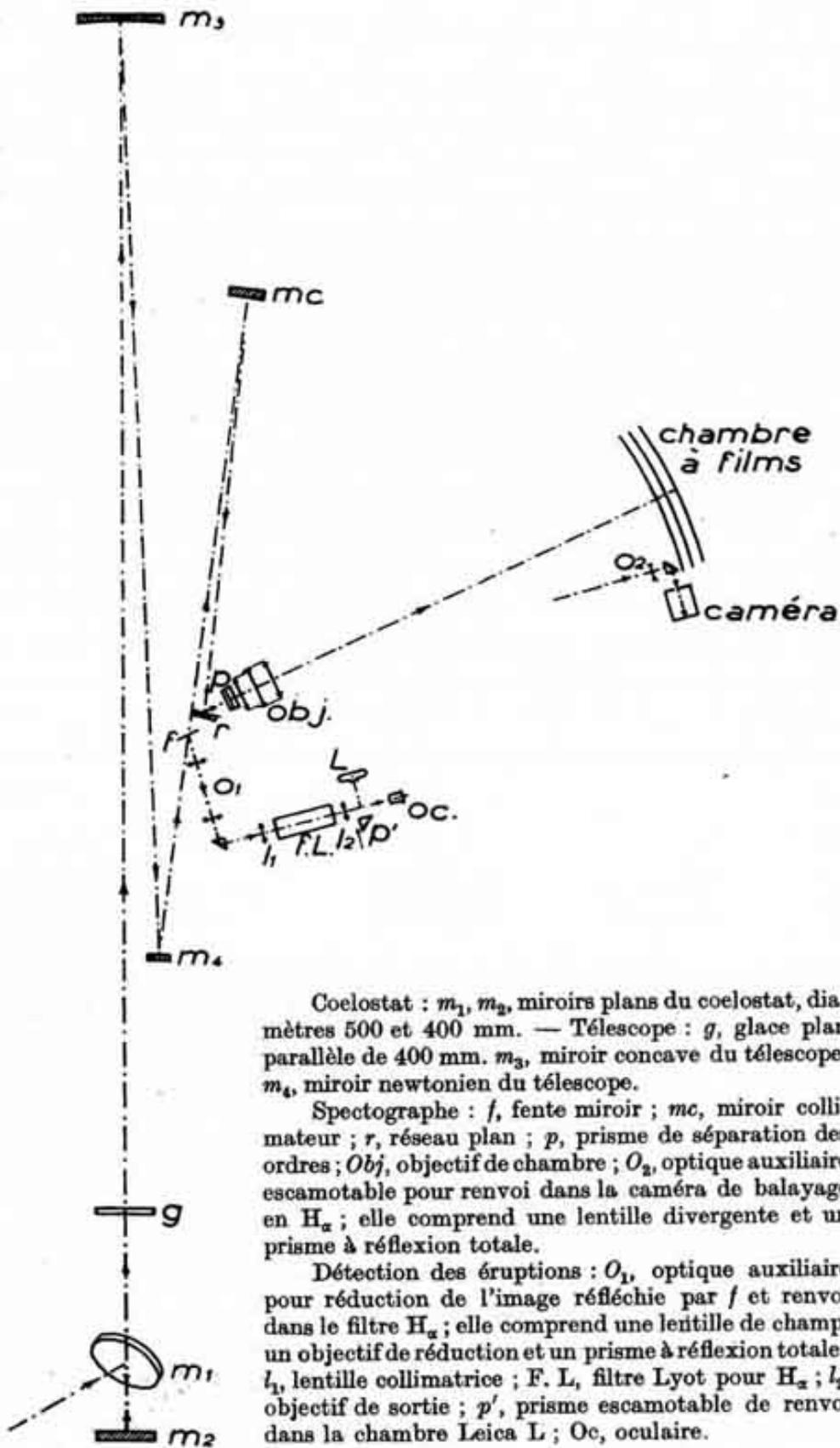
Le spectrographe à éruption du pic du Midi

La lumière était recueillie par un coelostat monté sur un pylône métallique placé sur un éperon rocheux au sud du laboratoire. Le primaire mesurait 50 cm et le secondaire 40 cm. Le faisceau arrivait horizontalement dans le laboratoire. Le coelostat était protégé par de simples capots métalliques, en cas de vents violents, l'instrument n'avait aucune protection. Une lame de fermeture assurait une stabilité thermique dans le laboratoire. Le miroir primaire du télescope était le 515 mm de 11 mètres de focale taillé par Bacchi qui avait déjà servi à Meudon. Le miroir travaillait hors de l'axe mais sa focale étant très grande, la coma restait négligeable.

La fente du spectrographe était polie et servait de miroir pour examiner l'image du Soleil au travers un filtre monochromatique. On pouvait ainsi centrer précisément une région active de la chromosphère. Le réseau à 300 traits/mm mesurait 153X127 mm avec un angle de blaze de 17°30'. *On appelle angle de blaze l'angle entre la normale au plan du réseau et la direction dans laquelle l'intensité lumineuse est maximale.* Le miroir collimateur de 20 cm de diamètre avait une distance focale de 4 m. Avant de passer dans l'objectif de chambre (triplet de 4 m de focale) les faisceaux diffractés devaient traverser un prisme en uviol de 30° dont la dispersion était croisée avec celle du réseau. Il séparait les ordres 2,3 et 4. L'enregistrement des spectres se faisait sur des films 16 mm. On pouvait enregistrer simultanément 3 domaines spectraux, entre 880 nm et 680 nm dans l'ordre 2, 661-480 nm dans l'ordre 3 et 500-355 nm dans l'ordre 4 avec une résolution spectrale comprise entre 3,3 nm/nm et 6,6 nm/nm. Les bobines de 30 m de film permettaient de photographier 21 spectres à la suite avec un intervalle de temps de 10 secondes entre chacun.

Le faisceau réfléchi par la fente traversait un filtre polarisant isolant H α très lumineux construit par OPL. L'image pouvait être observée à l'œil ou photographiée avec une chambre Leica. Ce dispositif autorisait l'imagerie de l'éruption et de son spectre simultanément.

Un ingénieux dispositif était destiné à faire un balayage spectroscopique. Pour ce faire, un prisme escamotable renvoyait l'image de la raie H α vers une caméra 35 mm mue par un moteur électrique qui enregistrerait une succession de spectres pendant que l'image solaire se déplaçait lentement devant la fente d'entrée du spectrographe. Un déplacement lent du miroir du coelostat permettait ce balayage. On pouvait ainsi enregistrer entre 30 et 60 spectres en une minute sur une surface de 0.2X0.2 rayons solaires.

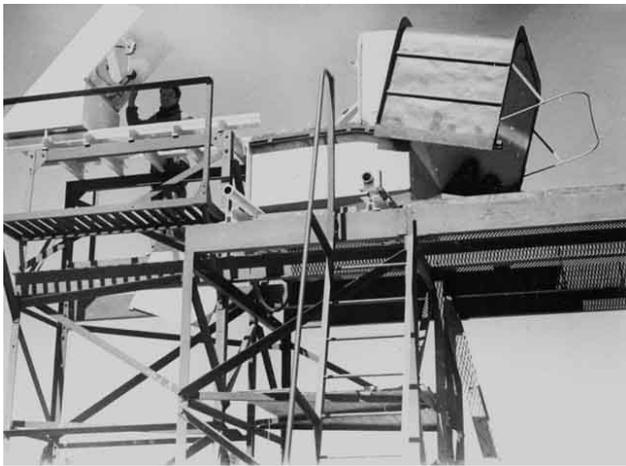


Coelostat : m_1 , m_2 , miroirs plans du coelostat, diamètres 500 et 400 mm. — Télescope : g , glace plan parallèle de 400 mm. m_3 , miroir concave du télescope. m_4 , miroir newtonien du télescope.

Spectrographe : f , fente miroir ; mc , miroir collimateur ; r , réseau plan ; p , prisme de séparation des ordres ; $Obj.$, objectif de chambre ; O_2 , optique auxiliaire escamotable pour renvoi dans la caméra de balayage en H_α ; elle comprend une lentille divergente et un prisme à réflexion totale.

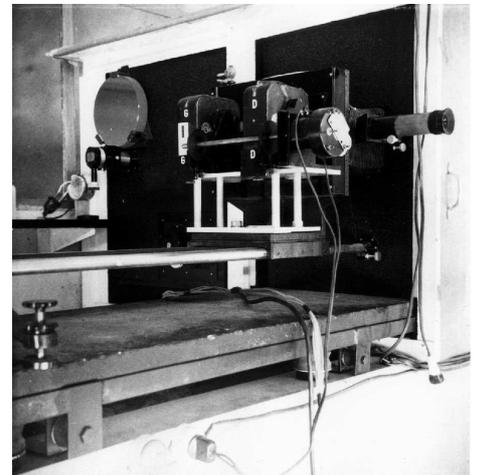
Détection des éruptions : O_1 , optique auxiliaire pour réduction de l'image réfléchiée par f et renvoi dans le filtre H_α ; elle comprend une lentille de champ, un objectif de réduction et un prisme à réflexion totale ; l_1 , lentille collimatrice ; F. L., filtre Lyot pour H_α ; l_2 , objectif de sortie ; p' , prisme escamotable de renvoi dans la chambre Leica L ; Oc, oculaire.

FIG. 1. — Schéma optique de l'installation AGI pour la spectroscopie des éruptions, à l'Observatoire du Pic du Midi.

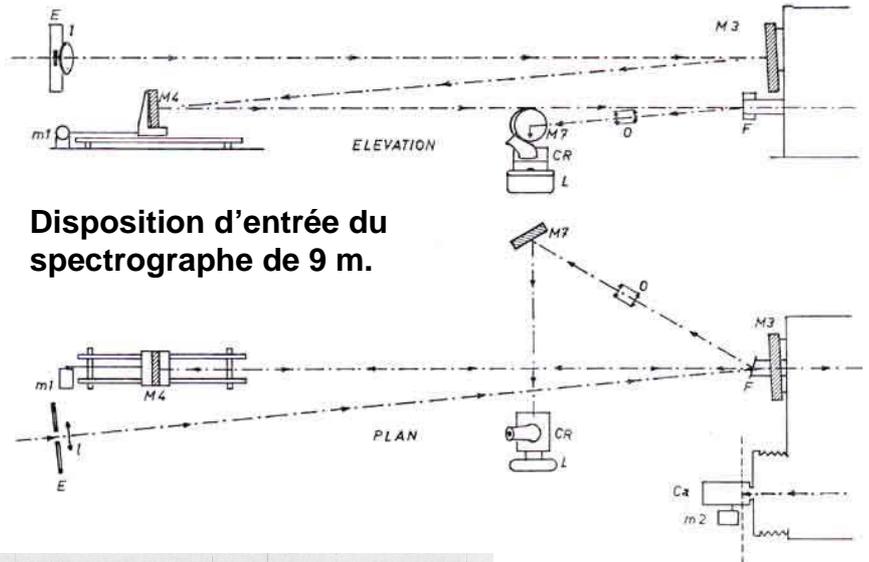


Le coelostat.

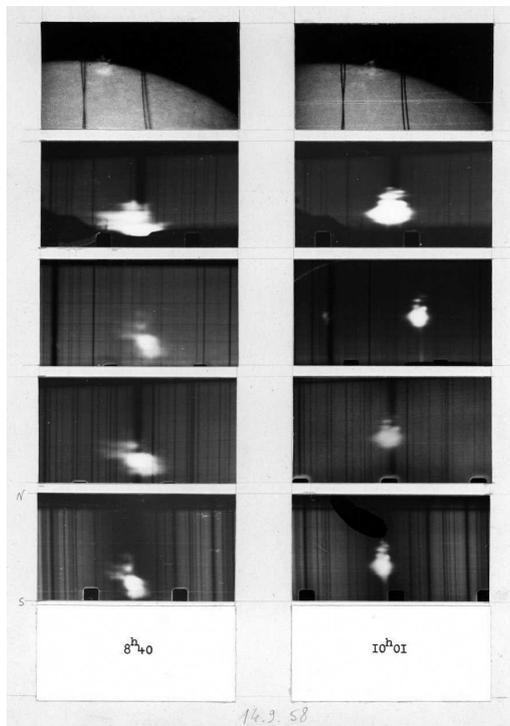
Oculaire et caméras du spectrographe de 9m.



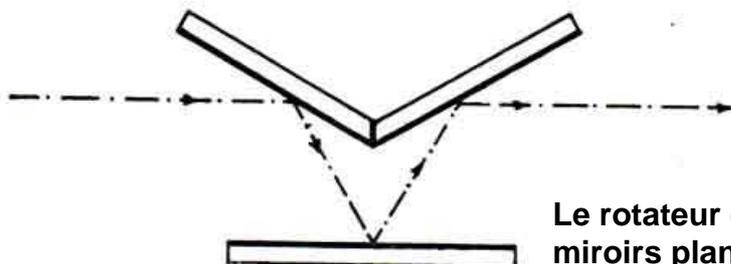
Spectres d'éruptions sur films 16 mm, en haut, la raie H et au milieu du cliché, la raie K.



Disposition d'entrée du spectrographe de 9 m.



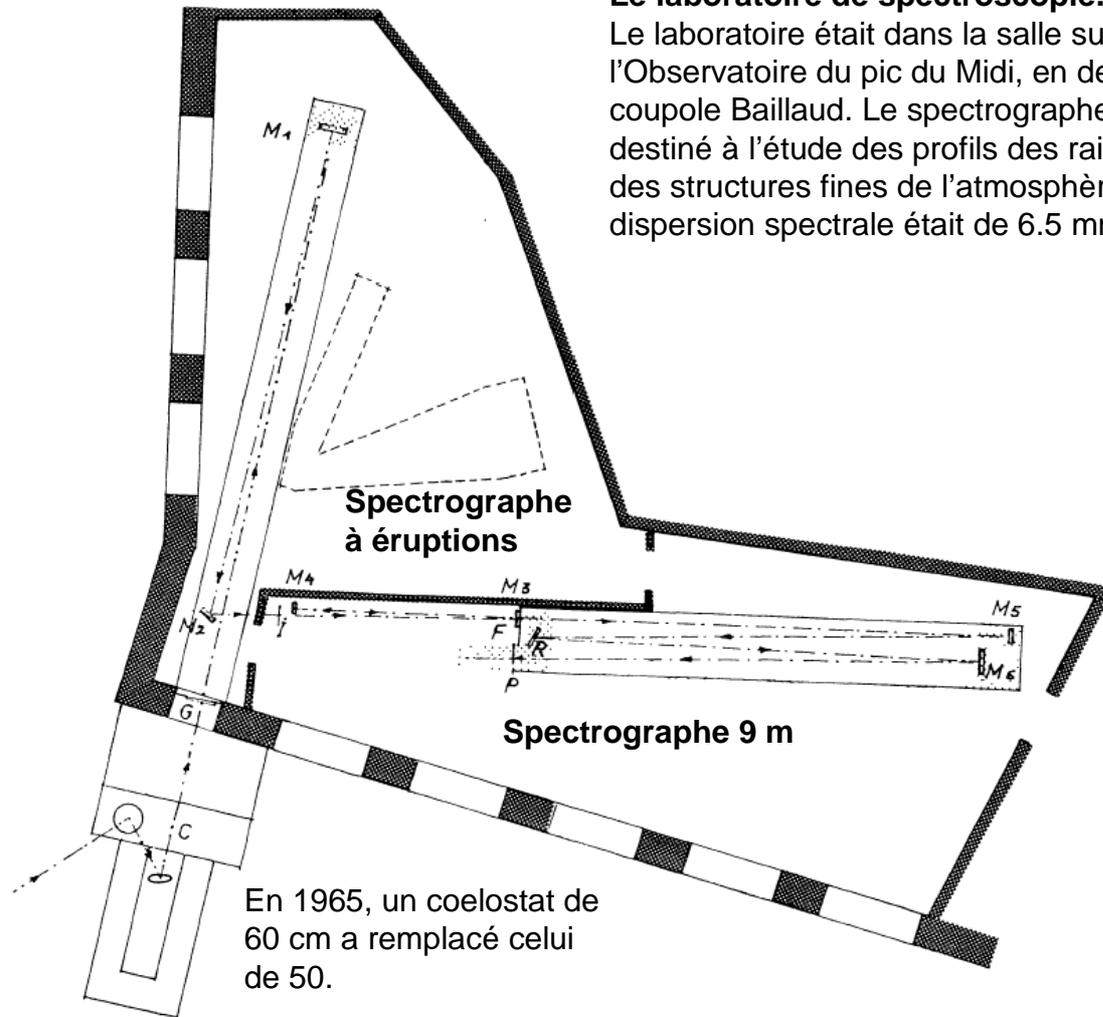
Spectre d'éruptions; en haut l'image réfléchi par la fente, de haut en bas, les raies H α , D₃, K et H.



Le rotateur d'image à 3 miroirs plans.

Le laboratoire de spectroscopie.

Le laboratoire était dans la salle sud-ouest de l'Observatoire du pic du Midi, en dessous de la coupole Baillaud. Le spectrographe de 9 m était destiné à l'étude des profils des raies spectrales des structures fines de l'atmosphère solaire. Sa dispersion spectrale était de $6.5 \text{ mm}/\text{\AA}$ à 5000 \AA .



En 1965, un coelostat de 60 cm a remplacé celui de 50.

FIG. 1. — Disposition générale du coelostat et du spectrographe de 9 m au Pic du Midi.

C,	Coelostat.	M4,	Miroir plan de renvoi et de mise au point.
G,	Glace Uviol.	F,	Fente miroir.
M1,	Télescope de 11 m.	M5,	Miroir collimateur.
M2,	Miroir plan de renvoi.	R,	Réseau.
I,	Image primaire.	M6,	Miroir de chambre.
M3,	Miroir agrandisseur.	P,	Plan focal du spectrographe.

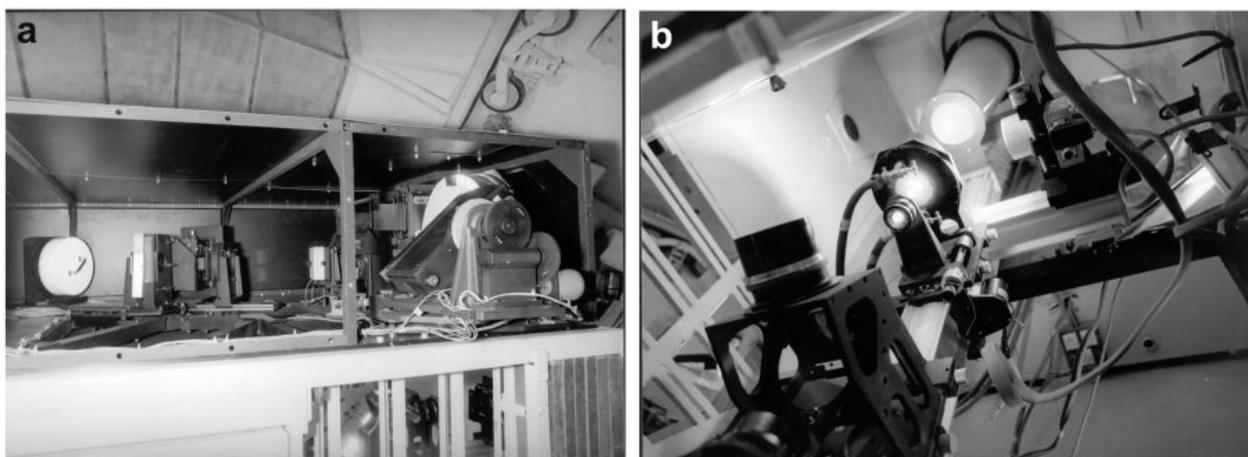
Le spectrographe de 9 m était dans le même laboratoire que le spectrographe à éruptions. Les deux instruments ont été installés par R. Michard, G. Laborde et R. Servajean. Il a été légèrement modifié par rapport à l'installation de Meudon en portant la focale du miroir collimateur à 9 mètres. Le diamètre du disque solaire formé par le télescope était doublé par un dispositif d'agrandissement pour améliorer la résolution spatiale. Pour passer d'un spectrographe, à l'autre, il fallait tourner le miroir plan M2 et renvoyer l'image du Soleil sur l'une ou l'autre fente. La disposition générale du spectrographe était identique à celle du petit sidérost de Meudon. Pour faciliter l'obtention des spectres de taches dans différentes positions, pour mesurer l'effet Evershed, on avait placé un petit « rotateur d'image » avant la fente. Celui-ci était constitué de 3 miroirs plans. Les miroirs 1 et 3 formant un dièdre de 120° dont le plan bissecteur était normal à l'axe optique. Le plan du miroir 2 étant parallèle à l'axe optique et à l'arête du dièdre. Le rayon correspondant au centre du faisceau tombant sur le premier miroir était renvoyé sur le second puis sur le troisième. Il ressortait de cet ensemble sans être dévié, mais l'image observée était symétrique de l'image primitive par rapport au plan contenant les normales au centre des trois miroirs; la rotation de cet appareil autour de l'axe optique permettait par conséquent, de donner à l'image une orientation quelconque. Le laboratoire de spectroscopie du pic de Midi a été démonté à l'occasion du réaménagement du site en 2000. Une partie des grandes pièces optiques est aujourd'hui conservée à Meudon dans la collection patrimoniale.

Le collimateur-objectif de chambre est une pièce dont la réalisation délicate (de par son travail hors axe) a été confiée à Jean Texereau. La cuve à eau destinée à rejeter l'image solaire non utilisée et absorber la chaleur a été faite par F. Chauveau. Les parties mécaniques ont été étudiées et construites dans les ateliers de l'observatoire de Meudon. Le spectrographe a été installé durant l'automne 1980 et l'électronique associée au début de 1981. Les commandes de mise au point et les observations étaient exécutées par un ordinateur.

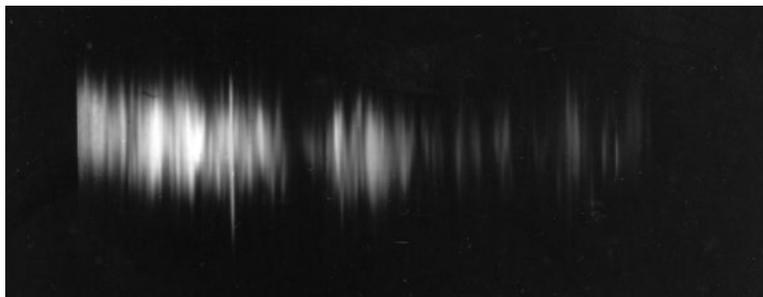
Le diamètre du Soleil projeté sur la fente est de 300 mm donc 1 seconde d'arc représente 150μ . Le spectrographe a été pourvu de deux réseaux de diffractions Bausch and Lomb. Le premier comporte 316 traits par millimètre (blaze $63^{\circ}26$, $l = 56600\text{\AA}$) et le second 600 (blaze $36^{\circ}52$, $l = 20000\text{\AA}$). Pour séparer les ordres, il faut utiliser des filtres.

Le spectrographe a été prévu dès sa conception pour intégrer les appareils développés par le groupe solaire de Meudon : le système de Double Passage Soustractif Multicanaux ou DPSM (voir chapitre sur la tour solaire) de P. Mein et un analyseur de polarisation à grille imaginé par M. Semel, qui n'a pas été exploité.

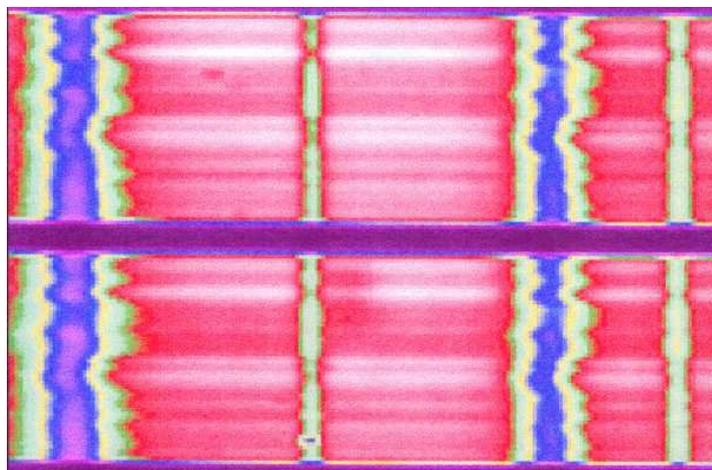
Le DPSM a été installé dès 1981 mais l'analyseur de polarisation à grille est venu seulement en 1995. Les acquisitions argentiques du début ont cédé la place à des caméras CCD à partir de 1993. Le spectro tourelle est aujourd'hui largement utilisé par les astronomes de Meudon (J-M. Malherbe, J. Moity) pour des mesures polarimétriques des raies du spectre solaire à l'aide d'un polarimètre de nouvelle génération utilisant des cristaux liquides construit en 2004.



le spectro tourelle. a) Vue partielle de l'intérieur b) Système agrandisseur et fente.



Spectre des spicules au bord solaire dans la raie $H\alpha$.



Raies du fer Fe I à 6301.5\AA et 6302.5\AA .

Granulation NaD1, Oct 2002, 0.13''/pixel, continu et centre raie

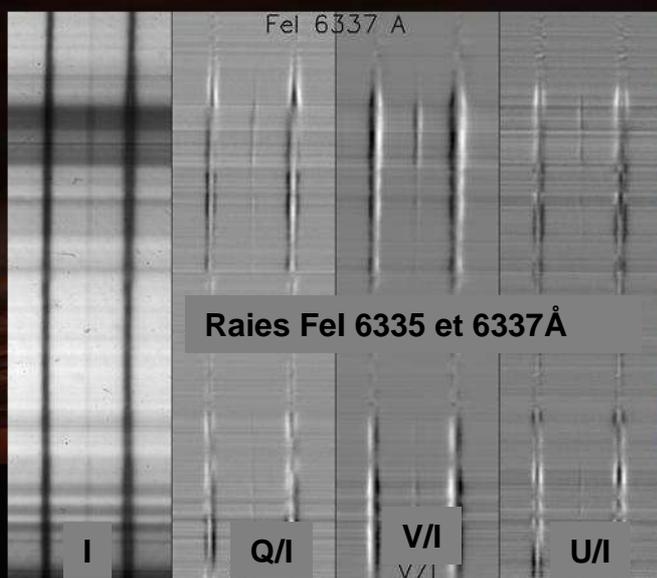
Dispositif de spectro imagerie (x, y, λ)

6''

La granulation dans la raie du Sodium. Le dispositif DPSM permet d'explorer différentes altitudes dans la photosphère. L'image est un montage de 9 champs non jointifs.

Spectroscopie et polarimétrie

Les meilleurs spectres en termes de résolution spatiale



SrI 460.7 nm



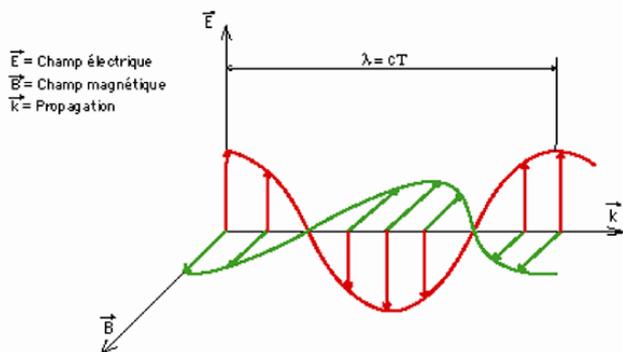
L'effet Zeeman

Avant de prolonger notre récit, nous allons devoir nous intéresser à la physique et plus particulièrement aux champs magnétiques et à ses effets sur le spectre de la lumière. Les taches solaires, ainsi que les régions actives au niveau de la chromosphère, sont les sièges de champs magnétiques très importants. La spectroscopie permet de mesurer l'intensité et la direction des vecteurs de ces champs magnétiques. Les champs magnétiques sont créés par les mouvements des charges électriques, c'est à dire les courants électriques. Cela crée une modification des propriétés de l'espace que l'on nomme *champ magnétique*, caractérisable en chaque point par un vecteur B dont l'intensité se mesure en Gauss (G) ou en Tesla (T). $1T = 10000G$. Si l'on considère un fil infini dans lequel circule un courant électrique d'intensité I et un point M de l'espace à une distance r du fil. La valeur de B est proportionnelle à I et inversement proportionnelle à r . $B_M = \mu_0 I / 2\pi r$ (μ_0 étant la constante de la perméabilité du vide). Le physicien hollandais Pieter Zeeman (1865-1943) a donné son nom à un effet que l'on observe dans le spectre d'une région magnétisée.

Sous l'action d'un champ magnétique intense, on constate que chaque raie du spectre d'un atome se décompose en plusieurs raies voisines appelées composantes Zeeman. Ces composantes se distinguent par leur état de polarisation.

Rappels sur la polarisation:

La propagation d'un photon est associée à celle d'un champ électrique et d'un champ magnétique, représentables par des vecteurs perpendiculaires entre eux et dont les amplitudes varient de façon périodique. Le champ électrique qui se propage est toujours perpendiculaire à la direction de propagation du photon.



Plusieurs modes de polarisation sont possibles.

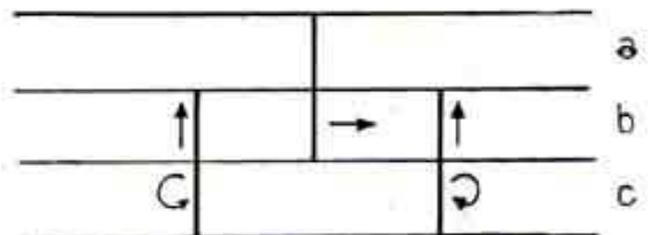
Polarisation Rectiligne: Le vecteur lumineux vibre dans une direction fixe, la *direction de polarisation*. Il définit un plan appelé *plan de polarisation*.

Polarisation elliptique : La direction d'oscillation du vecteur lumineux tourne. Son extrémité décrit, avec une vitesse angulaire constante, une ellipse située dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.

Polarisation circulaire : Cas particulier de la polarisation elliptique dans lequel le vecteur lumineux est constant.

Lorsqu'un atome est plongé dans un champ magnétique uniforme, chacune des raies de son spectre se divise en un certain nombre de raies équidistantes séparées par un intervalle proportionnel au champ magnétique. Dans l'effet Zeeman dit normal, le dédoublement donne naissance à 3 composantes si l'observation se fait perpendiculairement au champ et à 2 composantes si l'observation se fait dans le sens du champ. La figure montre le déplacement de la raie par rapport à sa position en l'absence de champ magnétique.

FIG. 57. — Effet Zeeman: (a) raie en l'absence de champ; (b) raie observée perpendiculairement au champ; (c) raie observée dans le sens du champ.



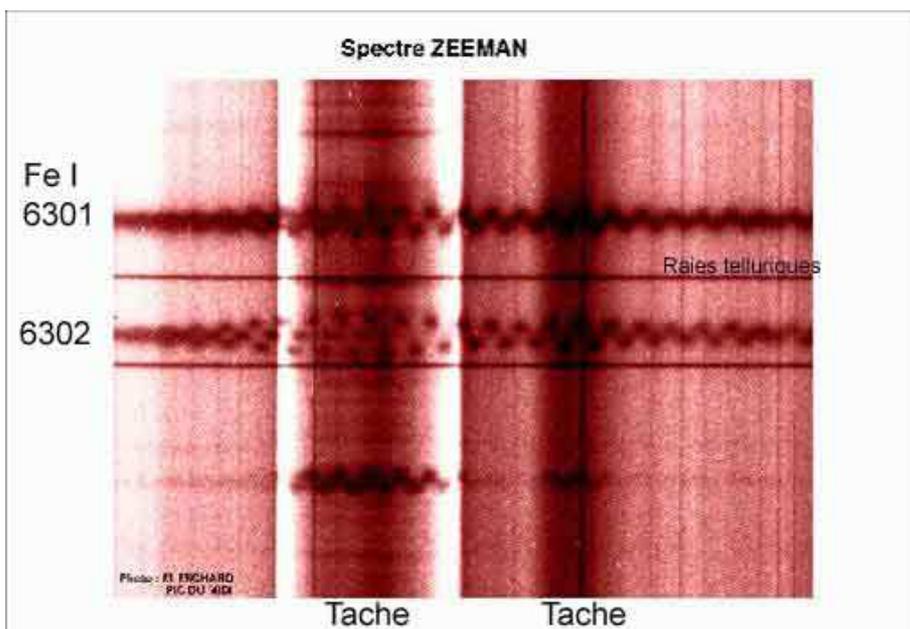
Cas b: polarisations linéaires
Cas c: polarisations circulaires

Les différentes composantes sont polarisées, soit linéairement dans le cas b, soit circulairement dans le cas c. La séparation des deux composantes extérieures est proportionnelle au champ. Dans la pratique, on constate que la décomposition se fait en un plus grand nombre de composantes et le coefficient de proportionnalité entre décomposition et champ varie d'une raie à l'autre. La loi de décomposition est directement liée au facteur de Landé de chaque niveau. Certaines raies sont plus adaptées à la mesure de l'effet Zeeman que d'autres. Les raies les plus utilisées sont celle du fer Fe 5250 et 6301/6302.

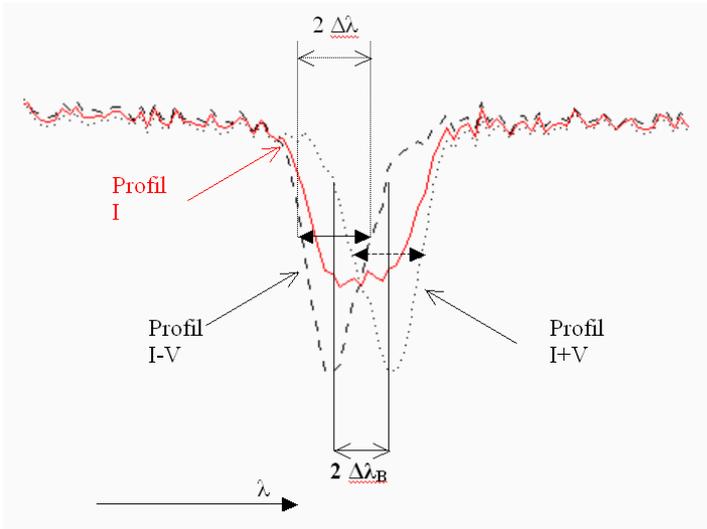
Le facteur de Landé (le physicien allemand Alfred Landé a introduit cette notion en 1921) est une grandeur sans dimension de la physique quantique. Il est fonction de l'état d'énergie d'un atome. Cet état peut s'exprimer par trois termes quantiques, L moment cinétique orbital des électrons, S moment cinétique de spin des électrons et J moment cinétique total des électrons.

La mesure de l'intervalle des composantes de raies bien sélectionnées permet de mesurer le champ magnétique. Dans la pratique on distingue deux cas, les champs forts, comme les taches solaires qui atteignent plusieurs milliers de Gauss et les champs faibles sur le disque de quelques Gauss seulement. Au centre du disque solaire, le champ est sensiblement dans la direction d'observation et l'on se trouve dans le cas b de la figure. On peut mettre en évidence le dédoublement en disposant sur la fente du spectrographe un dispositif appelé grille de Hale qui consiste en une série de polariseurs circulaires juxtaposés droite et gauche. Chacun d'entre eux éteint la vibration circulaire correspondante de sorte que les raies du spectre ont un aspect « crénelé » et que le dédoublement est facile à mesurer.

Quand la tache n'est pas au centre du disque, ou lorsqu'on observe des régions extérieures de la tache dont le champ n'est pas parallèle à la direction de l'observation, les deux composantes sont polarisées elliptiquement. L'analyseur n'en éteint qu'une partie. Le rapport d'intensité des deux composantes permet de déduire l'angle du champ avec la direction de l'observation. On peut ainsi dresser une carte magnétique des taches solaires. Le cliché suivant montre les composantes dédoublées de raies spectrales au travers d'une grille de Hale. Cette image a été prise au spectrographe de 9 mètre du pic du Midi par R. Michard. Les mesures avaient l'inconvénient de ne pas être cospatiales et la technique a été abandonnée.



Vers 1960, le spectrographe de 9 mètre a été utilisé pour mesurer les champs magnétiques dans les taches solaires. Il avait une sensibilité de 30-40 G pour les champs longitudinaux et permettait des estimations sur les champs transversaux. Ces mesures effectuées avec la grille de Hale par R. Michard, Z. Mouradian et M. Semel ont permis de dresser des cartes de champs magnétiques très importantes pour comprendre les phénomènes des éruptions solaires que l'on observait en H α .



Dans le cas d'un déplacement Zeeman faible, les deux composantes ont l'aspect de la figure ci-contre. Pour mesurer l'élargissement total de la raie, il faut observer le spectre avec un dispositif permettant de mettre en évidence les polarisations circulaires droite et gauche. L'écartement total des deux composantes vaut le double du déplacement Zeeman.

Dans les années 50, on utilisait une méthode mise au point par Babcock à la tour solaire de 150 pieds du Mont Wilson. Un système formé d'une lame piézoélectrique suivi d'un prisme de Nicol et commandée par une tension alternative laisse successivement passer les vibrations circulaires gauches et les vibrations circulaires droites. En deux points symétriques par rapport au centre de la raie, la lumière est constituée d'une composante constante à laquelle s'ajoute une composante modulée. On dispose deux fentes en ces points à une distance du centre de la raie valant la demi largeur. Derrière chaque fente, une cellule et un circuit électronique permettent de mesurer la différence des deux portions modulées. L'indication est approximativement proportionnelle au champ magnétique. On fait défiler le Soleil devant la fente, ce qui permet de dresser des cartes magnétiques solaires. La précision est de Gauss. Cette technique a également été abandonnée. En ne mesurant deux positions de façon non simultanée, on mélange plusieurs effets qui élargissent la raie. Il faut faire des hypothèses au moment de l'interprétation sur l'intensité du champ.

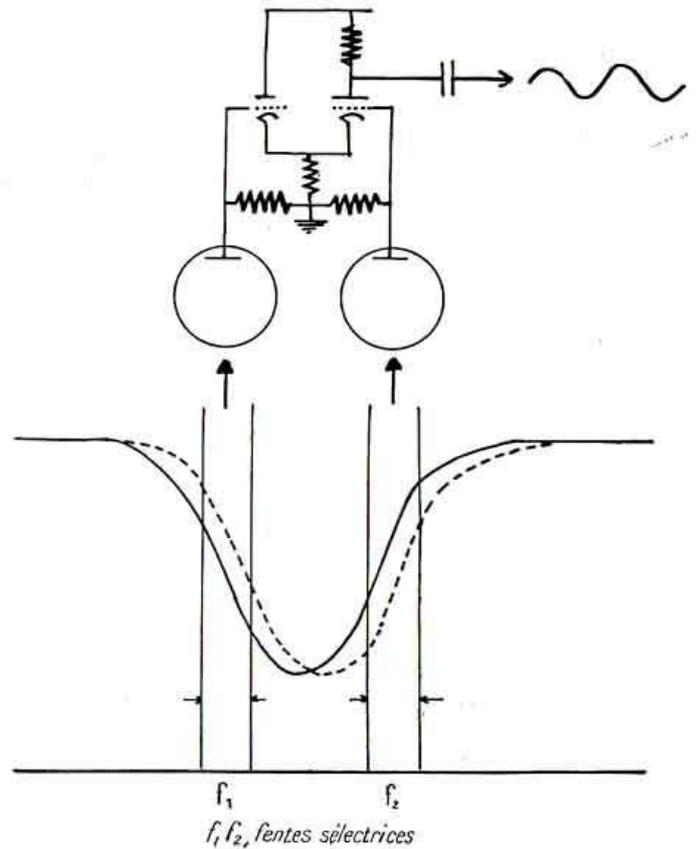
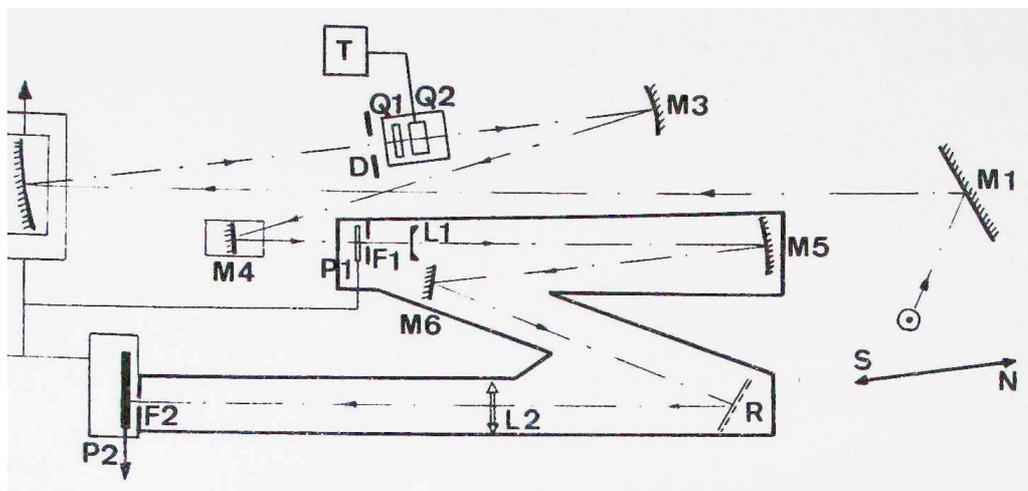


FIG. 61. — (D'après BABCOCK).

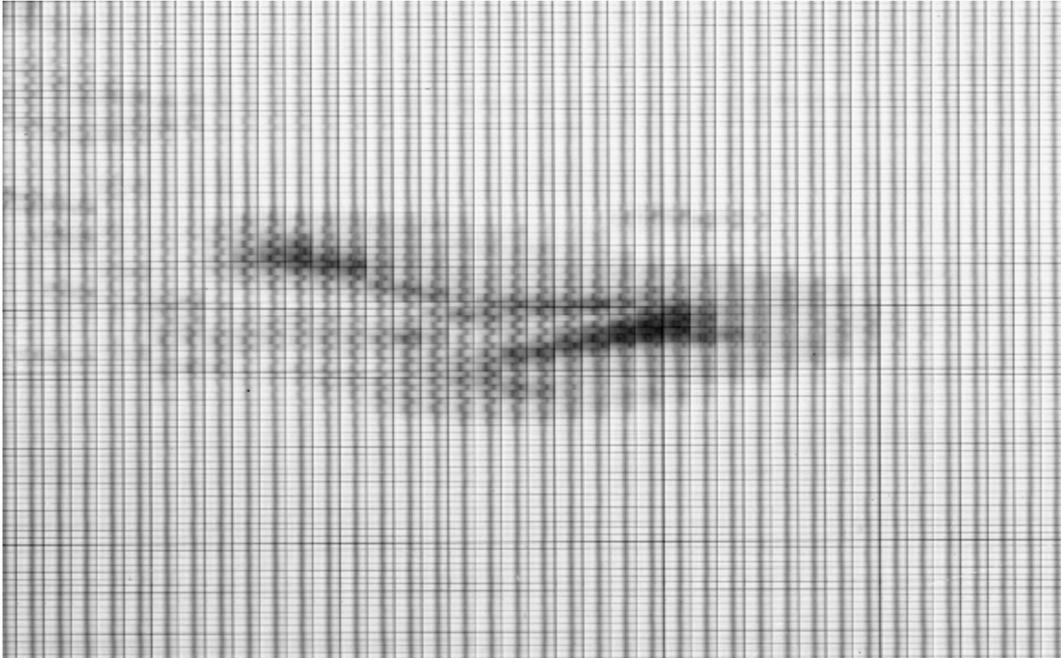
Le magnétographe solaire de Meudon

Le magnétographe solaire a été conçu par Raymond Michard en 1962 en réutilisant l'infrastructure du spectrohéliographe double de Lucien d'Azambuja. Les 3 grands prismes ont été remplacés par un réseau Bausch an Lomb à 1200 traits par millimètres utilisé dans le second ordre. Le principe de fonctionnement était inspiré de celui de l'enregistreur de vitesses de Deslandres. Le Soleil se déplace pas à pas devant la fente d'entrée du spectrographe et la plaque se déplace derrière la fente de sortie. Le mouvement était assuré par un programmeur. La fente de sortie était centrée sur une raie très sensible à la décomposition en triplet Zeeman. On choisissait généralement la raie 630 nm. Une grille de Hale réalisée par Michard était placée contre la fente d'entrée. Les barreaux équidistants transmettant alternativement la lumière polarisée droite et gauche. En présence d'un champ magnétique longitudinal, une raie solaire décomposable en triplet apparaissait décalée alternativement d'un côté et de l'autre. La hauteur de barreaux était de 3.2" pour une distance de 3.7" entre les spectres. Les plaques de champ magnétique mesuraient 9 X 24 cm et contenaient une centaine de spectres juxtaposés couvrant sur le disque solaire une surface de 7' X 9'. Les plaques étaient ensuite mesurées avec le lambda-mètre imaginé par Jean Rayrole. Les cartes, calculées par un ordinateur IBM, donnaient les vitesses radiales et les champs magnétiques. Elles étaient ensuite imprimées grâce à un autre ordinateur. Entre octobre 1962 et Juin 1971, le magnétographe a permis de recueillir plus d'une centaine de plaques de champs magnétiques et de vitesses radiales sur des centre actifs du Soleil. En 1965, J. Rayrole remplace la grille de Hale par un analyseur de polarisation circulaire comprenant une lame quart d'onde interposée devant la face d'entrée, suivie contre la fente par un polariseur tournant. Ce polariseur pouvait occuper alternativement deux positions orthogonales isolant la polarisation circulaire droite ou gauche. A la sortie du spectrographe, deux caméras à film de 35 mm avec avance électriques étaient centrées sur les 2 raies 522.5 nm et 525 nm. Pour chaque section de l'image solaire commandée par le déplacement du miroir principal, les deux raies étaient photographiées simultanément par les deux caméras et successivement dans chacun des deux états de polarisation, avec l'avance du film. Rayrole utilisa ce dispositif pour effectuer les travaux qui lui permirent de rédiger sa thèse en 1967.

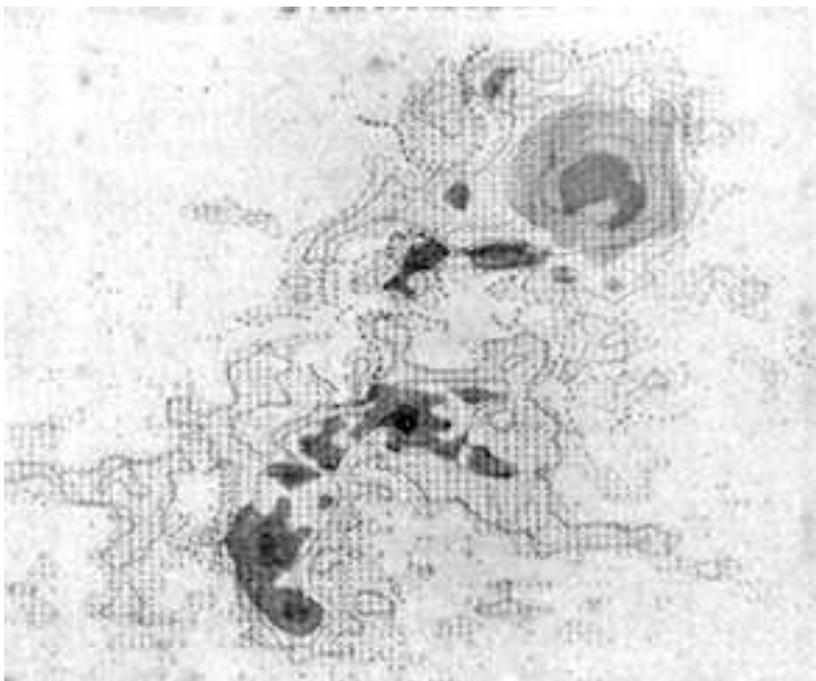


M ₁	Sidérostat de Foucault
M ₂	Primaire F = 7 mètres
D	Diaphragme dans l'image primaire
Q ₁	Lame $\frac{\lambda}{2}$ orientable
Q ₂	Lame quartz
M ₃	Concave F = 2,5 m (x 3)
M ₄	Plan (mise au point)
P ₁	Polaroïd orientable
F ₁	Fente d'entrée + obturateur
L ₁	Lentille cylindrique
M ₅	Collimateur
M ₆	Plan
R	Réseau (1200 t/mm 2 ^e ordre)
L ₂	Objectif de chambre
F ₂	Fente de sortie (double)
P ₂	Plaque photographique

Disposition du magnétographe à Meudon. Il était alimenté par le grand sidérostat de Foucault.



**Plaque magnétique utilisant la grille de Hale
d'un centre actif le 10 juin 1963.**



**Carte magnétique d'un
centre actif le 12 juin 1963.**

**Le miroir primaire du télescope du
magnétographe.**

Son diamètre est de 39 cm et sa distance focale de 7 m. Il était alimenté par le grand sidérostât de Foucault et associé à un miroir concave dans la combinaison de Grégory avec un grossissement de 4.4 X. L'image du Soleil mesurait 31.5 cm. Ce miroir était porté par un chariot à glissière.



Le nouveau magnétographe

Les premières mesures du champ magnétique des régions actives ont été obtenues par Hale en 1908 à l'observatoire du Mont Wilson, mais elles ne concernaient que la composante longitudinale, c'est-à-dire le long de la ligne de visée. Il est très difficile d'obtenir la direction du champ. Pendant une trentaine d'années, les nombreuses observations de Hale ont toutefois permis de préciser les caractéristiques du champ magnétique dans les taches solaires. Par la suite, plusieurs observatoires dont ceux de Potsdam et de Crimée ont perfectionné les méthodes pour mesurer les champs transversaux. A Meudon, A. Dollfus et J.L. Leroy avaient réussi à mesurer l'intensité et la direction du champ transversal en utilisant un polarimètre d'une très grande sensibilité.

En 1967, Jean Rayrole a entrepris la reconstruction du magnétographe. Le spectrographe est hébergé dans un grand coffrage et comprend deux miroirs de chambre situés de part et d'autre du miroir du collimateur. Ces miroirs sont montés sur glissières pour ajuster leurs positions dans l'éventail des faisceaux renvoyés par le réseau. Ils recueillent chacun la lumière dans un intervalle de longueur d'onde défini et en forme le spectre. J. Rayrole réglait pour donner sur une sortie les deux raies magnétiques 522.5 et 525 nm recueillies avec une caméra double et sur l'autre la raie insensible au champ magnétique 557.6 nm recueillie sur une troisième caméra. Au niveau de la fente d'entrée, l'analyseur de polarisation a été remplacé par une lame de quartz quart d'onde associé à un rhomboèdre de spath, appelé séparateur biréfringent, donnant deux images de la fente, respectivement de polarisation droite et gauche. Le spectrographe formait sur le film deux images parallèles et continues de la raie spectrale, pour les deux types de polarisation. Elles étaient mesurées avec un lambdamètre.

Principe du lambdamètre pour mesurer les clichés

Une image agrandie de la raie était projetée dans le plan de deux fentes parallèles dont l'écartement dépendait de la largeur de la raie choisie. Les flux lumineux ayant traversés chacune des fentes tombaient respectivement sur deux cellules photoélectriques connectées en série. La différence des réponses produisait un signal nul lorsque la raie était centrée mais dont l'amplitude et la phase dépendaient de l'ampleur et du sens du déplacement de la raie. Le signal faisait tourner par l'intermédiaire d'un moteur diphasé une lame à faces parallèles placée devant les fentes. L'inclinaison de la lame produisait un déplacement opposé à celui de la raie. Cette inclinaison était mesurée par un voltmètre et par un suiveur de spot qui donnait une image considérablement agrandie des sinuosités de la raie. En même temps, la rotation de la lame se traduisait par une tension numérisée et mise sous forme de bande perforée pour le traitement de l'information ultérieure.

Le lambdamètre a été utilisé en mode photographique jusqu'en 1980 à l'adoption des barrettes de diodes.

Le nouveau magnétographe est le précurseur du télescope THEMIS (voir plus loin). Il permettait de mesurer la polarisation des raies sur tout le profil, en tout point du champ, à l'aide de deux mesures simultanées des Stokes $I+V(\lambda)$ et $I-V(\lambda)$ grâce au séparateur polarisant. (Voir article sur les paramètres de Stokes dans le chapitre consacré à THEMIS.)

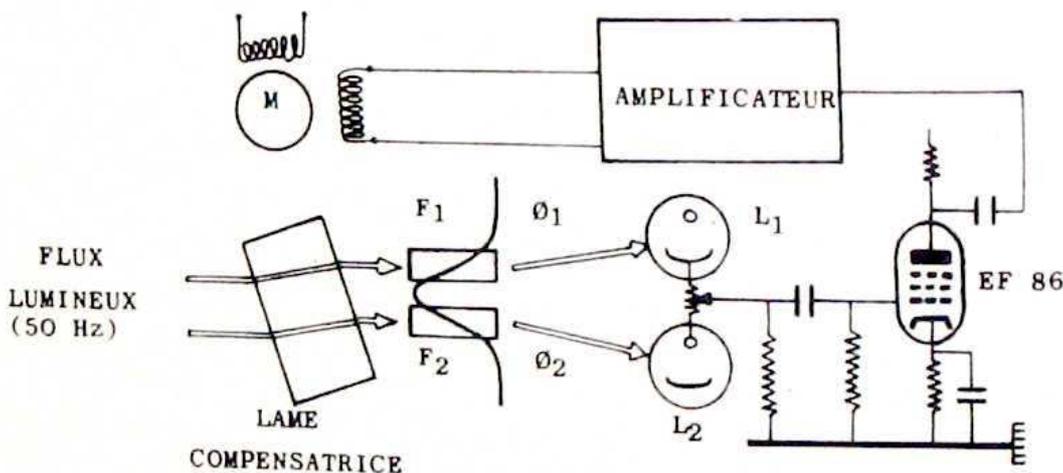
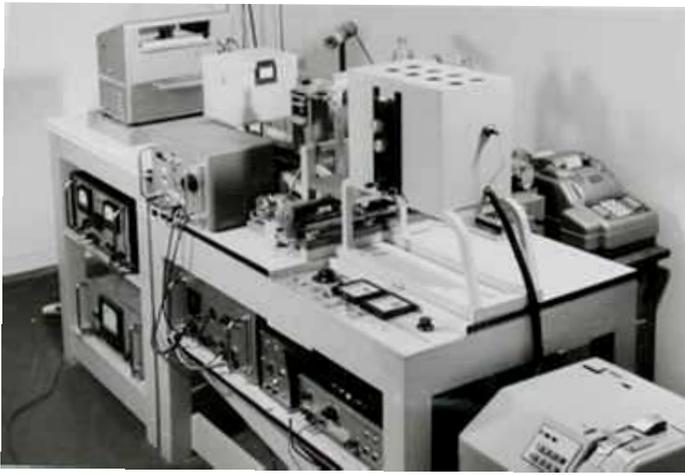


Schéma de principe du lambdamètre.



L'installation du
 lambdamètre vers 1965 avec
 à gauche, le suiveur de spot.

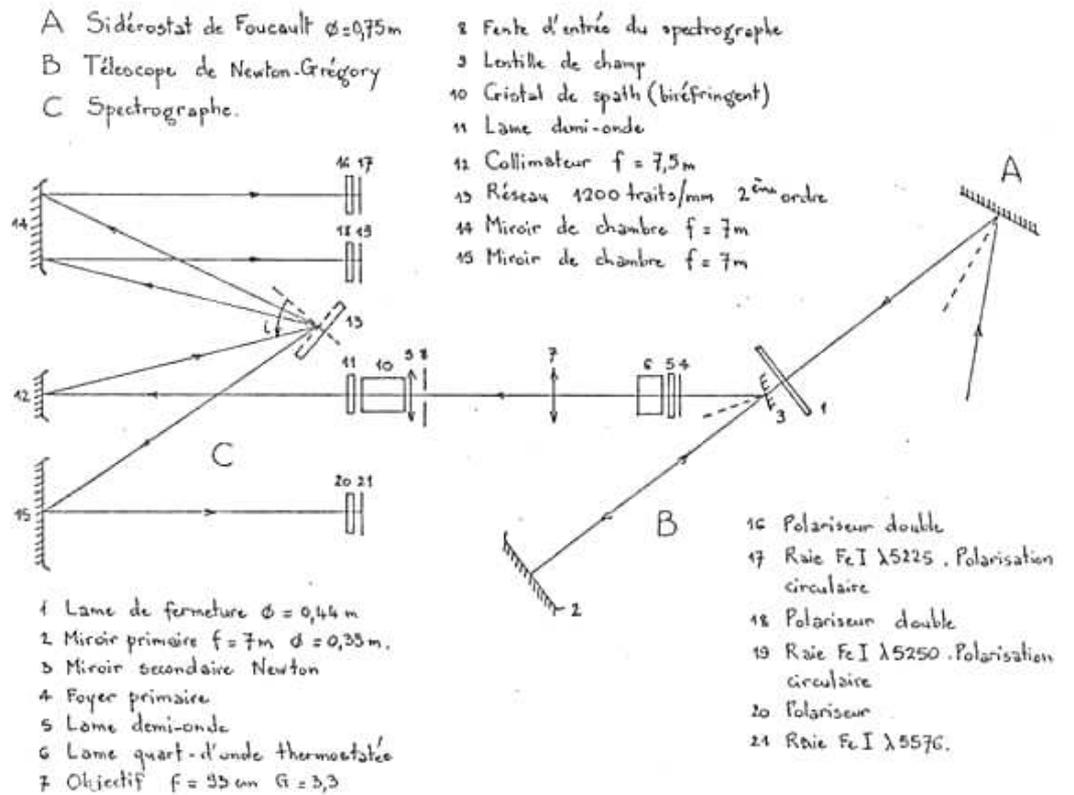
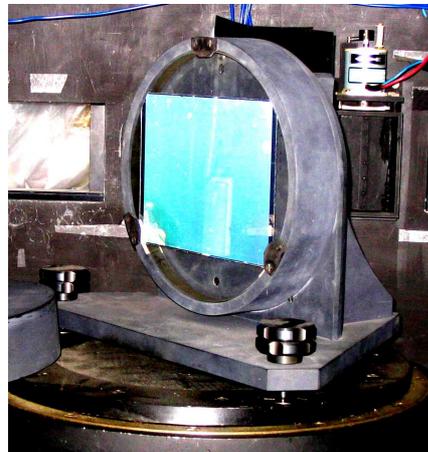


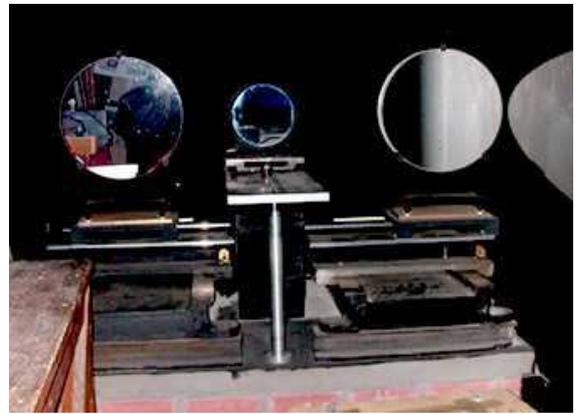
Fig. 81 - Schéma optique du Magnétographe de Neudon



Réseau à 1200 tr/mm à gauche et réseau à 600 tr/mm à droite.
 Selon la radiation utilisée, on pouvait permuter les réseaux.

Les miroirs du spectrographe.

Au fond du grand coffrage contenant le spectrographe, on voit les deux miroirs de chambre qui sont placés de part et d'autre du miroir collimateur. Ils sont montés sur des glissières pour les positionner sur la longueur d'onde à étudier. La focale du spectrographe est de 8 m.



Le télescope et la sortie du magnétographe.

A gauche, le coffrage contenant l'objectif de 39 cm et 7 m de focale. Au fond, l'entrée du spectrographe avec la fente au centre et deux ouvertures de part et d'autre pour l'accès aux caméras avec des manchons en étoffe noire pour protéger de la lumière.

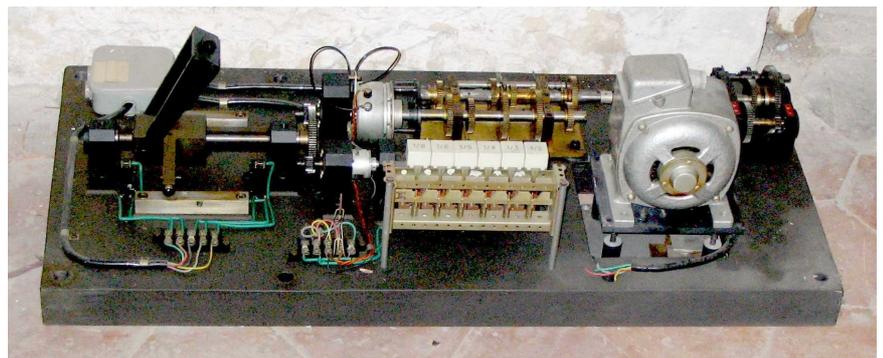


Analyseur de polarisation.

En 1968, J. Rayrole a remplacé la grille de Hale par un analyseur de polarisation circulaire placé au foyer Newton du télescope. Une lame biréfringente en quartz est placée dans un boîtier cylindrique contenant une thermostation par bobinage électrique. La lame est réglée pour produire un déphasage quart d'onde. Elle est précédée d'une lame demi-onde tournante orientée par motorisation électrique.

Le dispositif mécanique avec programmateur pour l'entraînement de l'objectif dans le magnétographe.

Un dispositif analogue entraînait le porte plaque photographique derrière la fente de sortie du spectrographe.



En 1980, Rayrole a remplacé la détection photographique avec mesure au lambdamètre par une détection qui comprenait deux barrettes de diodes Réticon de 256 éléments en ligne placées dans le spectre parallèlement aux raies solaires. A l'entrée du spectrographe, un rhomboèdre de spath précédé d'une lame quart d'onde donnait deux images voisines de la fente, polarisée droit et gauche respectivement. Un séparateur de faisceau portait leur écartement à 90 mm. La sortie donnait deux spectres superposés et décalés comprenant deux images de la raie à analyser, polarisées droit et gauche. Les deux barrettes de diodes parallèles aux raies étaient montées dans un boîtier sur glissière motorisée. Pour chaque position du Soleil sur la fente d'entrée, la glissière produisait une translation qui permettait aux diodes de balayer une raie chacune. On obtenait ainsi un profil de raie pour chaque élément diode de la barette et pour chacune des deux polarités. Un ordinateur commandait les déplacements du miroir primaire et le balayage par les diodes. Il déterminait le profil de chaque raie et leurs déformations. L'ordinateur pouvait ainsi calculer les vitesses radiales par effet Doppler et les champs magnétiques par effet Zeeman. Les données étaient mémorisées sur disquettes. Des cartes d'intensité, de vitesse et de champ étaient construites et imprimées sur listing. Elles comprenaient 250 éléments en ligne et 170 en colonnes. Elles étaient codées par des lettres pour les polarités sud et de chiffres pour les polarités nord. La sensibilité de 25 m/s et de 10 Gauss était deux fois meilleure que par la photographie.

Une station de traitement des images permettait de constituer des cartes en fausses couleurs. Les informations sur l'activité magnétique des centres actifs étaient transmises régulièrement au centre mondial des données solaire de Boulder dans le Colorado. L'instrument a été utilisé jusqu'en 1991 et notamment pendant les opérations du satellite SOLAR MAXIMUM MISSION (1980-1990).

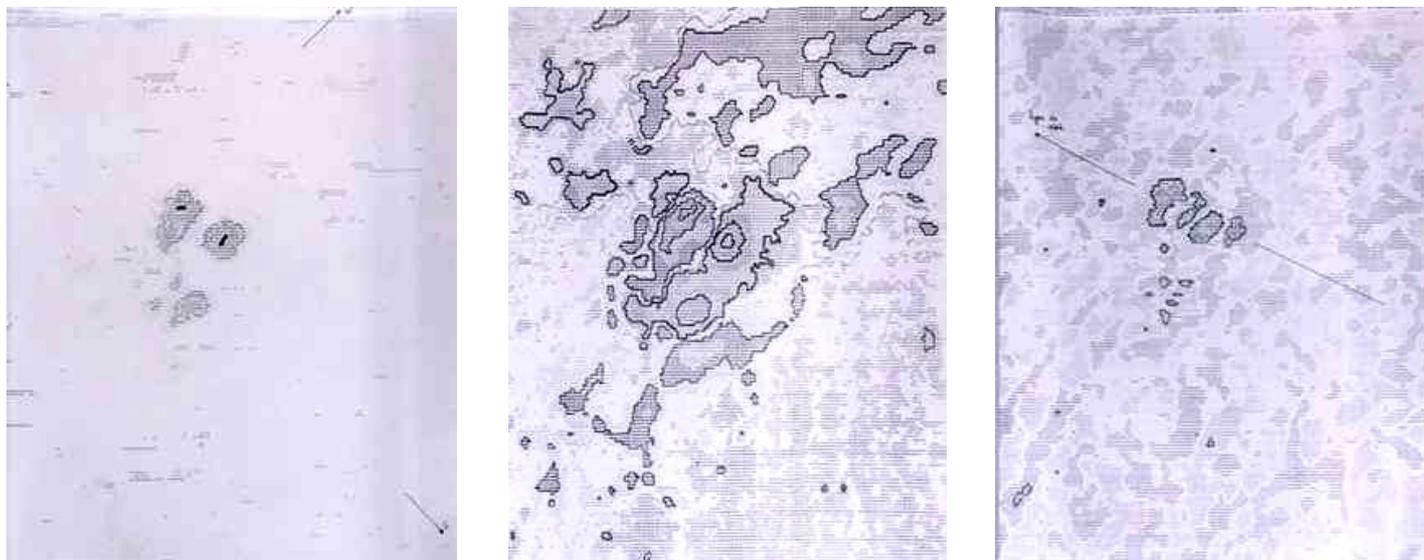


Ecarteur de faisceaux

Dans la version du magnétographe solaire équipé de barrettes de diodes, la fente du spectrographe est suivie d'un rhomboèdre de spath donnant deux images rapprochées de quelques millimètres de cette fente, polarisées linéairement et orthogonalement. L'écarteur de faisceau suit le rhomboèdre, écarte les composantes et porte la séparation à 90 mm. Pour ce faire, le flux venant de chaque image tombe sur l'une des faces d'un prisme en V aluminisé qui le renvoie latéralement sur un miroir. Celui-ci réfléchit le flux vers l'objectif du collimateur.

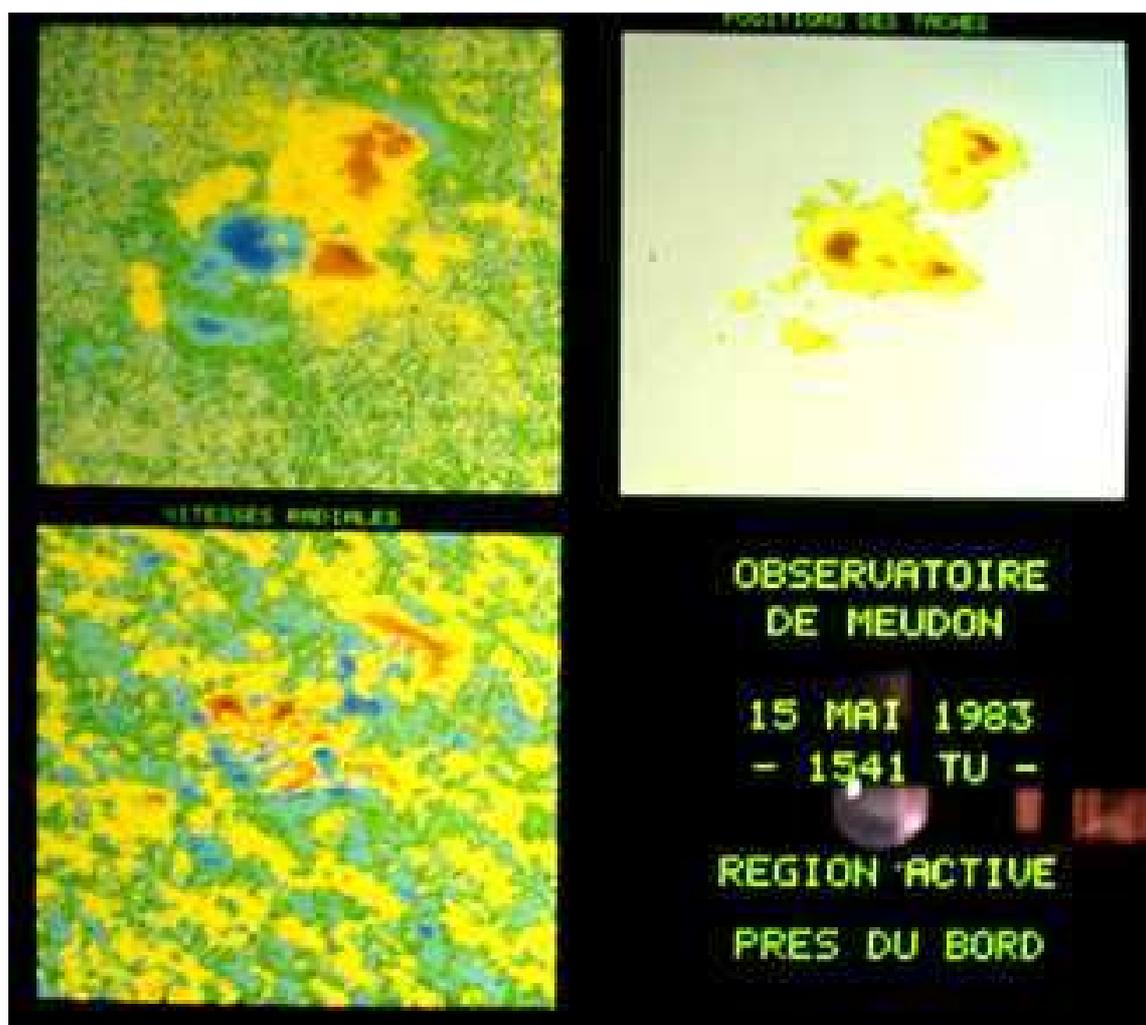
**Détecteur à diodes
sur chariot motorisé.**





Cartes du 11 juillet 1991 établies par Jacques Moity dans la raie 617.3 nm.

Respectivement de gauche à droite : carte des intensités, champ magnétique longitudinal et vitesses radiales.

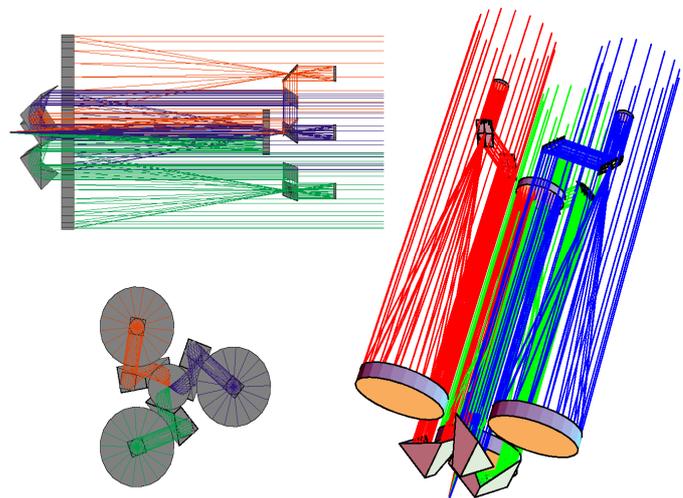


Cartes en fausses couleurs d'après une observation à 663.6 nm.

L'expérience SOLARNET

Le local du magnétographe est aujourd'hui utilisé pour une expérience de recherche et développement menée par Luc Damé du service d'Aéronomie de Verrières le Buisson. Cette expérience consiste en une maquette d'un dispositif de synthèse d'ouverture destinée à développer par la suite un instrument spatial. La synthèse d'ouverture permet de reconstituer la tache de diffraction d'une grande optique en utilisant trois petits objectifs. Dans le cas présent, ce sont trois objectifs de 6 cm qui créent l'équivalent d'un objectif de 20 cm. L'instrument est alimenté par le grand sidérostat de Foucault. Après avoir traversé les objectifs, les faisceaux lumineux sont guidés par un dispositif d'optique adaptative commandé par des miroirs oscillants. Ce procédé permet d'annuler la turbulence atmosphérique. Un jeu de lignes à retard assure la mise en phase de chaque faisceau. Un dispositif de pointage fin donne un suivi très précis du mouvement diurne. Les faisceaux cophasés sont ensuite recombinaés pour former une image équivalente à celle donnée par un objectif de 20 cm. La maquette permet de développer la technologie nécessaire à la construction d'un instrument spatial qui combinera trois télescopes de 35 cm dans le but de créer l'équivalent d'un télescope solaire de un mètre de diamètre. L'instrument est destiné à observer de très fines structures du Soleil dans l'ultra violet en lumière monochromatique par l'utilisation d'un spectro-imageur. Les résultats des expériences menées sur la maquette détermineront la suite du projet.

**Schéma de l'instrument
composé de 3 télescopes de
35 cm qui devra être
embarqué pour la mission
« Solarnet ».**



**Le grand sidérostat de
Foucault qui renvoie la lumière
du Soleil**



**Le banc optique avec la
maquette « Solarnet ».**

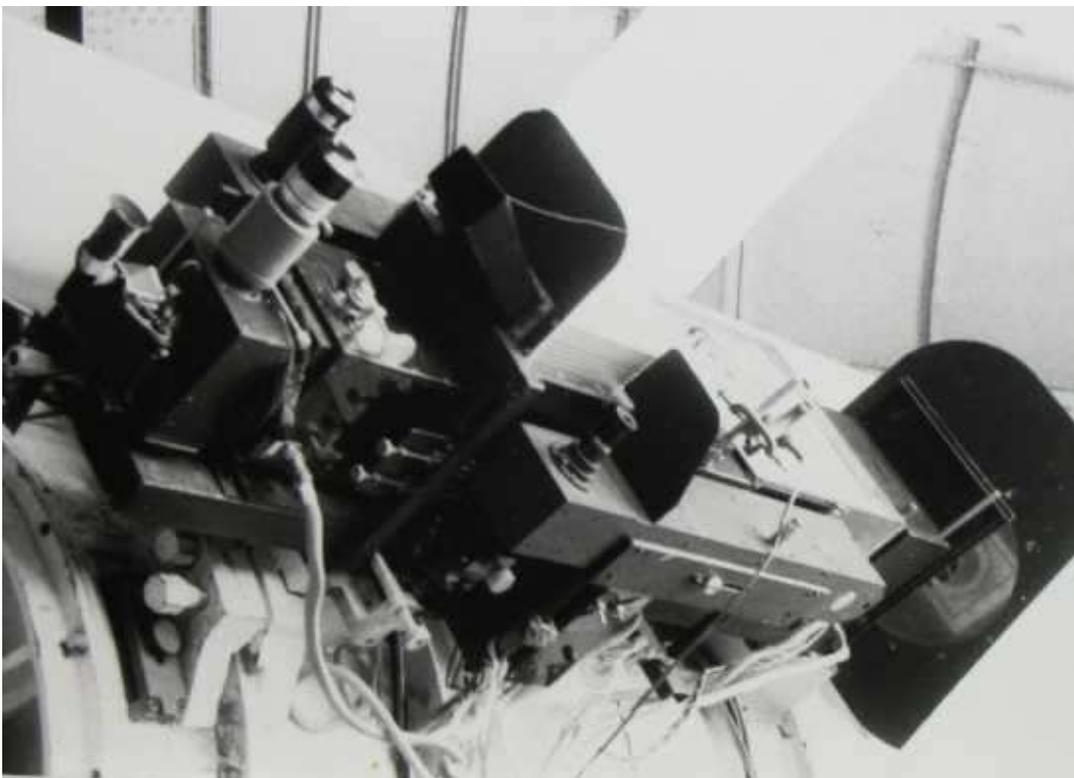
Le Filtre Polarisant Solaire Sélectif (FPSS)

A ce stade de notre récit, nous constatons que l'astrophysique solaire de la seconde moitié du vingtième siècle est centrée sur la mesure des champs magnétiques. La spectroscopie permet ces mesures mais nous avons vu précédemment que Audouin Dollfus et ses collaborateurs avaient réussi des mesures de la composante transversale du champ grâce au polarimètre photoélectrique solaire.

A partir de 1965, A. Dollfus a développé un instrument qui permet d'analyser une raie spectrale de manière très fine en utilisant non plus un spectrographe mais un filtre de Lyot d'une très grande sélectivité associé à un analyseur de polarisation.

Le filtre polarisant solaire sélectif que nous désignerons par ses initiales FPSS est un filtre optique monochromatique d'une très grande sélectivité, 0.13 Å à 5800 Å. La résolution spectrale de ce filtre atteint 45000. Il est ajustable en longueur d'onde depuis le vert au rouge extrême ce qui le rend particulièrement polyvalent. Il permet ainsi l'observation du Soleil par imagerie de la photosphère et de la chromosphère mais également de visualiser par l'imagerie les vitesses radiales ainsi que les champs magnétiques. (*Les observations n'étant pas simultanées le long d'une raie spectrale, les mesures sont moins précises qu'en spectropolarimétrie.*)

L'instrument se présente comme un assemble de plusieurs modules: un filtre polarisant de sélectivité 0.6Å, le filtre polarisant à grande sélectivité de 0.15Å, un préfiltre polarisant et éventuellement un filtre optique complémentaire. Les éléments des filtres polarisants sont à lames biréfringentes de quartz ou de spath accordées de type Lyot. Les polariseurs sont des prismes de Rochon à grande transmission. A cet appareil est associé un *sélecteur de polarisation* Stokesmètre à l'entrée et un *modulateur de bande spectrale*. Entre les deux filtres, un *spectroscopie* de contrôle permet d'ajuster la raie spectrale avec précision.



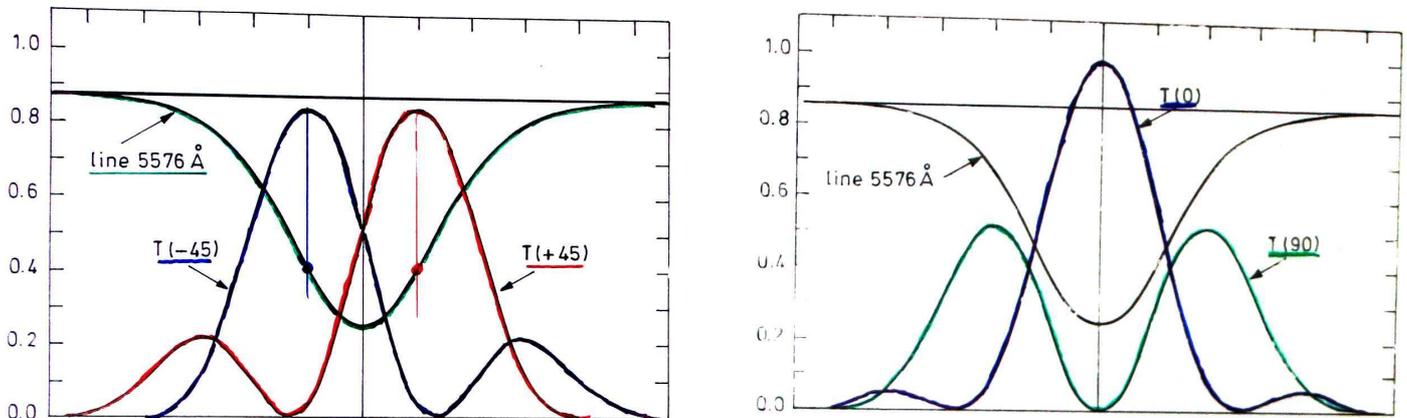
L'instrument FPSS monté sur le télescope de 1 m de Meudon en 1975. On voit, déporté sur la droite, le spectroscopie de contrôle.

Historique du FPSS

L'instrument FPSS a été conçu par Audouin Dollfus à partir de 1965 et réalisé à Meudon. Il a été monté au foyer de l'objectif dit « de Schaer » de 28 cm de diamètre. La lunette était alors fixée sur le tube du télescope de un mètre de Meudon qui ne servait alors que pour son entraînement équatorial. A partir de 1975, les premières observations concernaient l'imagerie de la chromosphère dans l'hydrogène à différents niveaux, l'imagerie des vitesses radiales dans la photosphère puis la cinématographie des oscillations de la photosphère.

En 1984 les premières cartes du champ magnétique longitudinal dans la photosphère ont été établies. A partir de 1988, les caméras CCD ont remplacé l'imagerie argentique. On a pu dresser des cartes vectorielles du champ transversal dès 1990. En 1992, le FPSS a été transféré au pic du Midi pour l'installer au foyer de la lunette Jean Rösch de 50 cm de diamètre. Il a été exploité par Richard Muller, Jacques Moity et Audouin Dollfus jusqu'en 1997. Les derniers travaux portaient sur l'analyse des points brillants magnétiques dans la photosphère qui avaient été mis en évidence par les images photographiques à haute résolution angulaire dans la bande G (430.5 nm) dues à R. Muller.

L'instrument a ensuite été démonté puis partiellement rapatrié à Meudon où il est conservé dans la collection patrimoniale.



Profil spectral de la raie 5576Å.

A gauche : transmission $I(+45)$ en rouge et $I(-45)$ en bleu.

A droite : transmission $I(0)$ en bleu et $I(90)$ en vert.

Le modulateur spectral

Cet organe est placé entre le filtre principal à 0.6 Å et l'élément à 0.15 Å du FPSS. Composé d'une croix de Malte à 8 positions commandée par un pignon, il porte en son centre une lame $\frac{1}{4}$ d'onde achromatique. La lumière incidente polarisée linéairement traverse d'abord une lame $\frac{1}{4}$ d'onde achromatique fixe qui la transforme en polarisation circulaire. Elle traverse ensuite la lame $\frac{1}{4}$ d'onde tournante qui restitue la polarisation linéaire mais dans l'un des 8 azimuts défini par la position de la croix de malte. La position 0° est réglée pour donner une image $I(0)$ avec le filtre centré sur l'axe d'une raie spectrale. La croix de malte permet ensuite l'obtention d'images en position $I(+45^\circ)$ dans l'aile rouge et $I(-45^\circ)$ dans l'aile bleue. L'image $I(90^\circ)$ isole deux bandes symétriques d'intensité moitié de part et d'autre de la raie.

La combinaison d'images $[I(+45) - I(-45)] / [I(+45) + I(-45)]$ donne une représentation des vitesses radiales. (A la condition toutefois que les signaux soient superposables, ce qui dépend de la turbulence.)

La combinaison $[I(90) - I(0)] / [I(90) + I(0)]$ donne l'image de l'intensité de la raie.

Un sélecteur de polarisation stokesmètre permet d'établir des images du champ magnétique.

Le sélecteur de polarisation stokesmètre

Pour aborder ce paragraphe, nous invitons le lecteur non initié aux techniques de la polarimétrie à lire le texte sur les paramètres de Stokes dans le chapitre consacré à THEMIS.

A l'instar du modulateur, le sélecteur de polarisation est composé de deux bagues tournantes portées chacune par un mécanisme de croix de Malte qui permet de les orienter respectivement selon huit positions. La première bague porte une lame $\frac{1}{4}$ d'onde achromatique et la seconde, une lame $\frac{1}{2}$ onde achromatique elle aussi. Un dispositif mécanique permet d'orienter les bagues pour isoler la lumière polarisée au choix selon l'une des six composantes de Stokes $+Q$, $-Q$, $+U$, $-U$, $+V$ ou $-V$ caractérisant l'état de polarisation de la lumière.

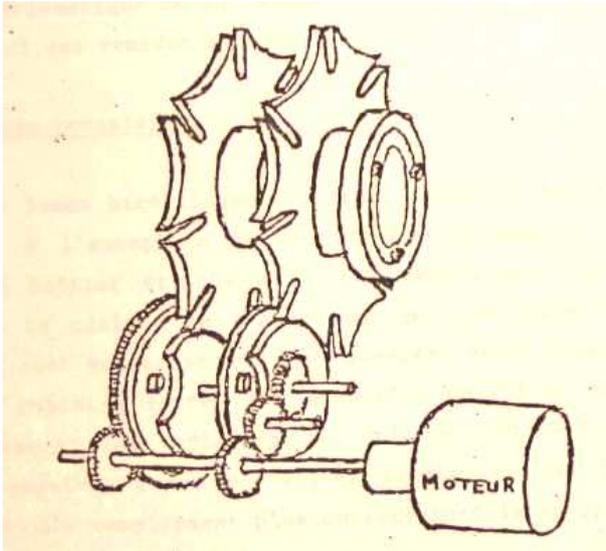
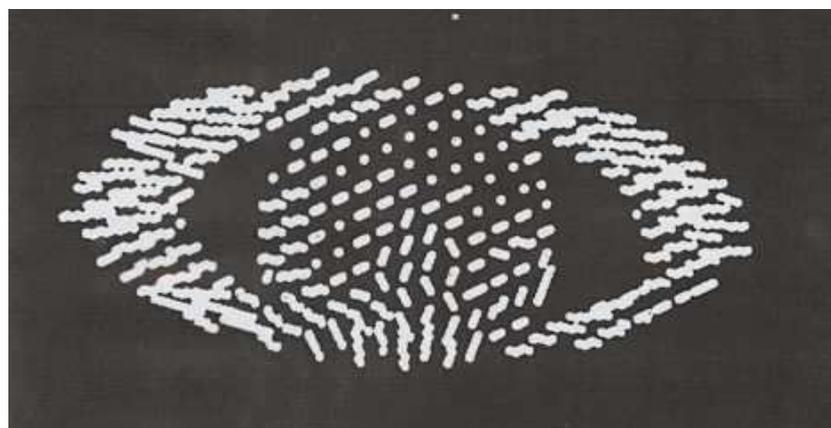
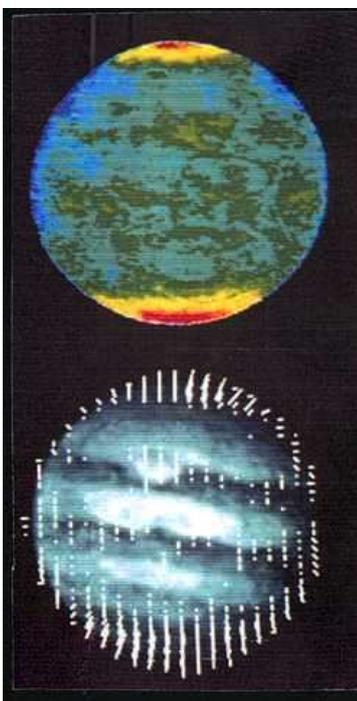


Schéma du Stokesmètre. Placé devant le filtre polarisant solaire sélectif FPSS, l'appareil donne des images de la surface solaire dans les composantes de Stokes de la lumière polarisée. Lorsque le filtre isole une raie sensible à l'effet Zeeman lié au champ magnétique, les combinaisons de clichés donnent l'image du champ magnétique à la surface du Soleil. On peut ainsi en déterminer les composantes longitudinales et transversales du champ magnétique.

Le stokesmètre n'a pas été utilisé qu'avec le FPSS, il a également été placé devant un polariseur et une chambre photographique digitale pour produire des images en lumière polarisée. Le montage **caméra vidéo-polarimétrique** fournissait des images du champ visé dans les différents états de polarisation de la lumière. Cette possibilité intéressait beaucoup les militaires qui ont financé une partie de ce programme scientifique. Le **vidéo-polarimètre-planétaire** se montait au foyer d'un télescope. Il donnait des images des planètes dans la lumière polarisée qu'elle produisent, en intensité polarisée ou en champ de vecteurs polarisation.



A gauche, Jupiter le 27 janvier 1989. Polarisation linéaire.

Au dessus, Saturne en polarisation linéaire.

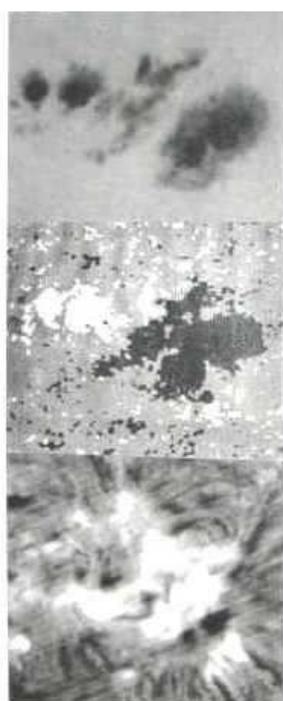
Vidéo-polarimètre planétaire, télescope de 1 m de Meudon.

Les résultats scientifiques du FPSS

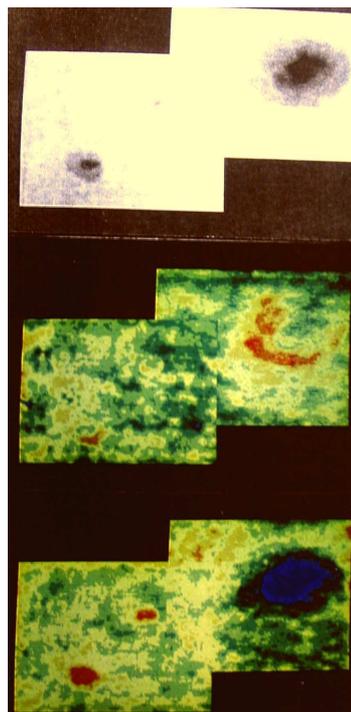
Le FPSS a donné des résultats scientifiques originaux qui ont fait l'objet de plusieurs publications. Afin d'illustrer les applications scientifiques de cet instrument, nous allons retranscrire un résumé extrait d'un compte-rendu de l'Académie des sciences.

Cartographie détaillée de paramètres physiques de la photosphère par imagerie monochromatique. Note de Audouin Dollfus, Daniel Crussaire, Etienne Pernod et Alain Lioure, présentée par Gérard Wlérick en 1986.

« La lunette de l'Observatoire de Meudon associée au filtre polarisant solaire sélectif permet d'obtenir des images du Soleil en isolant, par un jeu de modulation de la bande spectrale transmise, le fond d'une raie spectrale, l'une ou l'autre de ses deux ailes, les pieds de part et d'autre de la raie ou le fond continu voisin. Des combinaisons entre de tels clichés produisent des jeux d'images cartographiant la profondeur de la raie spectrale ou bien sa largeur à mi-profondeur, ou bien les vitesses de déplacement de la matière solaire, ou bien encore la magnétisation dans la direction de l'observateur pour le milieu solaire concerné. Ces données numériques et calibrées sont obtenues sans fentes, orifices ou discrétisation initiale, ni balayage, mais à partir de clichés directs à courte pose; ils présente la finesse de l'image télescopique et permettent d'accéder à des détails fins. Sur les clichés obtenus à Meudon, des structures de magnétisme ou de vitesse sont mises en évidence avec une finesse de 1000 km à la surface solaire. Le 2 septembre 1984, une discontinuité de polarité et de vitesse entre les taches d'un même groupe révèle des gradients magnétiques et de vitesse de 450 G et 300 m/s sur 1000 km, générateurs d'une éruption chromosphérique. »

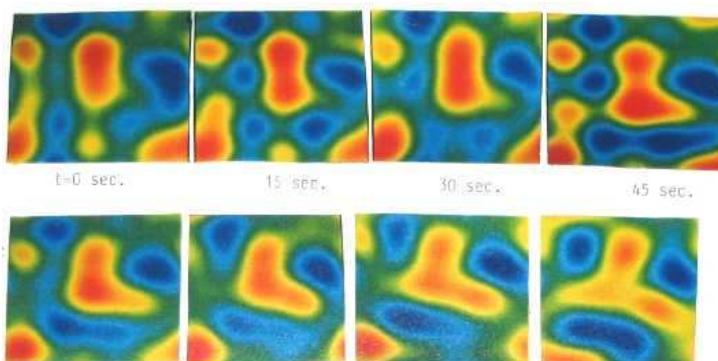


Observation du 2 septembre 1984.
En haut, l'image de la région active.
Au centre, carte du champ magnétique.
En bas, la même région dans la chromosphère.



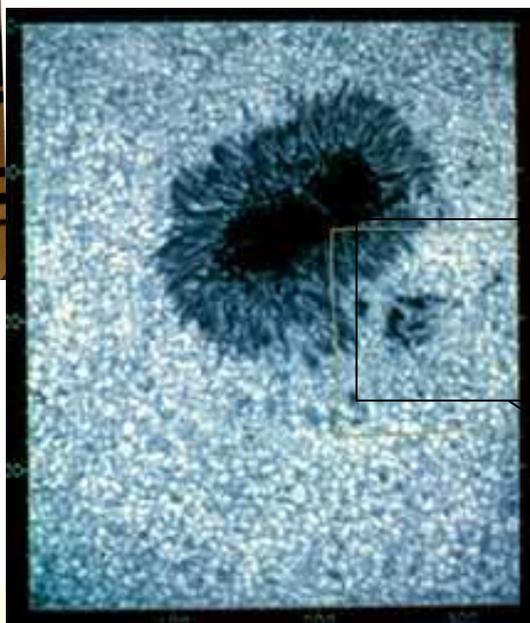
Observation du 13 juillet 1990.
En haut, image de la région active.
Au centre, carte des vitesses radiales.
En bas, carte des champs magnétiques.

Le FPSS a également permis de mettre en évidence par l'imagerie les oscillations de la photosphère. En illustration, cinématographie des oscillations le 15 juillet 1991.

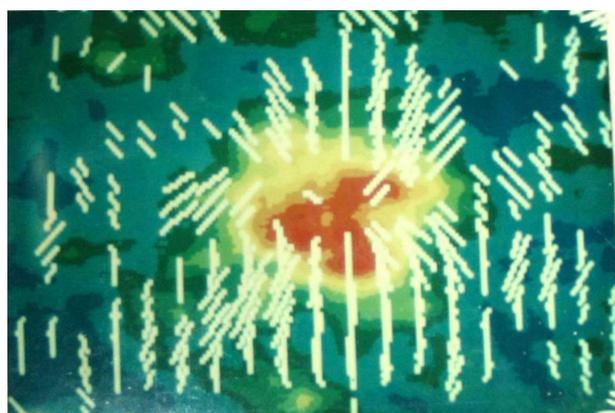




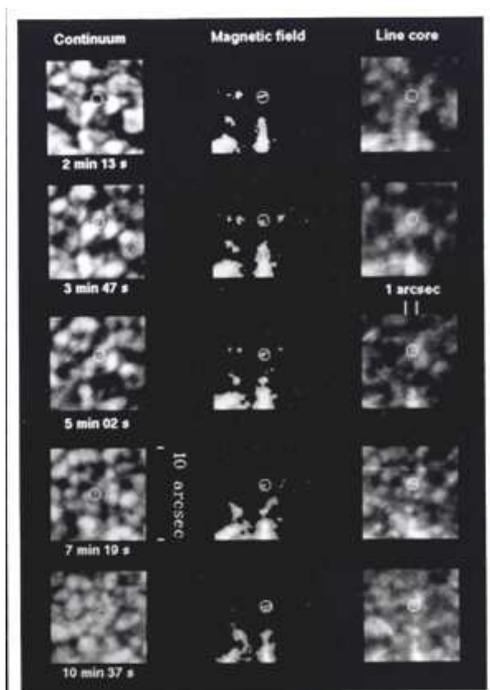
L'instrument FPSS monté le long du berceau de la lunette Jean Rösch au pic du Midi en 1992.



Cette image d'une grande finesse prise au pic du Midi le 7 novembre 1992 montre des taches et la granulation photosphérique dans la raie D1 du Sodium. La petite vignette donne le champ longitudinal d'une partie de l'image.



Champs magnétiques dans un centre actif solaire le 30 avril 1990. En fausses couleurs, le champ longitudinal. Le champ magnétique transversal est matérialisé par ses vecteurs.



Séquence cinématographique, points brillants et champs magnétiques. A gauche, photosphère basse. Au centre, champ magnétique vertical et à droite, photosphère haute au fond de la raie 6173Å.

Le FPSS a été un instrument très original et malgré sa relative complexité mécanique et optique, il était assez simple dans son emploi, compact et très polyvalent. Il avait le mérite de pouvoir donner de nombreuses informations scientifiques sur une même région solaire, à différentes altitudes sans avoir l'encombrement d'un grand spectrographe. Après le départ en retraite d'Audouin Dollfus, les astronomes de Meudon ont préféré développer la spectropolarimétrie pour la mesure des champs magnétiques et le DPSM (voir plus loin). Le principe du FPSS a été repris dans d'autres filtres aux États-Unis. Le télescope THEMIS (voir plus loin) a été équipé d'un filtre de type Fabry-pérot (et nom de Lyot comme le FPSS) muni d'un analyseur de polarisation.

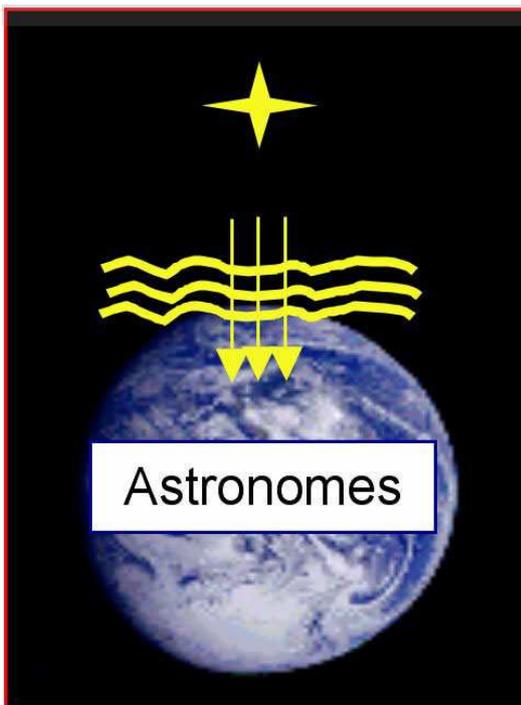
La tour solaire

Majestueusement dressée à l'orée du bois, la tour solaire de l'observatoire de Meudon est un bâtiment énigmatique pour la plupart des habitués du site. Rares sont les privilégiés qui ont eu la chance d'y observer le Soleil ou même d'admirer la capitale du haut de ses 35 mètres. La tour est pourtant l'un des instruments solaires les plus performants au monde avec son spectrographe de 14 mètres et son télescope de 60 centimètres de diamètre. Elle est encore un outil de recherche et d'enseignement de grande valeur pour la communauté solaire française.

La tour solaire est née des progrès de la géodésie spatiale et de l'observation des satellites artificiels qu'avait entrepris Paul Muller à la fin des années cinquante. Il fallait disposer d'une plateforme d'observation dominant la forêt et disposant d'un horizon à 360°. Un projet de château d'eau sur le site de l'observatoire a été modifié pour créer une tour d'observation capable de recevoir un théodolite. En 1958, R. Michard et G. Wlérick concevaient un projet de tour solaire dans la partie sud de l'observatoire qui dominait la forêt à 35 mètres de haut. Le chantier commença en octobre 1963 pour s'achever en avril 1967. Le coût total de la tour solaire aura été de trois millions de francs, ce qui est particulièrement bas pour une installation de cette envergure.

L'intérêt des tours solaires

Entre le Soleil et nous, il y a la plus mauvaise partie de l'instrument, l'atmosphère. Celle-ci n'est pas une couche homogène comme une lame de verre optique mais un milieu turbulent dans lequel les rayons lumineux subissent de nombreuses déviations aléatoires et des déphasages.



On appelle paramètre de Fried, noté r_0 le diamètre qu'aurait un instrument dont la tache de diffraction ne serait pas altérée par la turbulence atmosphérique. La résolution angulaire d'un instrument de grand diamètre varie en fonction de λ/r_0 et non λ/D .

Dans un site de plaine, comme la pelouse de l'observatoire de Meudon, le paramètre de Fried est compris entre 3 et 7 cm. Au sommet de la Tour solaire, il avoisine les 10 cm de jour. Dans un site exceptionnel, comme au pic du Midi, il peut dépasser 20 cm.

Les couches les plus turbulentes de notre atmosphère siègent au niveau du sol. Les rayons du Soleil chauffent le sol et produisent une agitation très forte des images que l'on visualise parfaitement au dessus d'une route par une belle journée d'été. A partir d'une vingtaine de mètres d'altitude, l'air est nettement plus stable et propice à l'observation du Soleil. La première tour solaire est celle du Mont Wilson, aux Etats-Unis qui a été construite en 1908 elle mesure 150 pieds de haut (environ 50 m). C'est grâce à cette tour que Babcock a pu réaliser le premier magnétographe. Elle est en service quotidiennement pour des observations systématiques de la photosphère.

Il existe de nombreuses tour solaires de par le Monde. Celle de Kitt Peak dans l'Arizona n'est pas verticale mais polaire, il renvoie le faisceau dans une direction parallèle à l'axe du monde. Le télescope solaire suédois de un mètre de diamètre est conçu sur le principe de la tour et a délivré les plus fines images jamais réalisées sur Terre. Le sommet d'une tour solaire est souvent équipé d'un coelostat (ou sidérostat polaire) qui renvoie la lumière dans le tube du télescope qui est disposé verticalement ou obliquement. Les instruments modernes comme THEMIS, ou GREGOR doivent être dépourvus de polarisation. Ils sont au sommet de la tour.



La tour solaire du Mont Wilson



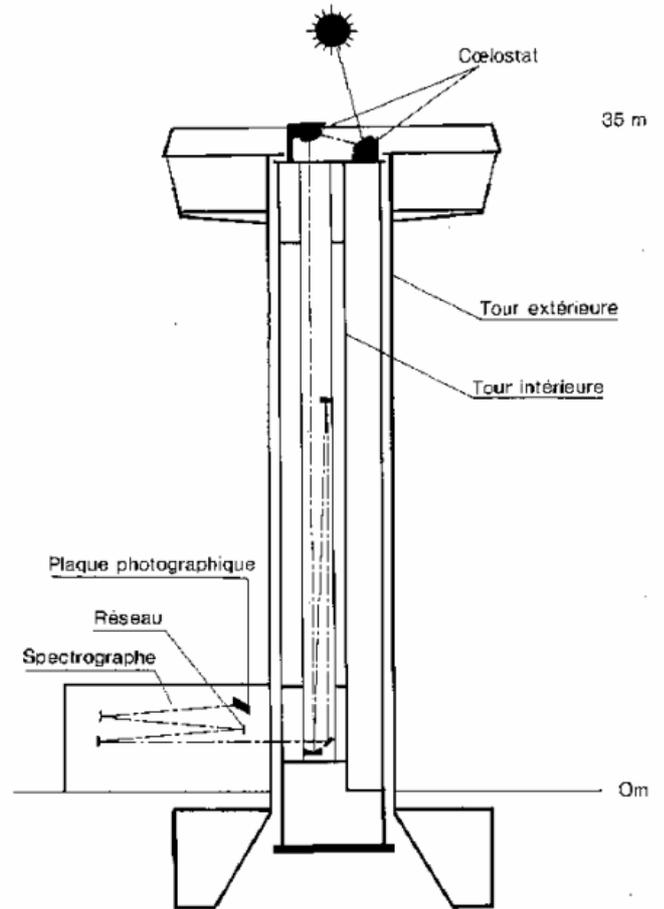
La tour de Kitt Peak

Le bâtiment de la tour de Meudon est composée d'une structure extérieure qui protège l'instrument du vent et d'une tour intérieure qui contient le télescope. La terrasse est très large car des bureaux ont été disposés en couronne dans la partie supérieure. Elle est peinte en blanc pour réfléchir la lumière du Soleil et éviter l'échauffement du sol. Le coelostat est composé de deux miroirs. Le primaire, d'un diamètre de 80 cm est mu par un moteur électrique sur son axe parallèle à l'axe du Monde. Le secondaire, de 70 cm peut monter ou descendre selon la hauteur du Soleil dans le ciel. Il renvoie la lumière dans le puits vertical contenant le télescope. L'entrée du tube est fermé par une lame à face parallèles de 60 cm de diamètre.

Le miroir primaire du Télescope, d'un diamètre de 69 cm et d'une distance focale de 45 mètres est placé au bas de la tour. Le faisceau est coudé une première fois par un miroir plan de 45 cm à mi-hauteur et légèrement déporté par rapport au primaire qui travaille ainsi hors axe. Le faisceau est coudé une seconde fois par un plan de 50 cm incliné à 45° qui le dirige vers la salle d'observation après avoir traversé une seconde lame de fermeture qui assure ainsi la fermeture du tube. Pour réduire au mieux les risques de turbulence instrumentale à l'intérieur du télescope, des radiateurs électriques placés dans la partie haute assurent un gradient de température constant. Ils limitent ainsi la convection. Comme nous le voyons, l'instrument est optimisé pour la haute résolution angulaire. La résolution théorique vaut 0.25 secondes d'arc. Les premières images, obtenues à partir de 1969, révélèrent des détails très fins sur le Soleil.



La tour solaire avec les bureaux qui lui donnent cet aspect énigmatique.



Disposition générale de la tour avec le télescope verticale et le spectrographe au rez de chaussée.



Le coelostat sur la terrasse. Un dôme amovible permet d'abriter le coelostat quand il n'est pas utilisé. Toutes les pièces sont peintes en blanc pour réduire l'échauffement du aux rayons solaires. Le miroir primaire est monté sur rails pour être décalé vers l'est ou l'ouest.

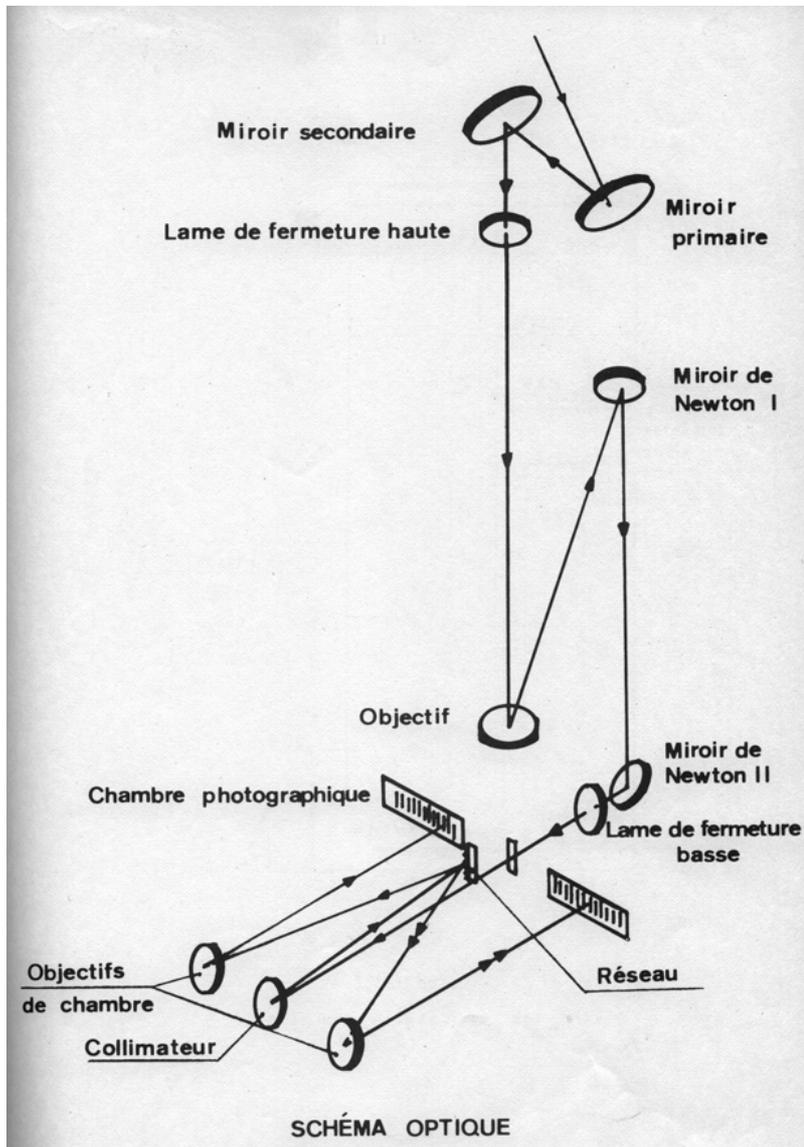


Schéma optique de la tour et de son spectrographe.

Celui-ci a été prévu pour la haute résolution spectrale. Le collimateur et les objectifs de chambre ont une focale de 14 mètre. Avec un réseau à 300 traits/mm la résolution est de 300000. Le montage à deux miroirs de chambre permet d'élargir le domaine spectral utilisable. Le spectrographe avait été prévu pour être équipé de caméras électroniques de Lallemand. Une cathode exposée à la lumière émettait des électrons qui étaient focalisés par une optique électronique sur une plaque photo. Cette caméra était difficile à mettre en œuvre et nécessitait un local situé au sous-sol de la tour. A partir des années 80, les caméras CCD ont définitivement remplacé la caméra électronique.

Dans les premières années d'utilisation de la tour, à partir de 1969, quelques observations stellaires ont également été tentées. Paul Felenbok a réussi à faire des spectres d'étoiles brillantes très détaillés autour des raies H et K du calcium.

La tour a donné lieu à de très nombreuses publications entre 1971 et 1991. Elle a ensuite été utilisée de façon occasionnelle car les astronomes de Meudon construisaient le télescope THEMIS. Depuis 2007, après le départ en retraite de Christian Coutard qui en était le responsable, c'est Guillaume Molodij qui en assure la gestion. Avec Jean-Mairie Malherbe et Jacques Moity, ils proposent un enseignement de la spectropolarimétrie pour les étudiants de Mastère. La tour est aussi utilisée pour des travaux scientifiques à l'occasion des campagnes d'observations coordonnées. En avril 2007, des observations faites à la tour ont permis une calibration précises des images du satellite japonais HINODE (Solar B). La tour est équipée depuis février 2008 d'un polarimètre à cristaux liquides pour mesurer les champs magnétiques et un projet de perfectionnement du DPSM par des fibres optiques est à l'étude. Sans bénéficier de la qualité du ciel du Pic du Midi ou de Ténérife, la tour solaire de Meudon permet aux chercheurs et aux enseignants du site d'utiliser sur place un instrument performant et immédiatement disponible, ce qui est précieux.

Les avantages de la tour solaire:

- Grande disponibilité.
- Très grande résolution spectrale.
- Résolution spatiale optimale pour le site.
- Possibilité d'adapter de nouvelles expériences.
- La tour reste un instrument performant pour la communauté solaire.
- Outil pédagogique de premier choix.

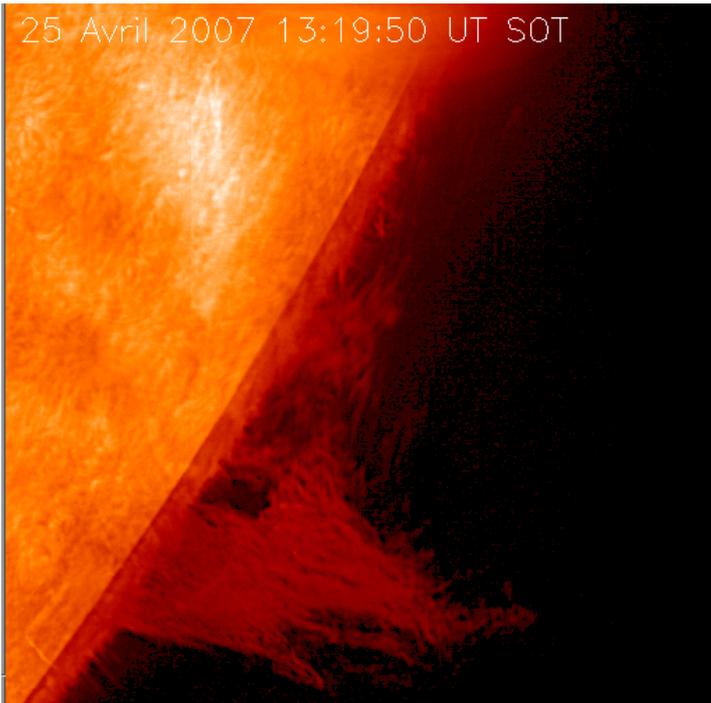


Image SOLAR B (Hinode SOT)

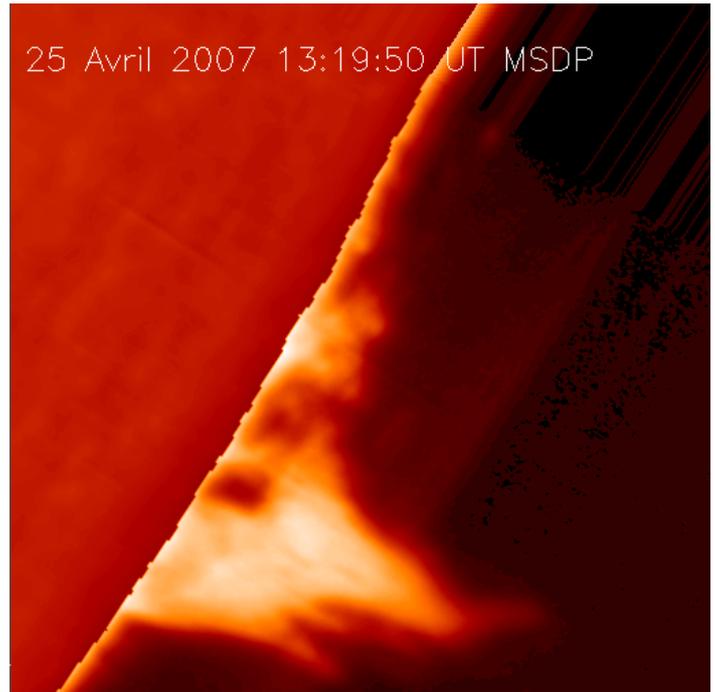
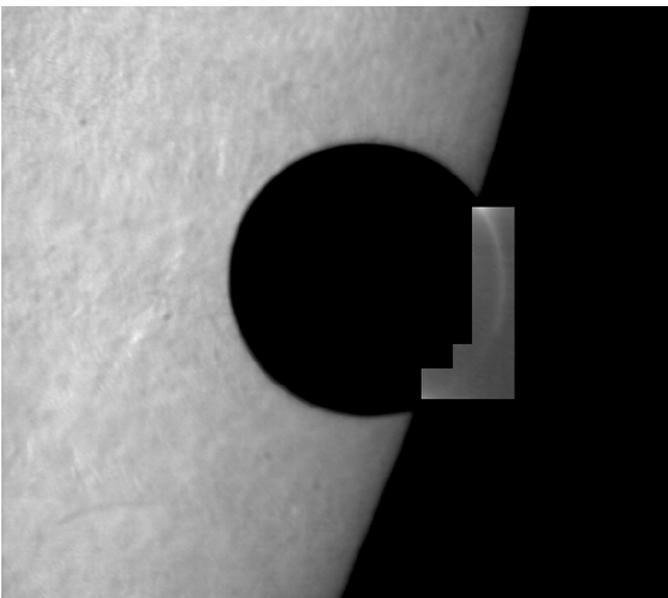
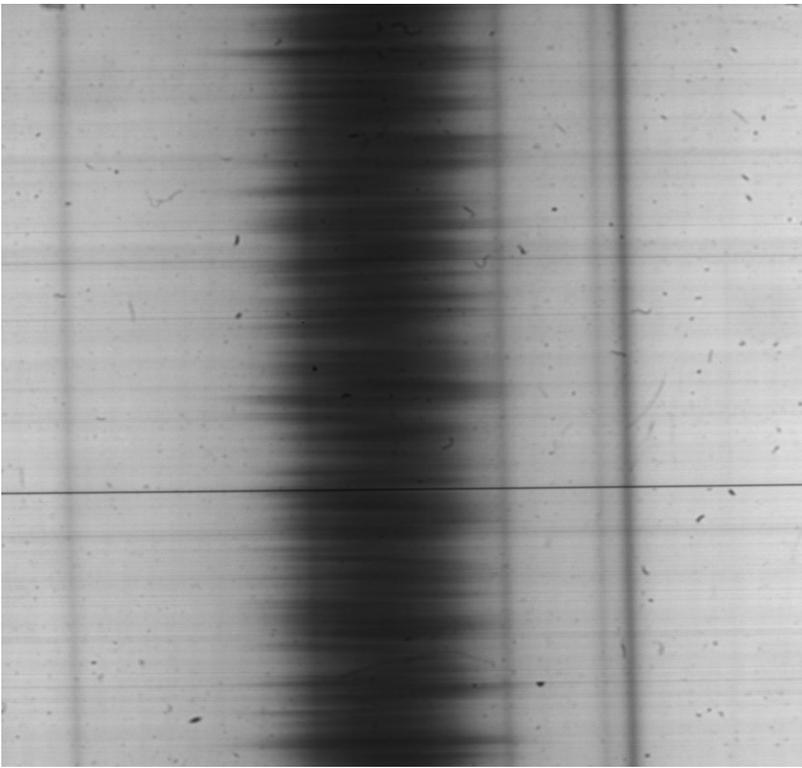


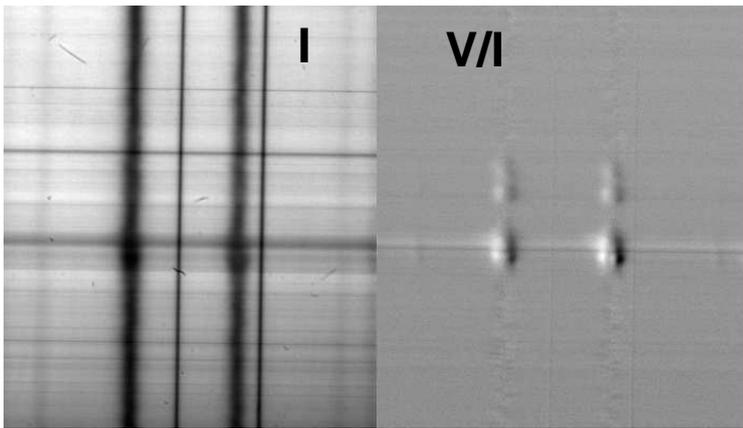
Image tour pour calibration
Image G. Molodij, B. Schmieder, J. Moity, F. Dauny



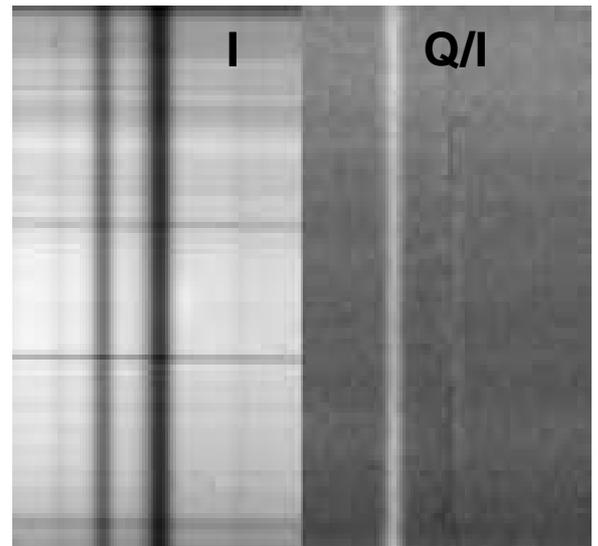
Passage de Vénus le 8 juin 2004
Images J.M. Malherbe sur caméra CMOS 1024X1280, traitement G. Molodij
Cette image a été traitée pour faire ressortir le liseré brillant dû à la lumière diffusée dans l'atmosphère de la planète Vénus.



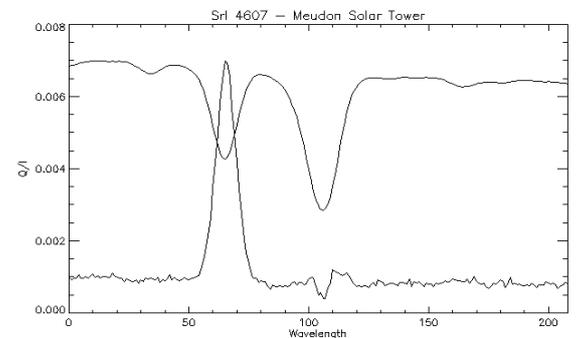
La raie H α à 6563Å photographié au spectrographe de la tour solaire. Les irrégularités du bord de la raie sont dues aux mouvements des petites structures solaires qui décalent la raie par effet Doppler.



Raies Fe I 6301/6302Å en polarisation circulaire sur une petite tache.



Travaux de spectroscopie et de spectropolarimétrie avec le polarimètre à cristaux liquides réalisés par Jean-Marie Malherbe au spectrographe de la tour solaire en 2008.



Spectre de Srl 4607Å en polarisation linéaire près du limbe.

Le Double Passage Soustractif Multical

Observation des champs de vitesse solaires

Pour mesurer les mouvements des structures solaires, il faut faire appel à la spectroscopie et mesurer les déplacements Doppler des raies. Une raie spectrale du Soleil n'est jamais infiniment fine car en plus des effets quantiques et de la température qui l'élargissent, les mouvements de la matière solaire lui donne un effet de zigzag. Un spectrographe muni d'une fente n'observe simultanément qu'une ligne sur le Soleil. Pour effectuer une mesure sur une surface, il faut la balayer perpendiculairement à la fente. La mesure n'est pas simultanée et dépend du temps de balayage. On peut aussi prendre plusieurs images avec un filtre très sélectif que l'on décale légèrement en longueur d'onde. La mesure n'est toujours pas simultanée car il y a un décalage temporel entre les prises de vue. La rapidité de l'évolution des structures solaires demande des mesures simultanées sur un grand champ. Pour surmonter cette difficulté, Pierre Mein a mis au point la spectro-imagerie par double passage soustractif.

La solution adoptée à la tour de Meudon consiste à faire passer deux fois le faisceau sur le réseau, une première fois pour décomposer la lumière d'une fenêtre (et non d'une fente) et la seconde fois pour soustraire la dispersion et reformer une image.

L'instrument appelé « Double Passage Soustractif Multicanal » ou DPSM fonctionne de la façon suivante:

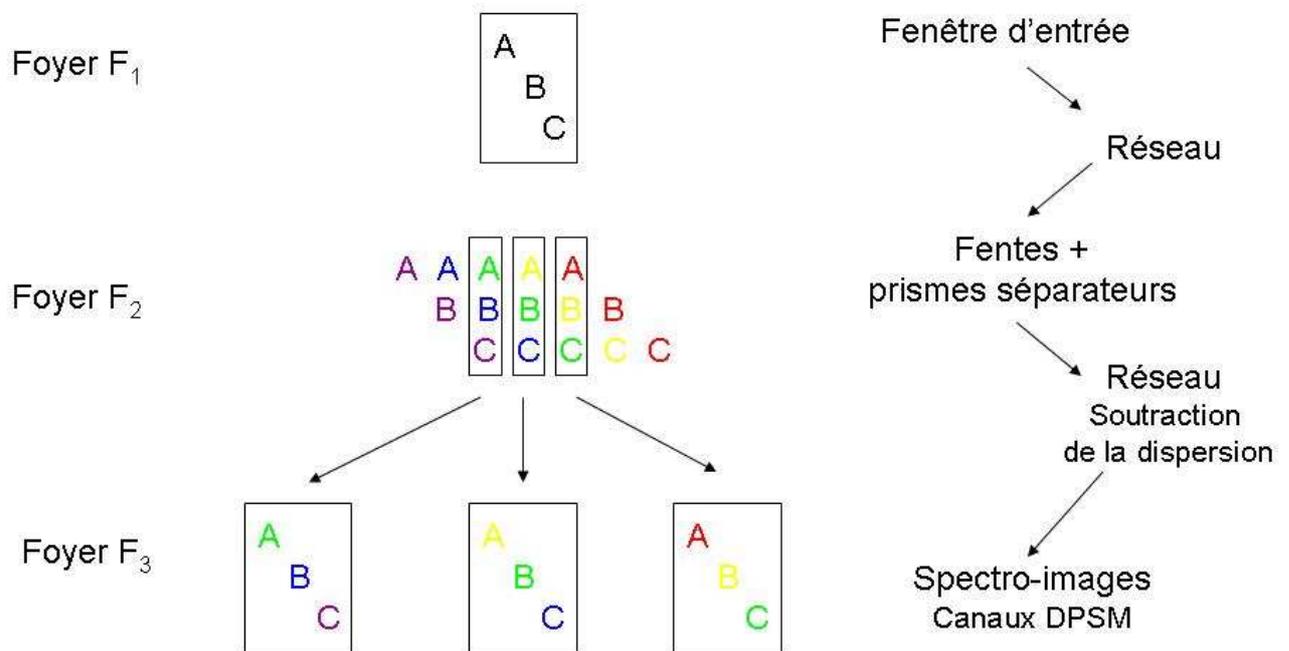
Au foyer F1 du télescope est placée une fenêtre dans l'image solaire qui sélectionne un champ rectangulaire. Dans l'illustration, les détails solaires sont symbolisés par les lettres A, B et C. L'image directe est un mélange de toutes les couleurs. Après passage sur le collimateur C1, le réseau R et l'objectif de chambre C2, la lumière forme au foyer F2 une image floue dans laquelle chaque lettre est remplacée par un spectre qui s'étend du violet au rouge. Si on renvoyait ces spectres vers le réseau directement, on obtiendrait une image identique à celle du foyer F1. Le DPSM reconstruit des images monochromatiques décalées en longueurs d'onde, ce qui permet de reconstituer le profil de la raie spectrale. Pour cela, on place au foyer F2 une série de fentes parallèles. Dans le schéma, on a réduit à 3 fentes pour simplifier. La première fente sélectionne les photons verts de la lettre A, les bleus de B et les violets de C. La seconde fente les photons jaunes, verts et bleus des mêmes lettres et la troisième les photons rouges, jaunes et verts. Derrière ces fentes, des prismes permettent de translater les faisceaux issus des fentes sans les défocaliser. Ils sont ensuite renvoyés vers l'objectif de chambre C2. Après passage sur le réseau et le collimateur, on obtient 3 images au foyer F3. Ces images sont décalées par les prismes et chacune d'elles est composée de photons particuliers. Grâce aux 3 canaux, on reconstitue une partie du spectre de chacune des lettres A, B et C.

Vert, jaune, rouge pour A.

Bleu, vert, jaune pour B.

Violet, bleu, vert pour C.

On constate que : L'écartement des fentes détermine la résolution spectrale, le champ est celui de la fenêtre au foyer F1 et la finesse des images n'est pas affectée par la largeur des fentes mais seulement limitée par la diffraction ou le paramètre de Fried.



Principe du DPSM à 3 canaux. Image ABC donné par le télescope au foyer F₁, fentes sélectrices au foyer F₂ après passage sur le réseau. Au foyer F₃, spectro-image de 3 canaux donnant 3 points du spectre pour chaque point de l'image ABC.

La largeur de la fenêtre d'entrée du spectro détermine la largeur spectrale des canaux. La séparation des canaux donne la résolution spectrale.

DPSM (Pierre Mein)

Séparateur de faisceaux pour spectrographie par Double Passage Soustractif Multicanal. Ce séparateur de faisceaux est placé au premier foyer du spectrographe. Il comprend une grille de 9 fentes, suivie d'un ensemble de prismes à réflexion totale. Ces prismes translatent les faisceaux tout en maintenant la focalisation des images.

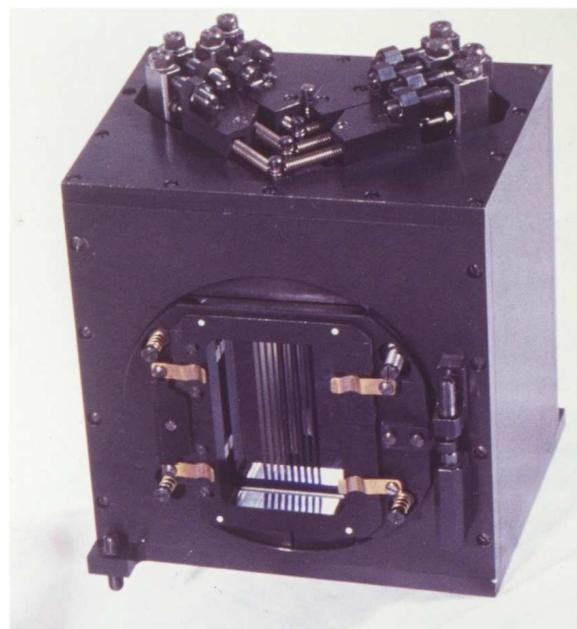
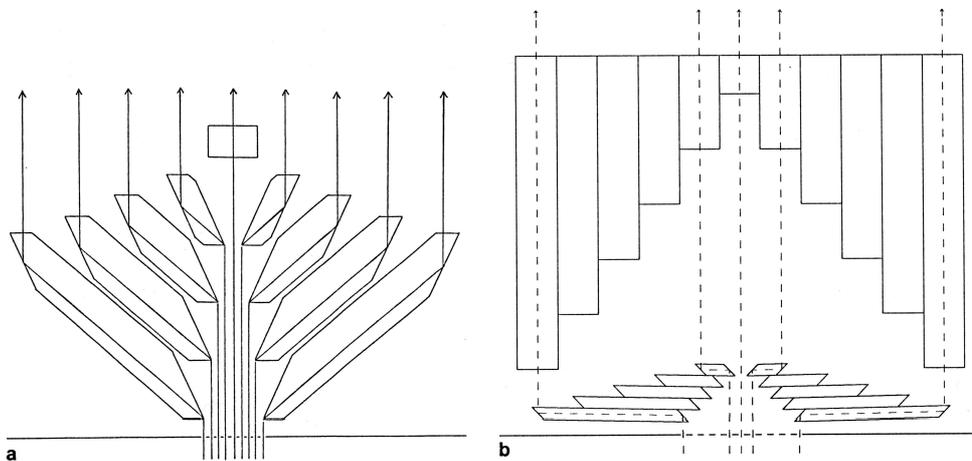
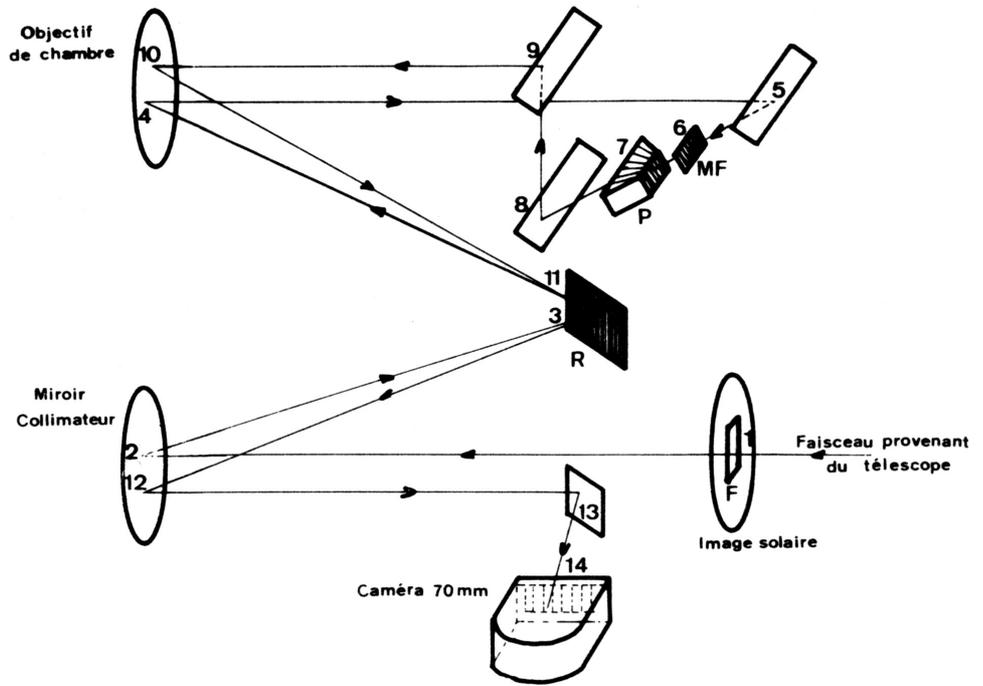
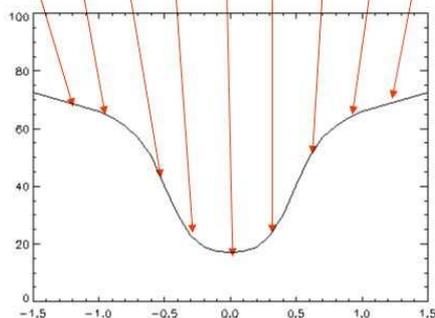
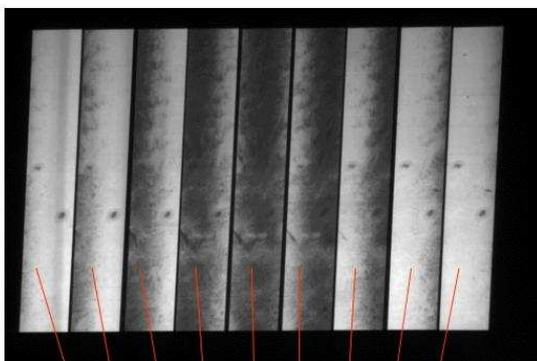


Schéma optique du DPSM avant l'utilisation d'une caméra CCD.

F = fenêtre d'entrée
 R = réseau
 2, 12, 4, et 10 = réflexion sur les miroirs sphériques.
 5, 8, 9 et 13 = réflexions sur les miroirs plans.
 MF = grille.
 P = prismes.



**a) Séparateurs de faisceaux à 9 canaux,
 b) Séparateur de faisceaux à 11 canaux pour une résolution spectrale plus élevée.**

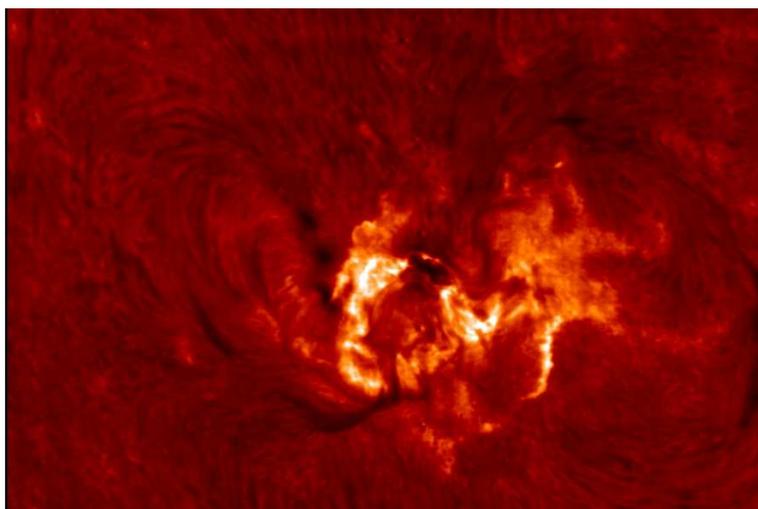


Les 9 canaux d'une spectro-image DPSM centrée sur la raie H α et la reconstitution du profil de la raie en chaque point du champ d'après une observation de Guillaume Molodij. Champ d'un canal 1'X8'. Champ possible de l'image 5'X8' avec les prismes de champ qui sont disposés avant la fenêtre et permettent un balayage de l'image.

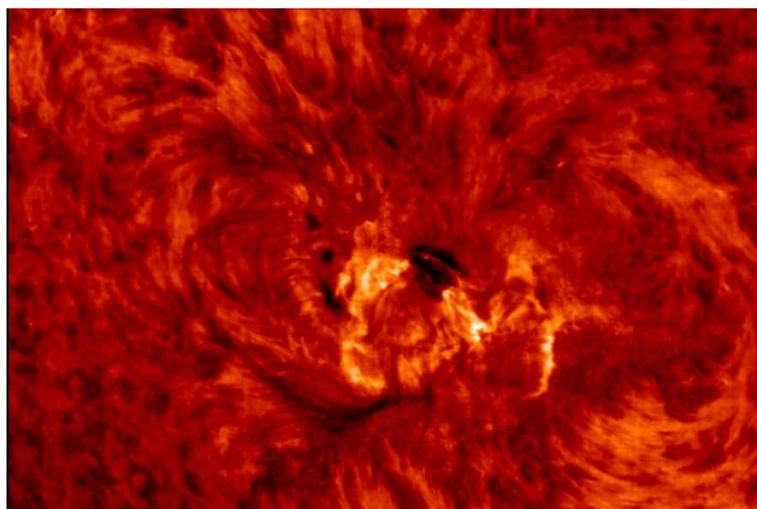
1canal=0.09nm
 Séparation=0.03nm

Exemple d'observation de la dynamique des structures fines de la chromosphère.

Pour illustrer l'utilisation du DPSM à la tour solaire, nous allons prendre une observation effectuée par Jean-Marie Malherbe le 11 septembre 2005. Ces images représentent un champ de 5 minutes par 7 minutes par juxtaposition de 5 spectro-images successives. La carte **a** représente l'intensité au centre de la raie $H\alpha$, où l'opacité est maximale. Nous voyons ainsi les parties les plus hautes de la chromosphère. La carte **b** est une moyenne entre les intensités calculées à $+0.046$ nm et -0.046 nm du centre de la raie. On y distingue des structures plus basses de l'atmosphère solaire, là où l'opacité est plus faible. Ces structures apparaissent façonnées par les champs magnétiques et non plus dominées par la convection comme au niveau photosphérique. La carte **c** présente la différence entre les intensités calculées à $+0.046$ nm et -0.046 nm du centre de la raie. Si l'intensité est plus grande dans l'aile rouge que dans l'aile bleue (pour une raie en absorption), cela signifie que la raie est décalée vers le bleu, donc que la matière s'approche de nous. Dans ce cas, les points sont portés en bleu et en rouge dans le cas contraire.

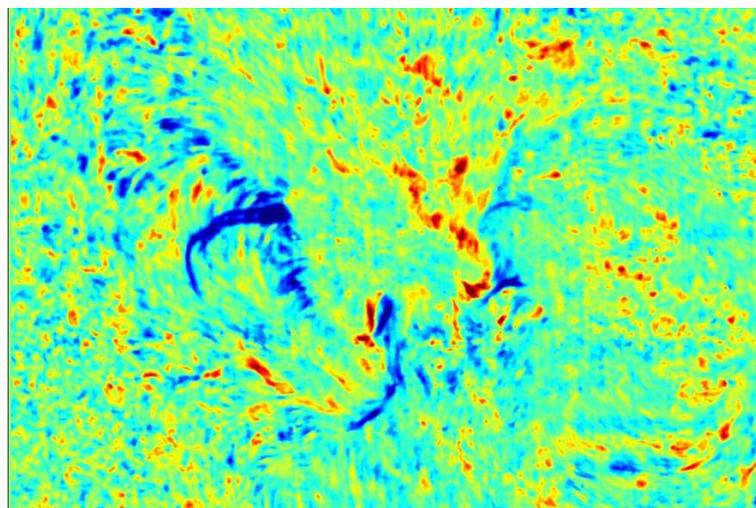


Carte a



Carte b

Carte a= centre raie $H\alpha$
Carte b= $(-0.046\text{nm})+(+0.046\text{nm})$
Carte c= $(-0.046\text{nm})-(+0.046\text{nm})$
Bleu=rapprochement
Rouge=éloignement



Carte c

Cette région était très active et a produit de nombreuses éruptions en quelques jours. On y distingue des taches. Sur les structures en filament, on a calculé des vitesses de matière de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde.

Après les excellents résultats obtenus à Meudon, des dispositifs de type DPSM ont été construits pour plusieurs spectrographes dont ceux de la lunette Jean Röscher au pic du Midi, le « Vacuum Tower Telescope » allemand, THEMIS à Ténérife ainsi qu'un télescope en Pologne (Wraclaw).

Le télescope THEMIS

Dans les années 70, la physique solaire est largement développée grâce aux observations de Meudon et au travail des théoriciens qui les ont exploitées. Les connaissances s'accumulent mais une réponse amenant une nouvelle question, il faut sans cesse affiner les mesures des champs magnétiques et des mouvements de la matière dans les régions actives.

En 1975, le pôle solaire de l'observatoire de Meudon publiait un projet complet sur l'établissement d'un instrument solaire dans les îles Canaries. Cet instrument que Jean Rayrole concevait devait permettre la mesure des champs magnétiques avec une grande précision. Le projet déboucha vingt ans plus tard pour offrir à la communauté solaire le Télescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires, ou plus simplement THEMIS.

Compte tenu de la complexité de cet instrument et de son actualité, nous n'en ferons qu'une description très sommaire. Il est toutefois important de comprendre la démarche scientifique qui a conduit l'équipe solaire de Meudon à l'étudier et à en assurer sa construction.

Les grands thèmes de la recherche solaire

-Génération, évolution et structure du champ magnétique. L'imagerie à haute résolution montre clairement qu'à l'exception des taches, le champ magnétique se concentre en régions de très petites dimensions, sous la forme de tubes de 0.2 secondes d'arc. Ces tubes sont, de par la pression magnétique qui s'ajoute à la pression gazeuse, moins denses que le milieu ambiant. Les chercheurs voulaient comprendre comment sont générés ces tubes magnétiques qui émergent dans la photosphère. On savait que le magnétisme solaire est produit dans les couches profondes du Soleil, au niveau de la Tachoclyne qui sépare la zone radiative profonde de la zone convective plus superficielle par un effet dynamo. Les structures observées sont plus chaudes de 1000° que la photosphère et présentent une intensité du champ magnétique de l'ordre de quelques centaines de Gauss, voire moins. Ces mesures dépendent de la raie spectrale dans laquelle elles sont établies. Pour établir un modèle d'atmosphère magnétique réaliste, il fallait donc des observations ayant une meilleure résolution angulaire, dans plusieurs raies simultanément et avec une étude complète de la polarisation dans ces raies.

-Le chauffage de la couronne solaire. Nous avons vu précédemment que l'observation de la couronne solaire a permis d'y mesurer une température de plus d'un million de degrés. En 1973, Skylab a fourni aux astronomes de très belles images en rayons X qui révélaient certaines structures du plasma coronal. Les données se sont accumulées et permettent de comprendre comment le vent solaire est diffusé selon les structures magnétiques de la couronne mais elles n'expliquent pas la brusque remonté de température dans la zone de transition entre la chromosphère et la couronne. En 1979, Brigitte Schmieder, Pierre et Nicole Mein ont réalisé un bilan énergétique qui prenait en compte le flux radiatif et l'énergie mécanique du Soleil liée aux oscillations mesurées. Bien que leurs travaux importants aient mis en évidence certaines propriétés de la propagation des énergies dans l'atmosphère solaire, ils étaient insuffisants pour rendre compte du chauffage de la couronne. L'équipe aurait aimé pouvoir disposer simultanément de cartes de champ magnétique dans la photosphère et la chromosphère ainsi que de cartes de champs de vitesses à plusieurs altitudes.

-Les courants électriques dans la couronne et les éruptions solaires. Une éruption est une libération brutale d'énergie magnétique. Cet événement spectaculaire propulse dans l'espace des électrons énergétiques à 1 Mev mais aussi dans une proportion moindre des électrons plus énergétiques à 10 Mev, des protons, du rayonnement H α , UV, EUV, des rayons X ainsi que des ondes de choc. Une éruption présente plusieurs phases qui sont l'agitation prééruptive (2 heures), le déclenchement (1 seconde), la phase de flash (10 minutes) et la phase principale (1 heure). On explique le déclenchement de l'éruption par l'accumulation d'énergie dans la couronne par les courants électriques et la reconnexion magnétique qui libère l'énergie.

Les chercheurs désiraient obtenir des cartes à trois dimensions du système de courants par la mesure des champs magnétiques. Il fallait pour cela un magnétomètre capable de mesurer les 3 composantes du champ magnétique.

-Physique des structures fines de la photosphère. Au pic du Midi, avec la lunette Jean Rösch, Richard Muller avait réalisé d'excellents travaux d'imagerie de la photosphères qui ont permis de mieux connaître certaines structures et d'en découvrir d'autres.

La *granulation* autour des taches solaires est légèrement plus petite que la granulation normale et présente certaines différences dynamiques qui semblent révéler un champ magnétique faible qui modifierait la convection. Les *filigrées* apparaissent comme des points brillants aux limites des *supergranules*. Ils sont dans les *intergranules* et ont une dimension inférieure à 0.3 secondes d'arc, soit moins de 250 kilomètres. Ils sont associés à des champs magnétiques très forts (1500 G). Les *facules* photosphériques sont des structures brillantes observées dans le continu vers le limbe. Elles sont granulaires et présente un fort excès de température. La *pénombre des taches solaires* est formée de grains brillants, alignés en filaments qui se détachent sur un fond sombre. Larges de 0.4 secondes d'arc, ils sont animés d'un mouvement dirigé vers l'ombre. On observe aussi dans l'ombre des taches des points brillants dont la nature est fortement discutée.

Ces objets nécessitent des observations à haute résolution angulaire que seul un instrument de grand diamètre pouvait fournir.

Le projet THEMIS

Les grands thèmes évoqués plus haut ont amené la communauté solaire française à imaginer un télescope solaire qui allie plusieurs qualités: Grande résolution angulaire, situation privilégiée et absence de polarisation instrumentale. Il fallait pouvoir mesurer les champs magnétiques, donc la polarisation dans les raies spectrales, sur des structures très fines de l'atmosphère du Soleil.

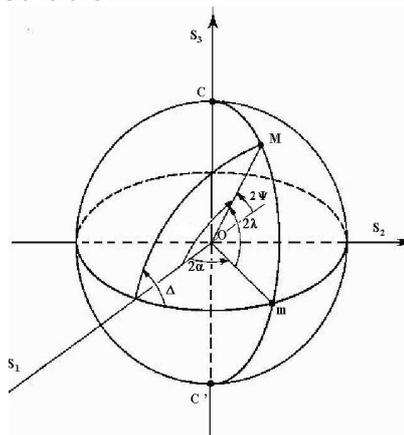
Jean Rayrole avait déjà une très grande expérience dans l'étude des champs magnétiques solaires grâce au magnétographe de Meudon. Malheureusement, l'utilisation d'un sidérostait introduit une forte polarisation linéaire qui limite considérablement les possibilités de l'instrument. Pour faire une analyse complète de la polarisation, il faut pouvoir déterminer les paramètres de Stokes de l'onde lumineuse.

Les paramètres de Stokes

Les paramètres de Stokes sont un ensemble de quatre valeurs qui décrivent l'état de polarisation d'une onde électromagnétique. Ces paramètres sont souvent notés sous la forme d'un vecteur et s'exprime en fonction de l'intensité totale du faisceau, son taux de polarisation et les paramètres de l'ellipse de polarisation. Ils permettent de décrire la lumière non polarisée, partiellement et totalement polarisée. Cette représentation vectorielle est adaptée à l'expérience car chaque paramètre correspond à une somme ou une différence d'intensités mesurable.

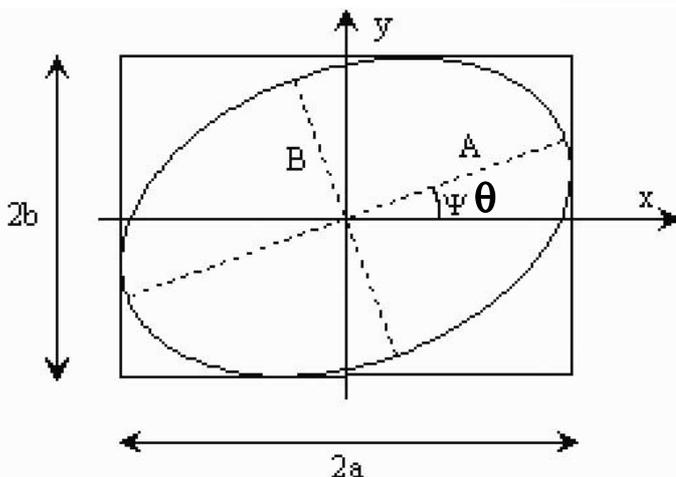
$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

Le vecteur de Stokes



$$\begin{aligned} S_0 &= I \\ S_1 &= I_p \cos 2\psi \cos 2\chi \\ S_2 &= I_p \sin 2\psi \cos 2\chi \\ S_3 &= I_p \sin 2\chi \end{aligned}$$

Expression du vecteur de Stokes en coordonnées sphérique.

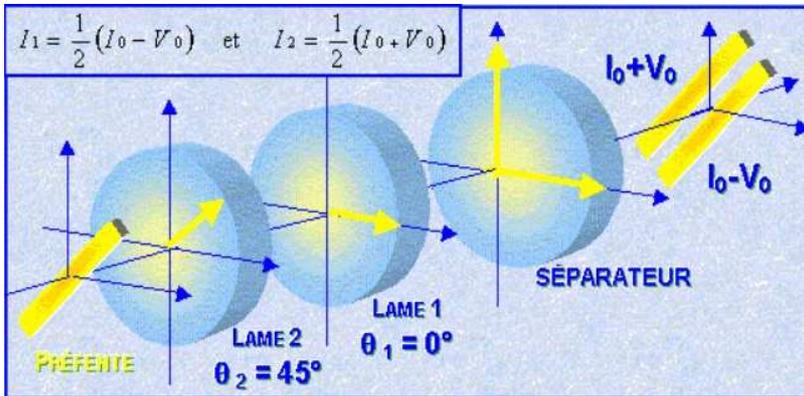


Ellipse de polarisation. On peut décrire la polarisation de l'onde par les paramètres d'une ellipse. Les paramètres de Stokes sont alors:

$$\begin{aligned} I_p &= A^2 + B^2, \\ Q &= (A^2 - B^2) \cos(2\theta), \\ U &= (A^2 - B^2) \sin(2\theta), \\ V &= 2ABh. \end{aligned}$$

- $I = 1, Q = U = V = 0$: La lumière est naturelle**
- $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$: La lumière est totalement polarisée**
- $V = 0$: La polarisation est rectiligne**
- $V = I, U = Q = 0$: Polarisation circulaire**
- $U = 0$: Polarisation elliptique**

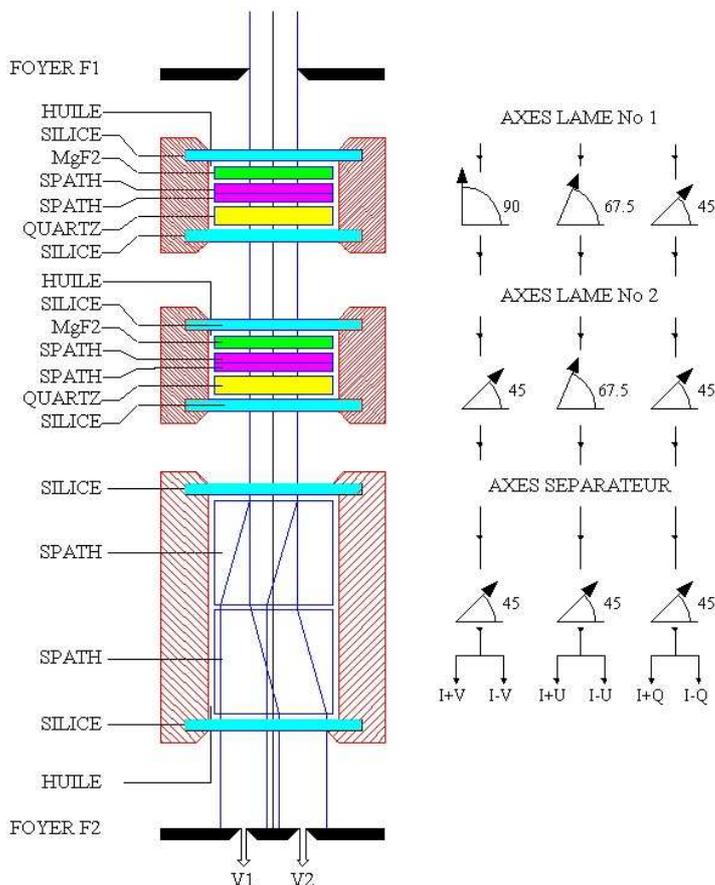
Les différents magnétographes décrits dans les chapitres précédents étaient des instruments auxiliaires placés derrière un spectrographe classique. Le principe de THEMIS est très différent. C'est tout l'instrument qui contribue au but recherché et est optimisé à chaque niveau. C'est un télescope de type Ritchey-Chrétien sous vide, directement pointé sur le Soleil. Sa polarisation elliptique est nulle et la polarisation rectiligne inférieure à 1/10000. Il focalise l'image du Soleil sur la fente d'un spectrographe derrière laquelle on place des lames cristallines achromatiques, quart d'onde pour mesurer la polarisation circulaire et demi onde pour la polarisation rectiligne. Les axes de ces lames sont parallèles et perpendiculaires à la fente du spectrographe. On place ensuite deux cristaux de quartz dont les faces sont taillées à 45° de l'axe cristallographique. Ils sont croisés l'un par rapport à l'autre et orientés de façon que les deux faisceaux de lumière rectiligne qu'ils transmettent soient polarisés à 45° de la fente du spectrographe.



Principe de l'analyseur de polarisation du télescope THEMIS.



L'analyseur assemblé



Plan éclaté de l'analyseur de polarisation. Il permet de déterminer directement les paramètres de Stokes.

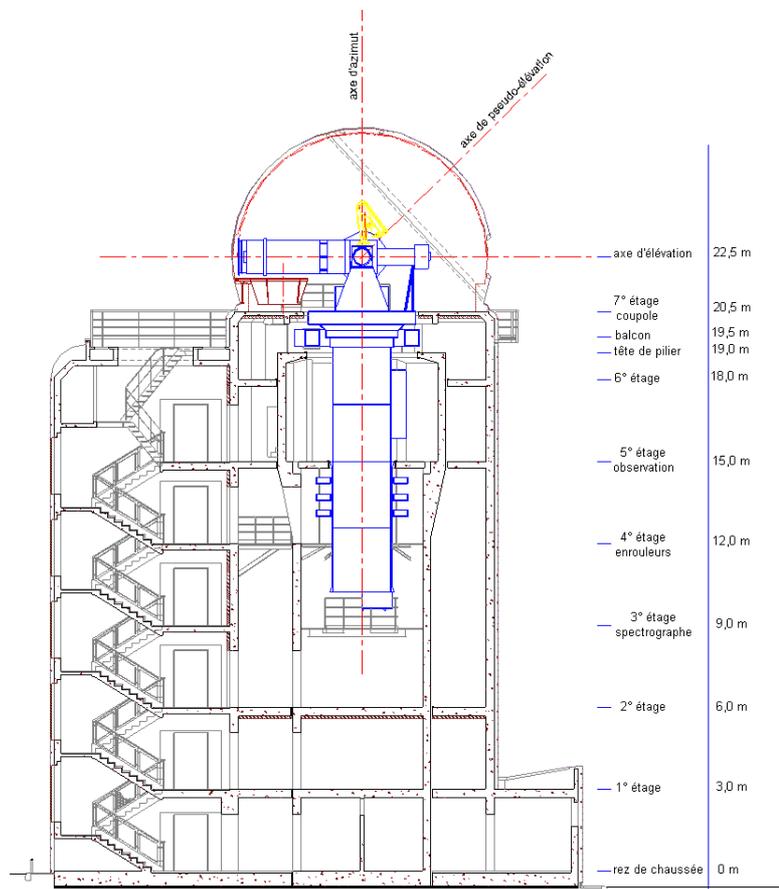


L'observatoire du pic de Teide.

Avec ses 3718 mètres d'altitude, le Teide domine l'archipel des Canaries. Le sommet de l'île de Tenerife émerge presque constamment des nuages qui traversent l'Atlantique et butent contre le flanc des volcans. L'observatoire du pic de Teide est devenu un véritable temple du Soleil. Le site a été découvert en 1856 par l'astronome écossais Charles Piazzi Smyth. En 1910, l'astronome Jean Mascart de l'Observatoire de Paris s'y rendit pour observer la comète de Halley. Ce sont finalement les espagnols qui créèrent en 1959 l'observatoire astronomique du pic de Teide. Dans les années 1970, des images du Soleil y ont été obtenues avec une résolution équivalente à celles du pic du Midi. L'observatoire est implanté sur la caldeira du Teide, à 2400 mètres d'altitude, sur la colline d'Izana. Le Kiepenheuer-Institut für Sonnen-physik a installé trois instruments solaires, le Vacuum Newton Telescope de 40 cm de diamètre, le Grégory Coudé Télescope, de 45 cm et le Vacuum Tower Telescope mesurant 60 cm de diamètre installé sur une tour de 40 m. Le télescope THEMIS de 90 cm de diamètre est le plus gros et le plus original de l'observatoire. Il aura, du moins l'espère-t-on, un grand successeur européen de 4 mètres de diamètre, l'EST (European Solar Telescope) vers 2018-2020. Ce télescope sera équipé d'un spectropolarimètre de 13 mètres travaillant dans le proche UV, le visible et l'IR. Le coût prévisionnel de cet instrument est actuellement de 60 millions d'Euros.

Dans le cadre de JOSO (Joint Organisation for Solar Observations) les recherches de sites ont conduit au choix des Canaries pour ses grands qualités d'ensoleillement et la qualité des images que l'on peut obtenir. Situé à 2400 m d'altitude au dessus des zones d'air humide et instable, Izana jouit d'un ensoleillement de près de 3000 heures par an. L'atmosphère qui l'entoure est très homogène et perturbe très peu la qualité des images.





Une convention a été signée entre le Centre National de la Recherche Scientifique et le Consiglio Nazionale delle Ricerche italien. Le coût de construction de 87.5 millions de francs a été pris en charge à raison de 80% pour le CNRS et 20% pour le CNR. La même répartition est appliquée pour le fonctionnement de l'instrument. L'Instituto de Astrofisica de Canarias fournit le site et la logistique. Le temps d'observation est réparti comme suit : 60% pour les français, 15% pour les italiens, 20% pour les espagnols et 5% au « temps international ». Un comité de direction franco-italien définit la politique générale d'exploitation et d'évolution du télescope.

Coupe du bâtiment de THEMIS

Le bâtiment THEMIS est conçu pour conserver la qualité des images. Les formes arrondies de la construction limitent la turbulence; Son orientation, en fonction des vents dominants, est optimisée pour favoriser les observations matinales qui sont les meilleures. Le bardage d'aluminium peint en blanc réduit l'échauffement. Le télescope est porté par une tour intérieure en béton indépendante du bâtiment principal pour éviter la propagation des vibrations. Le télescope est à 22.5 mètres du sol au dessus de la zone de turbulence due à l'échauffement de la terre par le Soleil.

Le système THEMIS est composé d'un télescope Ritchey-Chrétien (variante du Cassegrain classique à grand champ) de 90 cm de diamètre sous vide. L'analyseur de polarisation et le miroir secondaire sont refroidis. Un dispositif d'optique adaptative pour annuler la turbulence atmosphérique est en cours d'étude. Un spectrographe prédisperseur permet de sélectionner les domaines à observer qui sont envoyé sur un spectrographe échelle. Avec un tel système, l'observateur obtient autant de spectre que de domaines choisis. 20 caméras CCD collectent les données spectrales. Le prédisperseur et le spectrographe échelle peuvent aussi être utilisés en spectro-imagerie. Les spectrographes fournissent plus de 2 millions d'octets de données par seconde, soit l'équivalent de plus de 8000 profils de raies toutes les deux secondes.

Une seconde instrumentation, construite par l'Italie, est disponible. Il s'agit d'un filtre universel biréfringent comprenant un interféromètre Fabry-Pérot à bande étroite de 0.02Å équipé d'une caméra CCD. Afin d'exploiter au mieux ces données, une base informatique, BASS2000, est en place à Tarbes. Elle regroupe également les informations provenant des autres observatoires français et est en relation avec la base MEDOC qui archive les données du satellite SOHO.

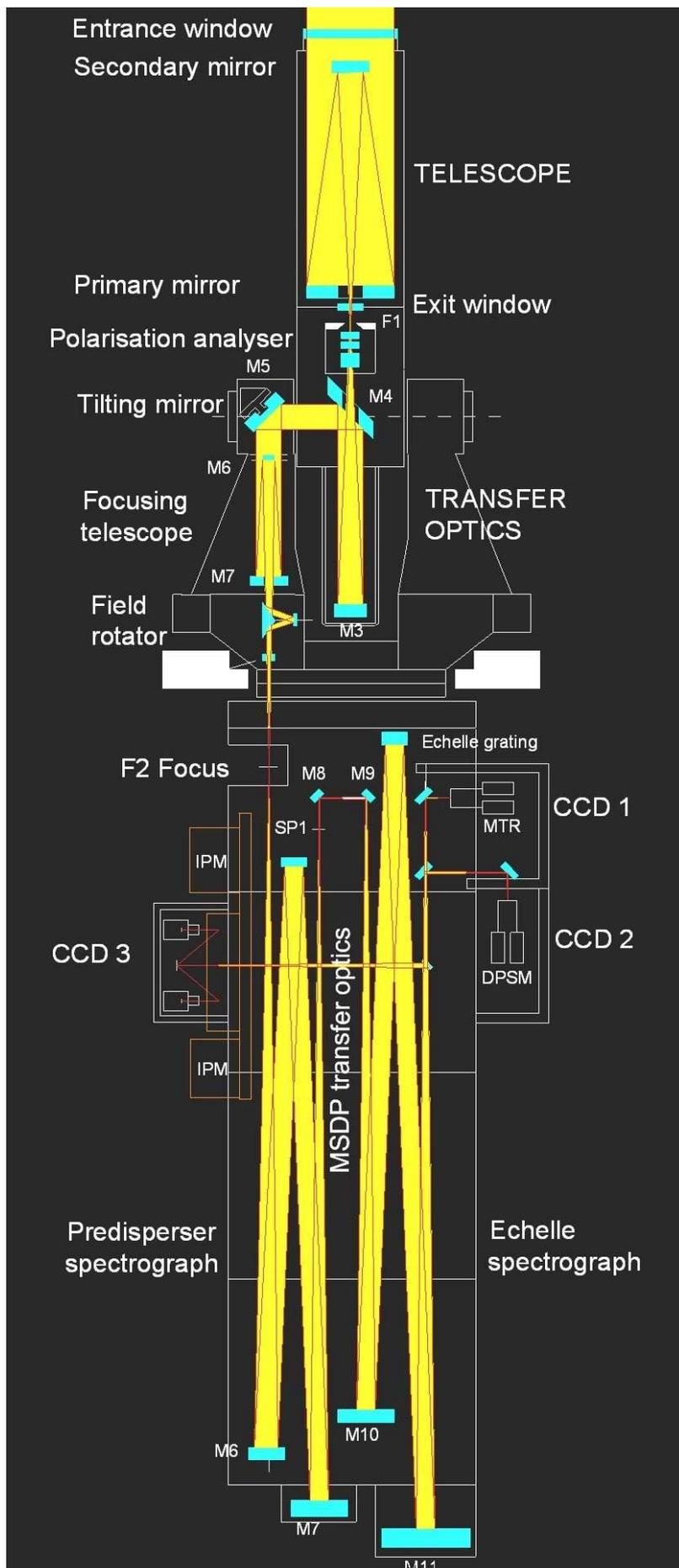
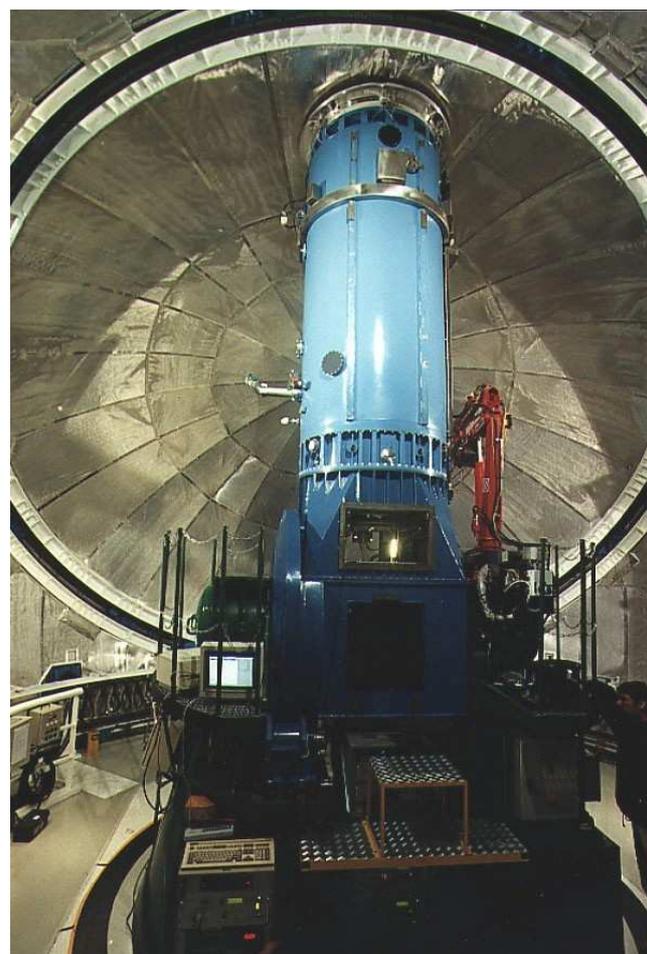
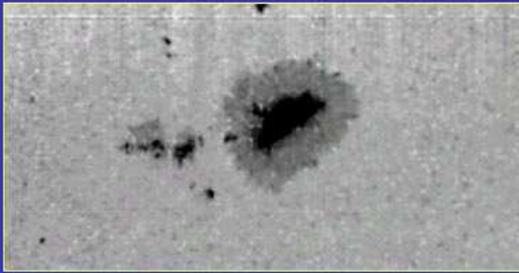


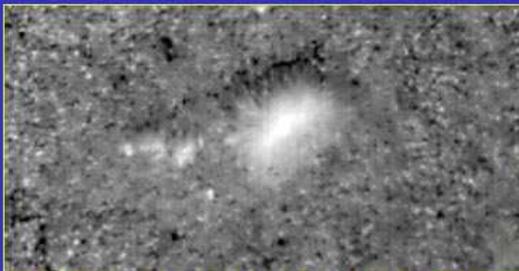
Schéma optique du télescope et des spectrographes.



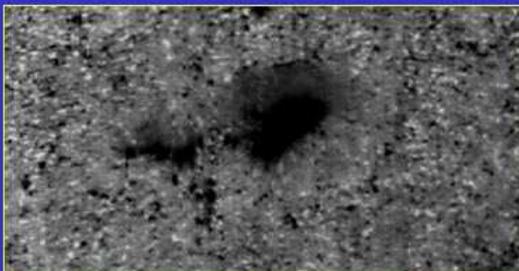
Le télescope dans la coupole. Contrairement aux coupoles classique qui sont largement ouvertes, celle de THEMIS ne possède qu'une fenêtre du diamètre du télescope. Il n'y a donc pas d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur ce qui favorise la stabilité des images. Ce concept a été également adopté pour le télescope Bernard Lyot au pic du Midi et sous une variante, pour la lunette Jean Rösch.



Carte de l'intensité du continu I_c



Cartes des positions des profils I+V



Cartes des positions des profils I-V

Principe de la mesure du champ magnétique.

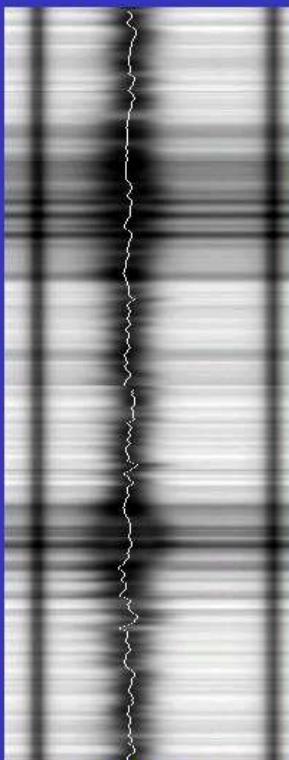
Méthode de Jean Rayole.

A partir de 6 séries de spectres obtenues au cours du balayage d'une région sélectionnée sur le Soleil, on effectue les opérations suivantes pour tous les domaines spectraux observés simultanément:

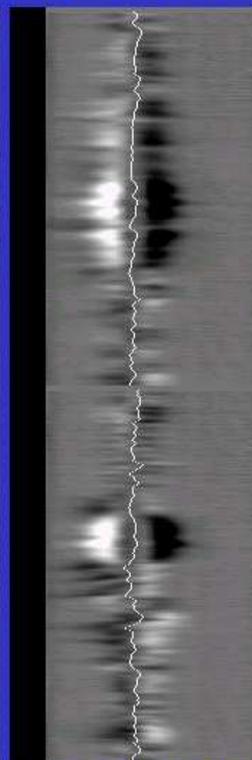
- Correction du courant d'obscurité.
- Correction du champ plat.
- Mesure des fluctuations du continu I_c .
- Mesures de I+V et I-V.
- Mesure de V/I.
- Mesures de I+Q et I-Q.
- Mesures de I+U et I-U.
- Mesures de Q/I et U/I

Les positions de I+V et I-V fournissent les cartes de B// et V//. Les mesures de V/I donnent l'inclinaison du champ magnétique et celles de U/Q l'azimut de sa composante transversale.

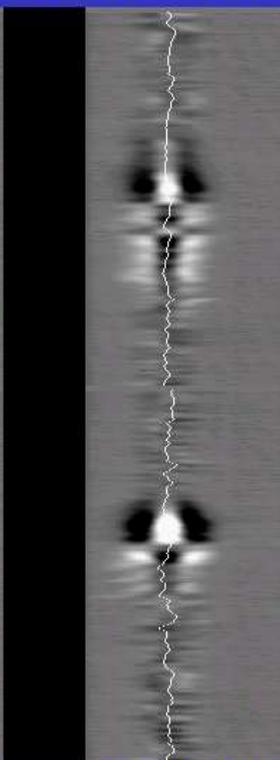
Avec THEMIS on peut faire beaucoup mieux que l'observation de la composante longitudinale du champ magnétique. L'observation des 6 spectres I+V, I-V, I+Q, I-Q, I+U, I-U permet d'obtenir le vecteur champ magnétique. Les observations MTR permettent non seulement de calibrer correctement les valeurs du champ mais aussi d'accéder simultanément à plusieurs altitudes dans l'atmosphère du soleil.



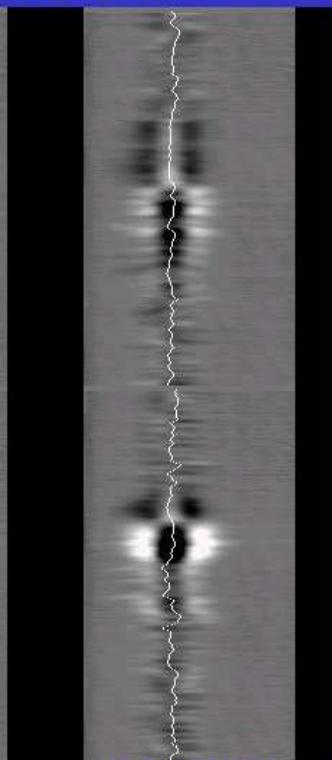
spectre I



spectre V/I

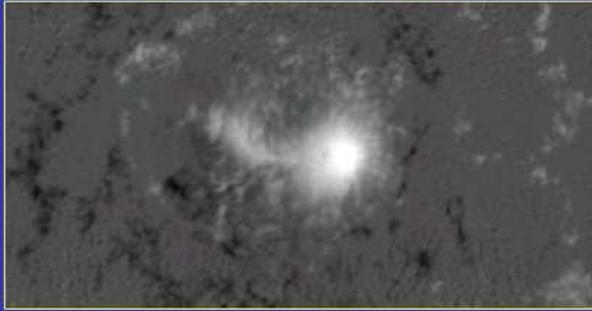


spectre Q/I



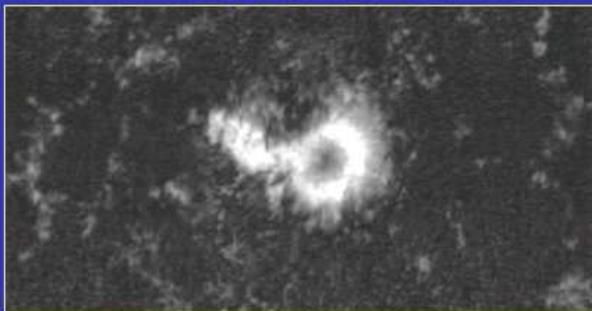
spectre U/I

Région active No 8668 du 17/08/1999 observée avec la raie 6302.5 FeI



Composante longitudinale
en noire polarité SUD -1500 à 0 gauss
en blanc polarité NORD 0 à 2600 gauss
Echelle linéaire

Pour chaque domaine observé on calcule les trois cartes figurées sur cette diapositive. La composante longitudinale est obtenue avec un bruit faible. Elle dépend très peu des variations des paramètres thermodynamiques locaux. Si on néglige la dispersion anormale (effet Faraday) l'azimut est également indépendant du modèle d'atmosphère. Seule l'inclinaison du champ demande un traitement sur plusieurs raies se formant à la même altitude. Pour obtenir les variations avec l'altitude il faut observer simultanément plusieurs séries de raies.



Inclinaison du champ / ligne de visée
de 0° à 90° pour les polarités NORD
de 90° à 180° pour les polarités SUD
Echelle non linéaire



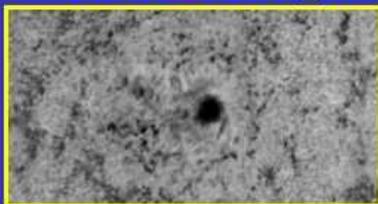
Azimut de la composante transversale
compté de 0° à 180° / à la fente F1
en gris-noir les valeurs de 90° à 180°
en blanc-gris les valeurs de 0° à 90°

Jean RAYROLE décembre 1999

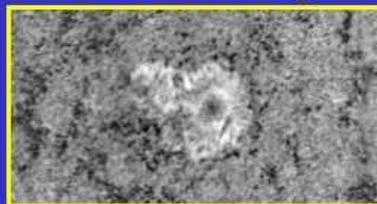
VARIATIONS DE LA DEPRESSION DE LA COMPOSANTE I+V PAR RAPPORT AU CONTINUUM

Il faut remarquer le comportement différent des différentes raies. En particulier la dépression de la raie 6149.2 du fer ionisé trace les variations du fond continu. Remarquer également le couplage entre les variations de la dépression de la raie et le champ magnétique.

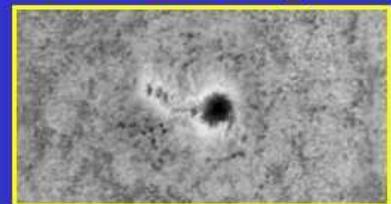
6302.5 FeI OBS17_8



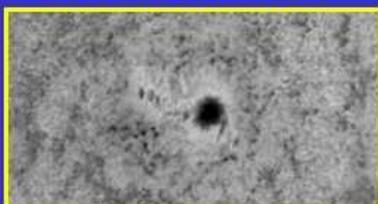
6150.6 FeI OBS17_8



5576.6 FeI OBS17_8



6301.5 FeI OBS17_8



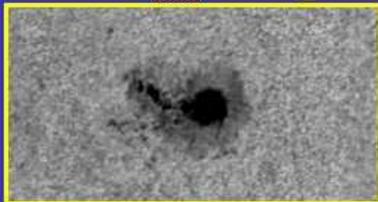
Composante B// OBS17_8



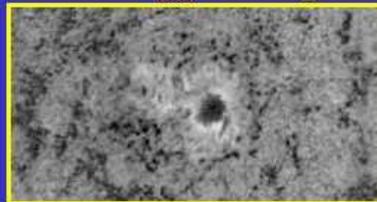
5250.2 FeI OBS17_8



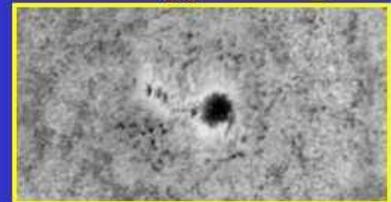
6149.2 FeII OBS17_8

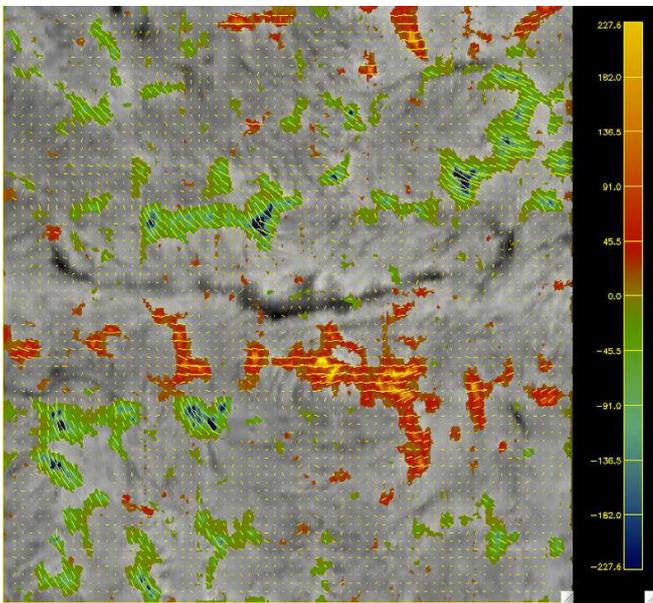


5247.6 FeI OBS17_8



5250.6 FeI OBS17_8





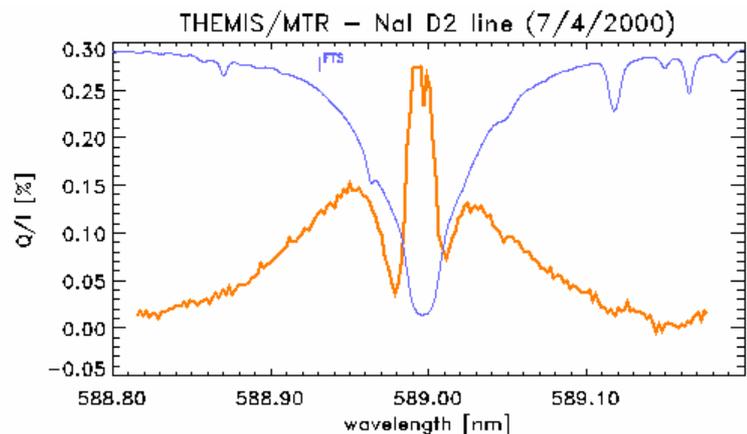
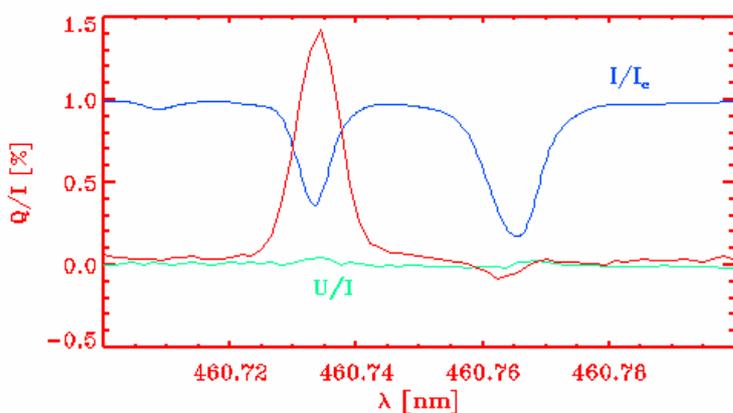
Exemple de carte des champs magnétiques d'une région solaire obtenue avec le télescope THEMIS.

La polarisation de la lumière est sensible au champ magnétique: ainsi, l'objectif scientifique de THEMIS est la mesure du champ magnétique par interprétation des mesures de polarisation. La polarisation circulaire est plutôt sensible au champ longitudinal (*en fausses couleurs sur l'image*), tandis que la polarisation linéaire est plutôt sensible au champ transversal (*représenté par les petites flèches*). THEMIS mesure les deux états de polarisation, circulaire et linéaire dans le but de reconstituer des cartes du vecteur champ magnétique à la surface du soleil, à haute résolution spatiale. Sur cette carte, l'image du filament a été prise dans la raie H α alors que les mesures du champ magnétique ont été faites dans la raie 6302Å.

Le second spectre solaire observé avec THEMIS.

La haute résolution polarimétrique permet d'observer ce qu'on appelle le "second spectre solaire", qui est le spectre de la polarisation linéaire formée par diffusion tout près du bord solaire. Cette polarisation est faible, comme on peut le voir sur la figure. Ces observations ont été faites en plaçant la fente du spectrographe parallèlement au bord solaire, à 4 secondes d'arc vers l'intérieur du disque, dans une région solaire calme: le pôle Nord solaire.

Lorsque l'on observe près du bord solaire, les raies sont polarisées linéairement, à cause de la diffusion du rayonnement anisotrope. Cette anisotropie est due au transfert de rayonnement à la surface du Soleil, là où se forment les raies. Les raies observées sont les raies D2 (à droite) et SrI 4607Å (à gauche) du sodium, qui sont deux raies d'absorption visibles en polarisation linéaire dans le spectre en intensité. La mesure de la dépolarisation des raies (cœur) conduit à un diagnostic des champs magnétiques faibles (5 à 50 G) par interprétation de l'effet Hanlé. L'effet Hanlé est une dépolarisation et une rotation du plan de polarisation en présence de champ magnétique. Il est fonction de l'intensité et de l'orientation du champ.



Mesures de la polarisation de résonance de la raie du Strontium neutre (460.7 nm) à gauche et polarisation linéaire de la raie D2 du Sodium à droite. Le « second spectre solaire » (profils rouge et orangé) est un spectre de la polarisation observé très près du bord du disque solaire. Il est très différent du spectre ordinaire (en bleu). La polarisation étant sensible au champ magnétique, on peut, par ces observations, mesurer les champs faibles.

En guise de conclusion

Nous voici au terme de notre étude historique et contemporaine des observations solaires à Meudon. Elle nous a souvent éloigné de notre base en nous emmenant au pic du Midi et à Ténérife.

Le service solaire de Meudon est aujourd'hui le pôle solaire du Laboratoire d'Étude Spatiale et d'Instrumentation en Astrophysique ou LESIA qui est le plus grand laboratoire d'astrophysique de France avec un effectif total de plus de 200 personnes. Les observations systématiques séculaires perdurent grâce à une équipe de quatre observateurs qui se relaient pour assurer un service régulier de grande qualité, dans le respect de la tradition initiée par d'Azambuja.

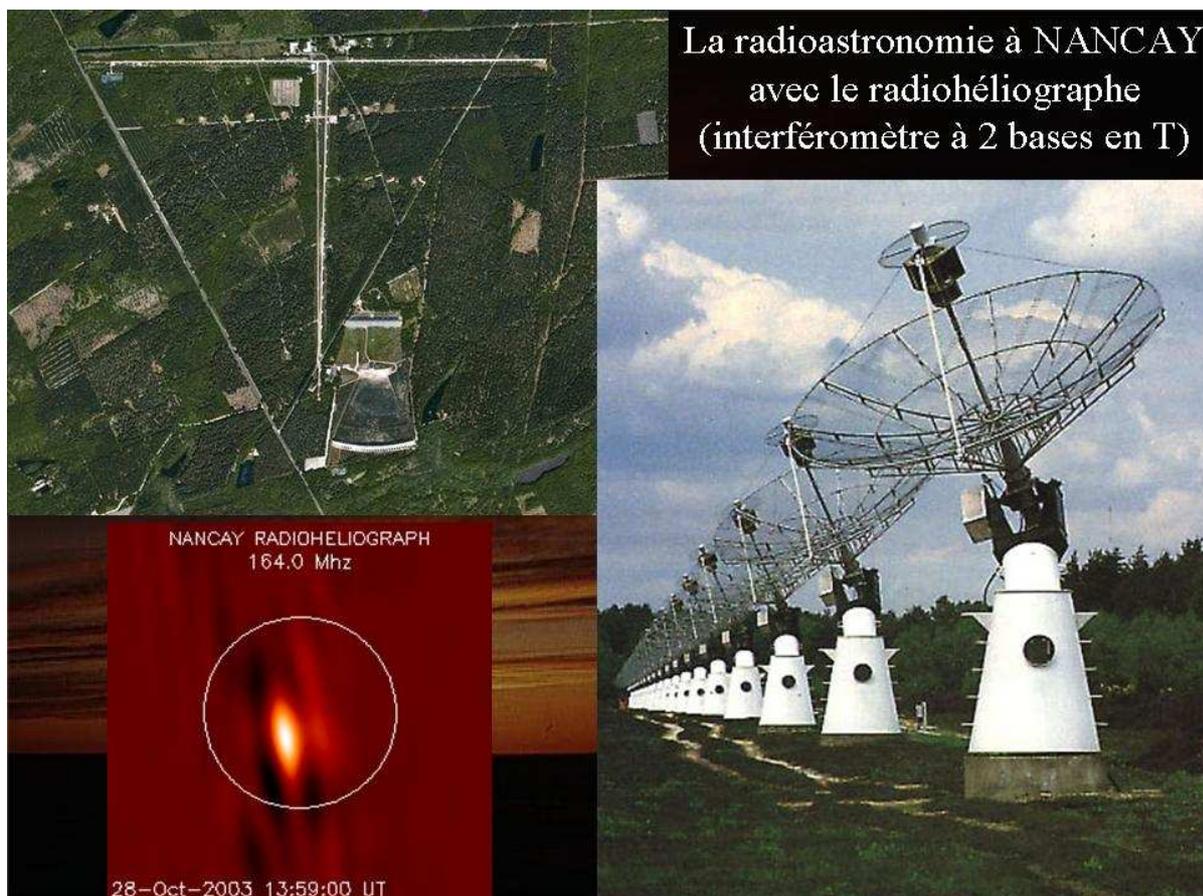
Le spectrohéliographe, entièrement numérisé délivre quotidiennement des séries images qui sont immédiatement mises sur la base de données BASS2000, ce qui les rend disponibles pour la communauté scientifique et le public. Il donne aussi des dopplergrammes et il sera très probablement équipé d'une nouvelle voie destinée à réaliser des magnétogrammes systématiques dans les années à venir.

L'héliographe est régulièrement amélioré et équipé de nouveaux instruments. En plus d'une voie dans le calcium, une voie à 530 nm délivre des images de la photosphère d'une grande qualité. Le remplacement du filtre H α devrait être effectué en 2008.

La monture d'Eichens est régulièrement utilisée pour l'imagerie et la formation des stagiaires de niveau collège et lycée.

La tour solaire contribue régulièrement aux campagnes d'observation et, depuis 2007, offre un enseignement de la spectropolarimétrie aux étudiants de première année du Mastère de l'Observatoire.

En plus des instruments de Meudon, du Pic du Midi et de Ténérife, les astronomes du pôle solaire gèrent et utilisent un radiohéliographe sur le site de Nançay. Il s'agit d'un interféromètre à deux bases en T. Ce radiohéliographe donne des images de la couronne solaire qui sont disponibles sur la base de données solaire BASS2000. A ce dispositif s'ajoute l'antenne multifréquence des flux globaux (10 canaux intégrés sur le Soleil entre 169 et 450 MHz) qui sort ses données en temps réel sur le web et également l'interféromètre radio méridien à 3 cm qui reste très utilisé dans le cadre de la prévision de l'activité solaire.



Les satellites permettent de compléter les données au sol.

SOHO, qui sur le point de Lagrange L1, à 1.5 millions de kilomètre de la terre est un outil devenu indispensable depuis son lancement en 1996. Il est le fruit d'une coopération entre la NASA et l'ESA. Il est équipé d'une dizaine d'instruments qui permettent d'observer quotidiennement l'atmosphère solaire à différentes altitudes. **MDI** est un imageur de la photosphère qui est doté d'un magnétographe. **EIT** est un imageur de la zone de transition et de la couronne. Les coronographes **LASCO** permettent de suivre l'évolution de la couronne et les éjections de masse coronale (CME). Le satellite **GOES** observe le Soleil en rayons X.

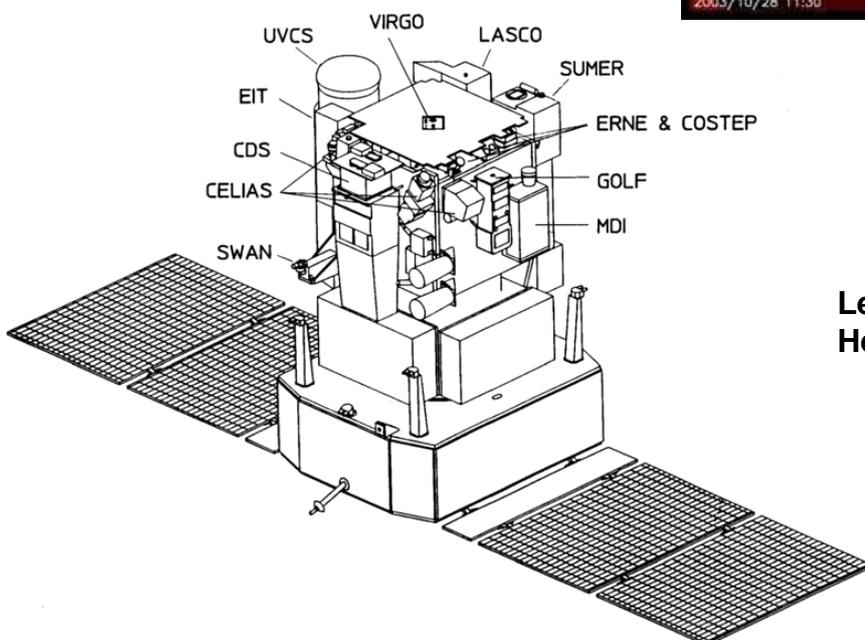
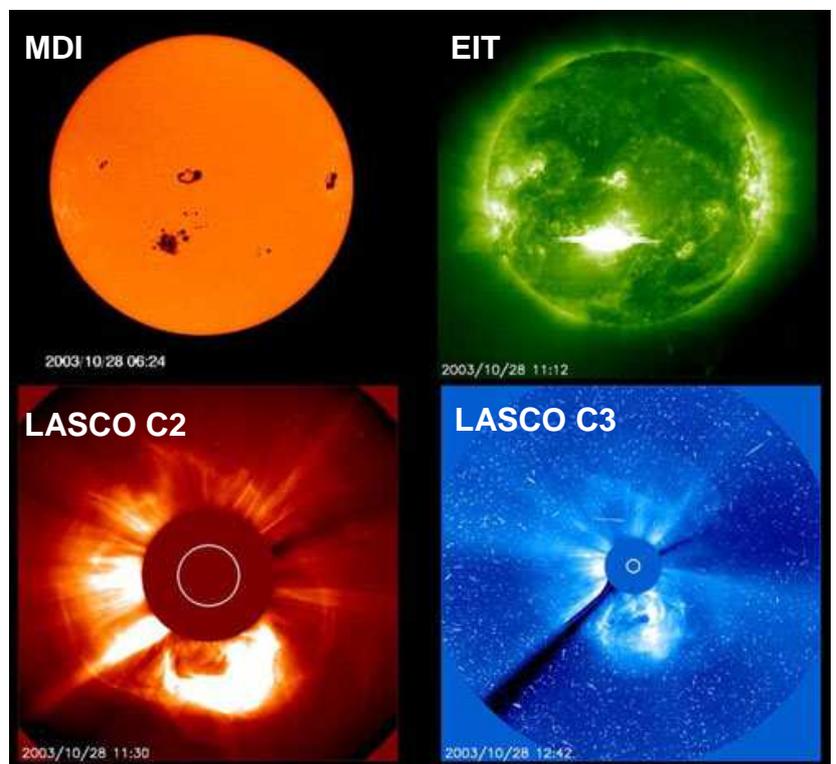
TRACE est un imageur UV à haute résolution angulaire de la NASA.

STEREO, lancé pas la NASA en 2006 observe la couronne solaire en 3 dimensions. Il est destiné à étudier les CME et les relations Soleil - Terre. C'est un outil fondamental pour développer la météo de l'espace.

SOLAR B/Hinode, depuis 2006 donne des images à très haute résolution angulaire de la photosphère, de la chromosphère et de la couronne avec son télescope de 50 cm de diamètre. Il est également équipé d'un magnétographe. C'est un instrument JAXA / NASA

Les astronomes meudonnais sont aussi impliqués dans de nombreux projets internationaux au sol et dans l'espace. (SMESE, SOLAR ORBITER dans l'espace, EST et FASR au sol).

Le soleil observé par SOHO. Les observations dans l'espace permettent d'exploiter une grande partie du spectre et de visualiser des régions de l'atmosphère solaire invisibles depuis le sol.



Le satellite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory).

ANNEXE

Un peu de physique solaire

Le Soleil

Le Soleil est l'étoile centrale de notre système, le système solaire. C'est une étoile assez moyenne de type spectral G2 dont la température de surface est de 5700 K. Avec un diamètre de 1.4 millions de kilomètres, la masse du Soleil est 320000 fois plus importante que celle de la terre. Comme toutes les étoiles, il est composé de gaz chaud. Sa masse représente 999/1000 de la masse totale du système solaire. La composition en « surface » du soleil se répartit en 70% d'hydrogène, 28% d'hélium et 2% des autres éléments (C, N, O etc.). Le centre du Soleil est très chaud, 14 millions de K environ et la composition différente, 35% H, 63% He et 2% (C, N, O etc.). La densité centrale vaut 160 g/cm^3 contre $5 \cdot 10^{-7} \text{ g/cm}^3$ dans la photosphère et 10^{-11} g/cm^3 dans la chromosphère, soit 1/10000 de la densité de l'atmosphère que nous respirons. La densité moyenne du Soleil est de 1.4.

La rotation solaire s'effectue en 25 jours à l'équateur contre 35 jour aux pôles, on parle de rotation différentielle. La gravité à la surface du Soleil est 28 fois plus grande qu'à la surface de la Terre. Il possède une vitesse de libération de 618 km/s.

Le centre du Soleil

La question de l'origine de l'énergie solaire s'est posée jusqu'en 1920. On a imaginé qu'il rayonnait par énergie chimique mais au rythme annuel de sa production ($12 \cdot 10^{33} \text{ J}$, luminosité = $3.86 \cdot 10^{26} \text{ W}$) il n'aurait eu une durée de vie probable que de 30000 ans. C'est incompatible avec l'âge des roches terrestres estimées à plusieurs milliards d'années.

L'énergie gravitationnelle par contraction permanente de l'étoile a été envisagée mais elle ne peut assurer qu'une vie de 19 millions d'années au Soleil.

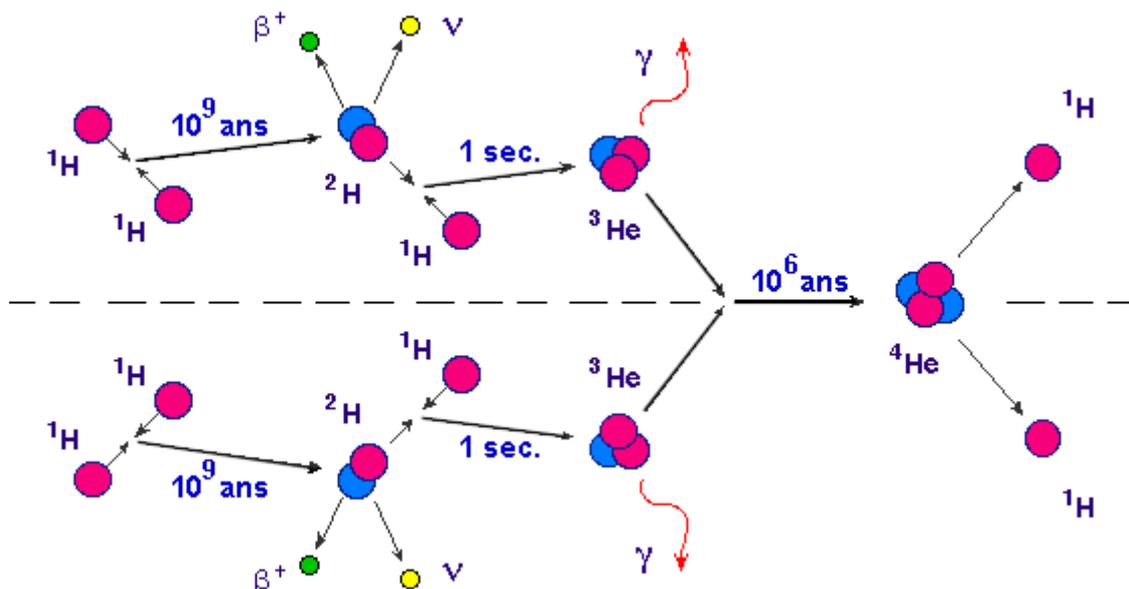
Seules les réactions nucléaires exothermiques peuvent expliquer la production d'énergie constatée pendant une durée de plusieurs milliards d'années. La réaction dans le Soleil est une fusion de l'hydrogène en hélium.

On peut exprimer cette réaction de manière très générale par la relation:



La principale réaction est la chaîne proton-proton.

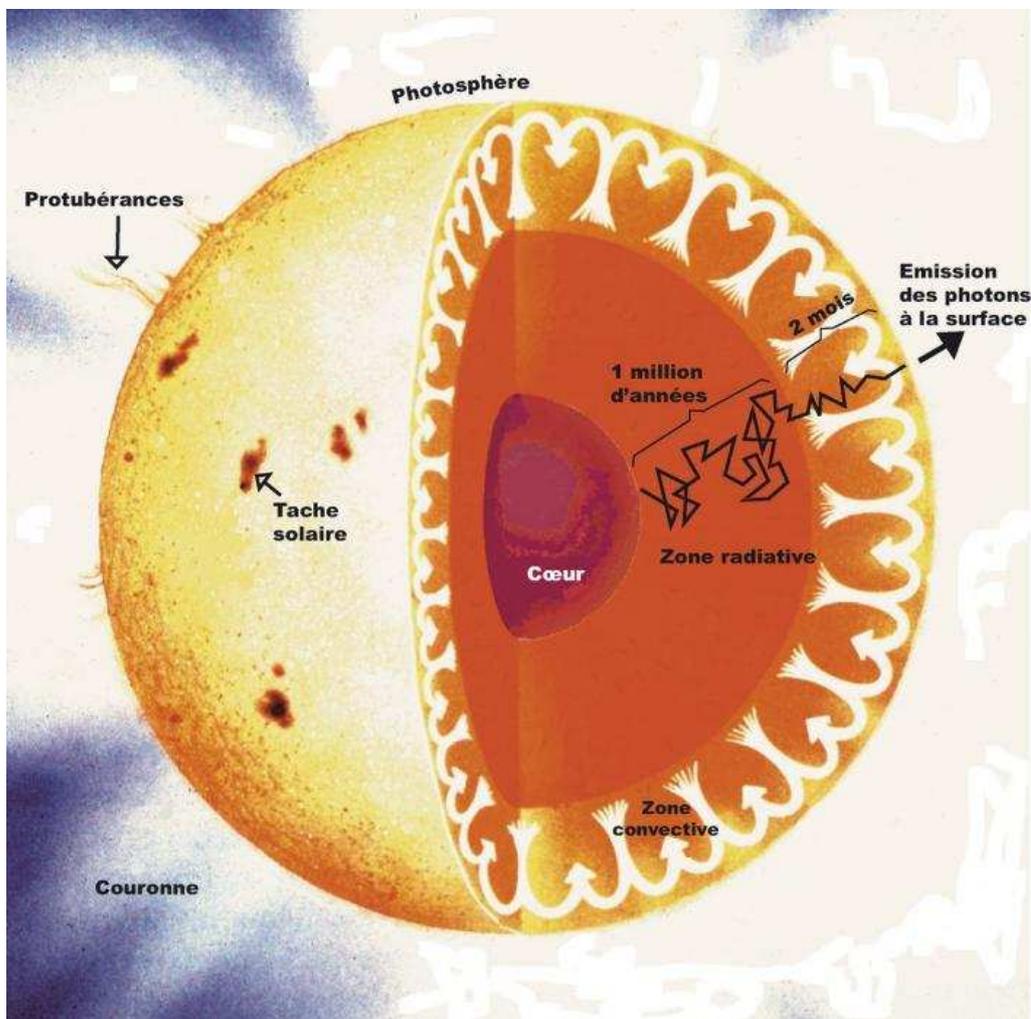
Chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en hélium avec une perte de masse de 4 millions de tonnes qui se transforment ainsi en énergie. Cette perte de masse ne représente que 0.06% de la masse solaire au bout de 10 milliards d'années, durée de vie estimée du Soleil.



Le transfert de l'énergie dans le Soleil

Le transfert d'énergie dans le Soleil se fait essentiellement par rayonnement. Les photons γ libérés au centre traversent l'étoile mais ils entrent en interaction avec les électrons de la matière ce qui limite fortement leur libre parcours moyen. Il s'écoule environ un million d'années entre la production d'un photon au centre et l'émission du photon résultant dans la photosphère. Il ne s'agit évidemment plus du même photon. L'émission de la photosphère est maximale dans le jaune-vert. L'équilibre radiatif du Soleil est assuré jusqu'à une profondeur de 200000 km quand le gaz est totalement ionisé et transparent au rayonnement. La température est de plusieurs dizaines de milliers de K.

Pour les zones plus froides, l'hydrogène neutre et négatif (qui est à l'origine de la formation du spectre continu) en particulier bloque le rayonnement. On définit ainsi la « surface du Soleil ». L'énergie est alors évacuée par convection. Des bulles de matière chaude montent en transportant la chaleur à la manière des bulles d'une eau qui bout. Les images de la photosphère montrent clairement la granulation qui n'est autre que la manifestation de la convection. Chaque granule mesure entre 700 et 1000 km. Plus on s'enfonce dans le Soleil plus les cellules de convection deviennent grandes. Il y a plusieurs échelles de cellules convectives.



Coupe du Soleil montrant le cœur où siègent les réactions de fusion, la zone radiative, la zone convective et la photosphère.

Conditions physiques dans une tache solaire :

Dans une tache solaire, la pression magnétique qui s'exprime par $B^2/2\mu_0$ s'additionne à la pression gazeuse. B représente la valeur du champ magnétique, soit 0.15 Tesla et μ_0 la perméabilité du vide valant $4\pi 10^{-7}$. En considérant la pression à la base de la photosphère, 10^4 Pa, la pression de la tache devient $P = 10^4 - 9 \cdot 10^3 = 10^3$ Pa.

On voit donc que la pression gazeuse dans la tache est dix fois plus faible que dans le milieu extérieur.

La tache paraît 5 fois plus ombre que la photosphère, on en déduit sa température en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann qui dit que l'intensité lumineuse I est proportionnelle à σT^4 , σ étant la constante de Stefan, soit $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}$.

On en déduit que $T_{\text{tache}} = T_{\text{ext}} / 5^{1/4}$ soit $T_{\text{ext}}/1.5 = 6400/1.5 = 4200\text{K}$.

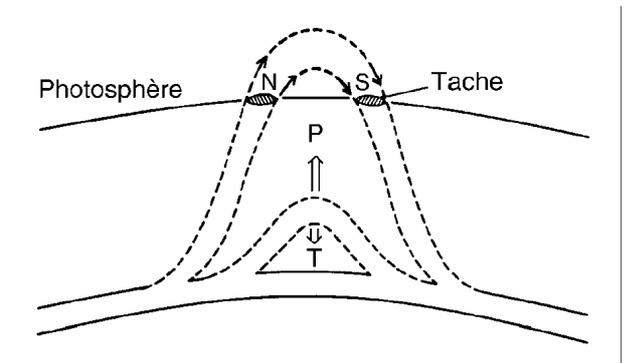
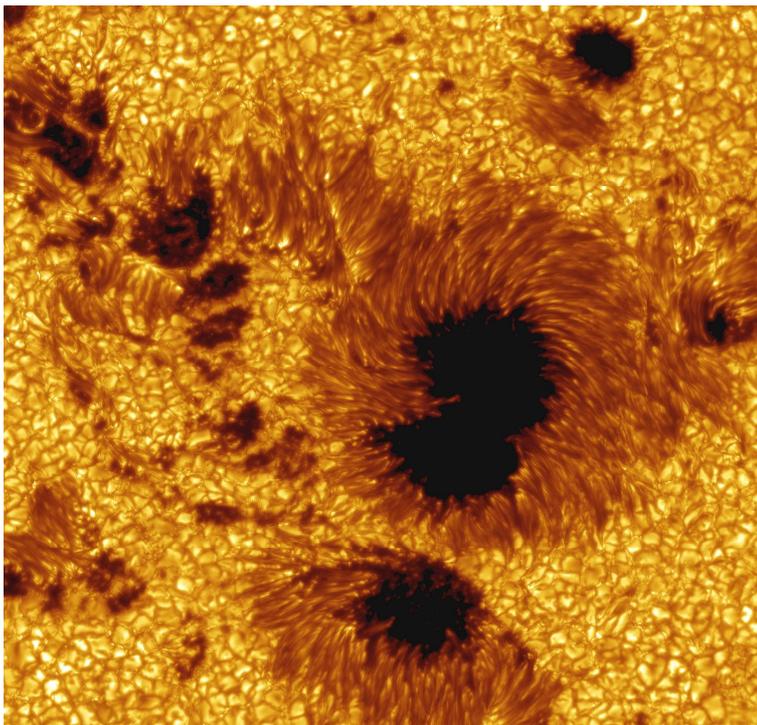
On peut également déduire la masse volumique par la loi des gaz parfaits ($PV = nRT$) celle ci vaut 1/6 de la masse volumique du milieu ambiant.

Effet de dépression Wilson :

Au limbe solaire, une tache apparaît comme une dépression. Cet effet s'explique par les lois du transfert radiatif.

L'épaisseur optique $\tau \approx kpz$, où k est le coefficient d'absorption et ρ la masse volumique du gaz.

On voit à une épaisseur optique 1 $\Rightarrow z \approx 1/k\rho$. Si la valeur de ρ diminue, alors celle de z augmente. On voit donc plus profondément.



La remontée d'un tube de champ magnétique vers la photosphère sous l'effet de la poussée d'Archimède produit une tache dipolaire.

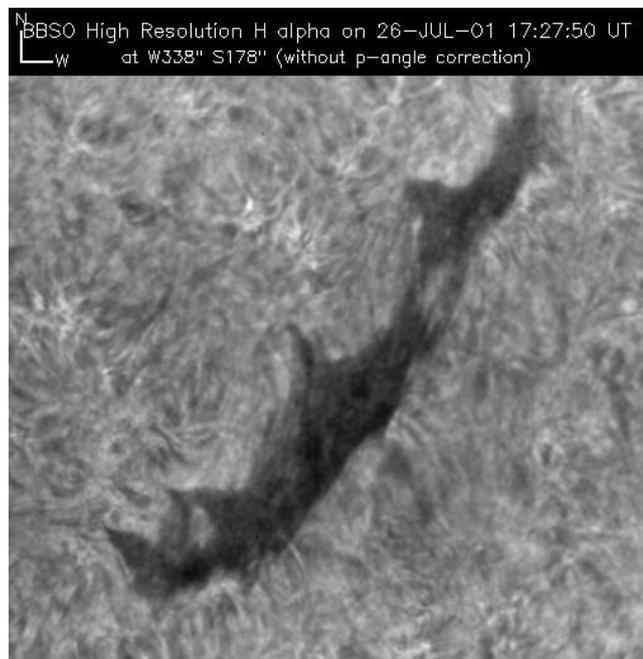
Image du nouveau réflecteur de 1 m NEW SVST suédois de La Palma en optique adaptative (2002), résolution 0.1", probablement la meilleure image du monde obtenue de la surface solaire à ce jour.

L'activité solaire

Le nombre de taches visibles sur le Soleil est le principal indice de l'activité magnétique du Soleil. Cette activité varie avec un cycle de onze ans. En période de maximum, on voit de nombreuses taches réparties sur des latitudes variées alors qu'en minimum, les rares taches se situent le long de l'équateur solaire. Les groupes de taches sont généralement dipolaires avec un sens dans les polarités. Si la tache de tête est positive, celle de queue est négative dans un hémisphère et la situation est inverse dans l'autre hémisphère. La situation se renverse d'un cycle à l'autre.

La chromosphère

La chromosphère est la couche gazeuse du Soleil qui se situe au dessus de la photosphère. Elle tire son nom de la couleur rose qui la caractérise quand elle est visible pendant une éclipse totale. La basse chromosphère (700 km) avait été appelé *couche renversante* car elle est responsable des raies observées généralement en absorption sur le disque brillant et vues en émission pendant les éclipses. C'est le *spectre éclair* qui montre les raies brillantes de la chromosphère pendant un court instant. Le spectre de la chromosphère présente 26000 raies qui révèlent 61 des 104 éléments chimiques connus. La chromosphère est très peu dense, elle est pratiquement transparente (c'est pourquoi, pour expliquer sa température plus élevée que celle de la couche sous-jacente, il a fallu faire appel à des mécanismes de chauffage par dissipation d'ondes magnéto-acoustiques) aussi a-t-il fallu attendre l'invention du spectrohéliographe pour l'observer. Son épaisseur est de quelques milliers de kilomètres seulement. On y observe les plages faculaires brillantes qui surmontent les facules de la photosphère et les filaments sombres qui semblent serpenter sur le disque. Les filaments, que l'on nomme protubérances quand ils sont visibles sur le limbe sont des lambeaux de matière de type chromosphérique piégés par des structures magnétiques immergées dans la couronne. Les filaments peuvent mesurer plusieurs centaines de milliers de kilomètres de long et monter à plus de 50000 km de hauteur mais leur épaisseur reste assez faible, quelques milliers de kilomètres seulement. Leur forme et leur trajectoire montrent qu'ils sont soutenus par un champ magnétique de quelques dizaines de Gauss. Une protubérance peut être quiescente si elle est stable et évolue lentement et devenir éruptive. Les spicules sont des jets de matière chromosphérique qui donne au profil de la chromosphère un aspect gazonné.



Images de protubérances au limbe solaire et sur le disque (filaments).

La couronne solaire

La couronne solaire est la partie la plus externe de l'atmosphère de notre étoile. Elle part du sommet de chromosphère jusqu'à une région mal définie. Sa température atteint plusieurs millions de K. Sa très faible brillance superficielle la rend difficilement observable en dehors des éclipses totales depuis le sol. Seule la coronographie dans l'espace permet d'en voir toute l'étendue.

La couronne visible est composée de la couronne K prédominante au voisinage de la photosphère et de la couronne F qui concerne principalement la partie la plus étendue. La couronne K émet un rayonnement continu analogue à celui de la photosphère. Il est dû à la diffusion de la lumière par les électrons libres et on y observe aucune raie d'absorption, ce que l'on interprète par un effet d'élargissement Doppler dû aux mouvements rapides des électrons.

La couronne F a un spectre de raies d'absorption et son émission est due à la diffusion de la lumière par les poussières.

L'activité solaire modifie fortement l'aspect de la couronne K. Elle est brillante et son extension autour du Soleil est assez sphérique pendant le maximum d'activité. Elle présente également des jets coronaux. En période de minimum d'activité, son extension est beaucoup plus importante dans le plan équatorial qu'aux pôles.

La couronne émet un rayonnement radio dû aux transitions « free-free » des électrons libres (par exemple le rayonnement des électrons dans un champ magnétique).

Des raies d'émissions intenses se superposent au continu dans le domaine visible. Après les avoir attribuées au *coronium* elles ont été identifiées en 1942 par Grotrian et Elden comme des raies interdites émises par le fer 13 fois ionisé (Fe XIV) et le fer 9 fois ionisé (Fe X). Une si forte ionisation du fer ne peut s'expliquer que par une température très élevée du milieu ($> 10^6$ K).

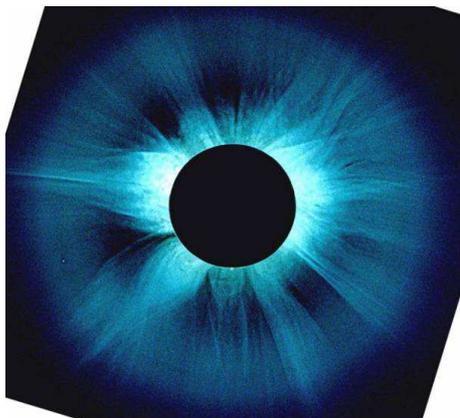
On observe aussi des raies permises dans l'extrême UV (50 à 500 angström) dues aux ions Fe VIII-XVI, Si VII-XII, Mg VIII-X, Ne VIII-IX et S VIII-XII. Aux longueurs d'ondes X et UV, la faible intensité du rayonnement photosphérique continu ne perturbe plus l'observation de la couronne.

Le vent solaire

On observe que de la matière s'échappe du Soleil sous la forme de particules (protons, électrons, noyaux d'hélium etc.). Ce flux est observable par son action sur les comètes car il est responsable de la queue ionique qui est toujours opposée à la direction solaire. Ce flux de matière, appelé *vent solaire* a été observé jusqu'au niveau de Jupiter par les sondes spatiales, mais il s'étend bien plus loin dans le Système solaire. Toutefois, la perte de masse engendrée par le vent solaire est très faible, du même ordre de grandeur que la masse transformée en rayonnement au cœur du Soleil.

Au niveau de la Terre, on mesure que sa vitesse est comprise entre 400 et 800 km/s. Sa température est de 50000 K à 500000 K mais sa densité est de 1 proton + 1 électron pour 10 cm^3 .

Les effets du vent solaire sur l'atmosphère terrestre se manifestent par les aurores polaires et les fluctuations ionosphériques qui peuvent perturber les transmissions radio.



La couronne solaire le 21 juin 2001. Cliché IAP

Les éruptions solaires

Une éruption est une libération explosive d'énergie. Observée en H α elle apparaît d'abord sous forme d'un point brillant dans une plage, qui en quelques minutes s'étend et peut couvrir une surface de plus de 50000 km de diamètre. L'éclat diminue ensuite progressivement en quelques heures ou même moins. Les manifestations radiatives sont observables dans le domaine X et le domaine radio.

L'énergie libérée peut atteindre 10^{25} joules. La fréquence d'apparition des éruption est liée au cycle d'activité solaire. En période de maximum, on peut en observer une dizaine par jour. Une éruption est souvent précédée d'une protubérance locale indiquant une anomalie du champ magnétique.

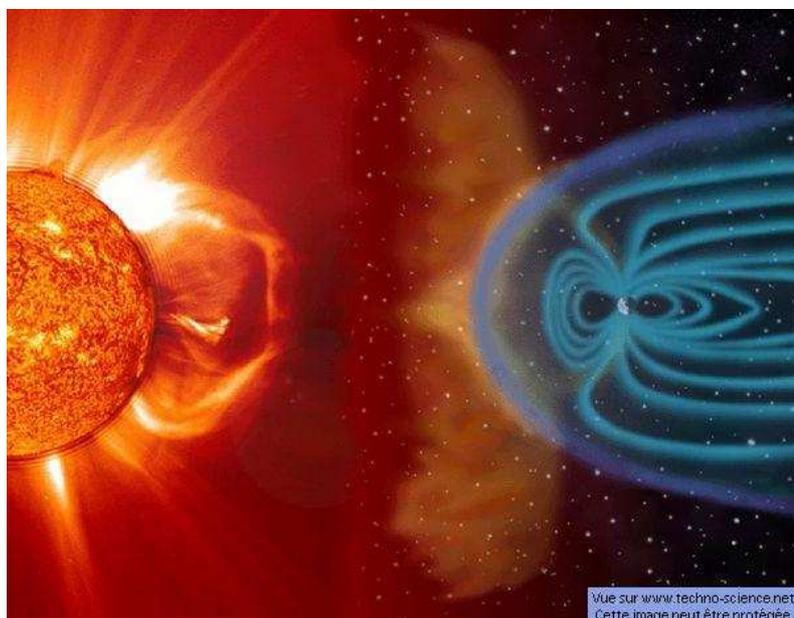
L'origine des éruptions est liée aux configurations complexes du champ magnétique. De l'énergie se trouverait piégée jusqu'à ce qu'une modification de la structure des lignes de champ libère brutalement toute cette énergie. On parle de *reconnexions magnétiques*. Ceci peut s'accompagner de particules de haute énergie qui peuvent quitter le Soleil, c'est une *éjection de matière coronale*.

Les manifestations d'une éruption solaire enregistrées sur Terre comprennent une succession d'effets différents : tout d'abord on enregistre un accroissement important de flux dans le domaine X. Cet énorme rayonnement X traverse les hautes couches de l'ionosphère et y provoque une *perturbation ionosphérique à début brusque*. Quelques minutes plus tard, on enregistre un renforcement du rayonnement cosmique. Ce sont des protons très énergétiques projetés à des vitesses proches de celle de la lumière. Environ 26 heures plus tard, le rayonnement corpusculaire atteint la Terre. Les particules chargées qui le constituent subissent l'action du champ magnétique terrestre et généralement ne pénètrent assez profondément dans l'atmosphère en suivant les lignes de champ, qu'au voisinage des pôles magnétiques. Là, elles ionisent les atomes de gaz qui alors émettent un rayonnement donnant lieu à un phénomène lumineux. C'est ainsi que l'on explique les aurores polaires. Les grandes éruptions solaires sont suivies à un ou deux jours près, par de fortes perturbations du champ magnétique terrestre connues sous le nom d'orages magnétiques qui coïncident souvent avec l'observation d'aurores polaires.

Le Soleil exerce donc une forte influence en géophysique, en technique radio et sur les techniques spatiales. C'est pourquoi il est surveillé régulièrement par les observatoires spécialisés comme celui de Meudon et depuis l'espace.

On observe également entre la photosphère et la couronne l'apparition de jets de matière (protubérance éruptive), canalisés par les lignes de champ. Ces gaz s'élèvent jusqu'à 200000 km à 200 km/s puis retombent presque aussitôt.

Enfin, une onde de choc, appelée *onde de Moreton* se propage à 1000 km/s à la surface du Soleil, avec comme épïcentre le lieu de l'éruption.



Le champ magnétique terrestre nous protège des particules du Soleil.

Bibliographie

Histoire du site

Articles

Cent ans d'astrophysique à Meudon, Ciel et Espace septembre 1977.

Meudon sur ciel, les amis de Meudon, septembre 2004.

Comité de sauvegarde des sites de Meudon, bulletins n°119 et 120, 2006.

92 Express, numéro 108, février 2000.

Annales de l'observatoire d'astronomie physique de Paris tome premier, 1896.

Jules Janssen

Thèse

Mémoire sur l'absorption de la chaleur rayonnante obscure dans les milieux de l'œil par J. Janssen, 1860.

Articles

Jules César Janssen par A. de la Baume Pluvinel, *Astrophysical journal* septembre 1908.

Notes sur les instruments de l'observatoire de Meudon par J. Janssen, Comptes rendus de l'Académie des sciences .

Jules Janssen et le cinématographe par Joseph Leclerc, *L'Astronomie SAF*, 1955.

Jules janssen, correspondance avec C. Flammarion par Françoise Launay, *L'Astronomie* novembre 2007.

La lunette photographique de Janssen par F. Launay et R. Le Cocquen, *L'Astronomie* février 2005.

Jules Janssen et la création de l'observatoire de Meudon par Françoise Launay.

Janssen au Mont Blanc, le centenaire Texte de conférence par Jean-Marie Malherbe, août 1993.

Henri Deslandres

Thèse

Spectres de bandes ultra-violettes des métalloïdes avec une faible dispersion par Henri Deslandres, 1888.

Mémoires

Recherches photographiques sur les flammes de l'atmosphère solaire par H. Deslandres.

Recherche sur l'atmosphère solaire et appareils enregistreurs des couches de vapeurs superposées qui la composent par H. Deslandres, 1905.

Enregistrement de la surface et de l'atmosphère solaires à l'observatoire de Meudon par H. Deslandres, *Transactions –Third conference* 1907.

Articles

Henri Deslandres et le spectrohéliographe, l'épopée d'une recherche par Audouin Dollfus, *L'Astronomie* 2003.

Lucien d'Azambuja

Thèse

Recherches sur la structure de la chromosphère solaire par L. d'Azambuja, 1930.

Lucien d'Azambuja par Jean Rösch, *Solar Physics* 1970.

Lucien d'Azambuja par M. J. Martres.

Bref historique du début des observations solaires par G. Olivieri.

L'apprenti de l'Astro par Raymond Michard, *Journal des astronomes français* n°57.

Souvenirs de l'Observatoire de Meudon depuis janvier 1938 par Roger Servajean, *Journal des astronomes français* n°57.

Bernard Lyot

L'œuvre de Bernard Lyot par Lucien d'Azambuja, L'Astronomie 1952.

Bernard Lyot, l'invention du coronographe et l'étude de la couronne : un cinquantenaire par Audouin Dollfus, L'Astronomie 1983.

Bernard Lyot, par André Danjon, Annales d'Astrophysique 1952.

Bernard Lyot et l'étude de la couronne solaire par A. Dollfus, J. Optics 1983.

Mémoires

Etude de la couronne solaire en dehors des éclipses par Bernard Lyot, 1932.

Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire par B. Lyot, 1944.

Principes théoriques du filtre monochromatique de Lyot par Jean-Marie Malherbe, 2007.

Articles divers

Un chercheur et un conquérant, Bernard Lyot par Louis Leprince-Ringuet.

Dixième anniversaire de la mort de Bernard Lyot par A. Danjon

Notice sur la vie et l'œuvre de Bernard Lyot par Louis de Broglie.

Période moderne

Thèses

Contribution à l'étude de la cinématique de la matière dans les taches et la granulation solaires par Roger Servajean, 1960.

Contribution à l'étude physique de la photosphère et des taches solaires par raymond Michard, 1953.

Etude de la photosphère et des taches solaires à l'aide des bandes moléculaires par Georges Laborde, 1960.

Un modèle de l'ombre des taches par Jean-Claude Henoux, 1969.

Contribution à l'étude de la polarisation de la lumière solaire par Jean-louis Leroy, 1962.

La tour solaire de Meudon, par Alain Miguel.

Un nouveau modèle des taches solaires par Frans Van't Veer, 1963.

Champ macroscopique des vitesses dans l'atmosphère solaire, d'après les mesures de déplacement des raies de Fraunhofer par Pierre Mein, 1966.

Contribution à l'étude de la structure du champ magnétique dans les taches solaires par Jean Rayrole, 1967.

Contribution à l'étude des champs magnétiques dans les régions actives solaires par Meir Semel, 1967.

Collectifs

Projet d'instrument pour l'observation solaire des îles canaries, 1975.

Forum Themis, 1979.

Themis, 1982.

Articles

Remarques sur l'effet Evershed par raymond Michard, Annales d'Astrophysique, 1950.

Observations photométriques et polarimétriques de la couronne externe par R. Michard, A. Dollfus, J.-C. Pecker, M. Laffineur et Mme M. d'Azambuja, Annales d'Astrophysique 1954.

Manifestation remarquable de l'activité solaire par M. d'Azambuja, L'Astronomie 1956.

Cartes journalières de l'activité solaire par J. Rayrole, L'Astronomie nov. 1956.

Observations aériennes de la couronne externe à l'éclipse du 20 juin 1955 par R. Michard, Annales d'Astrophysique 1956.

Premières observations avec le spectrographe solaire de 9 mètres par G. Laborde, R. Michard et R. Servajean, *Annales d'Astrophysique* 1957.

Spectroscopie des éruptions solaires dans le programme français de l'A.G.I. par R. Michard, R. Servajean et G. Laborde, *Annales d'Astrophysique* 1959.

The « flare spectrograph » in the french IGY program par R. Michard, R. Servajean et G. Laborde, 1959.

L'observation du Soleil et l'Année Géophysique, *l'Astronomie* 1959.

Champs magnétiques dans un centre d'activité solaire avant et pendant une éruption par R. Michard, Z. Mouradian et M. Semel, *Annales d'Astrophysique* 1960.

Observations systématiques des champs magnétiques des centres d'activité à l'observatoire de Meudon, par R. Michard et J. Rayrole.

La pression gazeuse dans les taches solaires par C et F Van't Veer, *Annales d'Astrophysique*, 1965.

Contribution à l'étude de la couronne lors de l'éclipse du 15 février 1961 par G. Laborde, R. Michard, G. Olivieri, J. Rayrole et R. Servajean, *Annales d'Astrophysique* 1964.

Mesure de l'écart des composantes Zeeman sur les spectres d'étoiles magnétiques par J. Rayrole.

Etude critique d'un champ « current-free » dans l'atmosphère solaire par J. Rayrole.

A subtractive double pass spectrograph for solar observations par P. Mein et M. Blondel, *Astronomy & Astrophysics* 1972.

Etude morphologique et cinématique des structures fines d'une tache solaire par R. Muller, *Solar Physics* 1973.

Etude photométrique des structures fines de la pénombre d'une tache solaire par R. Muller, *Solar Physic* 1973.

Multi-channel subtractive spectrograph and filament observations par P. Mein, A & A 1977.

Historique du Spectrographe Tourelle par Zadig Mouradian, 1980.

Champ magnétique et champ de vitesse dans les régions actives solaires par J. Rayrole, *l'Astronomie*.

A monochromator for solar quantitative imagery: the instrument FPSS par A. Dollfus, F. Colson, D. Crussaire et F. Launay, A & A 1985.

Imagerie quantitative des oscillations photosphériques par A. Dollfus et al, C. R. Academie de Sciences, 1984.

Cartographie détaillée de paramètres physiques de la photosphère par imagerie monochromatique par A. Dollfus et al, C. R. Academie de Sciences, 1986.

High-resolution analysis of solar photospheric oscillations par A. Dollfus, *Solar Physics* 1990.

Themis, un télescope pour comprendre le magnétisme solaire par J. Rayrole, *l'Astronomie* déc. 1990.

Themis par A. Lopez Ariste et B. Gelli, *l'Astronomie* juin 2004.

Documents

Synthèse d'ouverture optique en champ étendu, à trois télescopes cophasés par Jean-François Sauvage, rapport de stage 2003.

Solarnet, Synthèse d'ouverture optique pour l'observation à haute résolution du Soleil par Sophie Cladé et L. Damé.

Spectropolarimétrie, notions de base par Frédéric Paletou, cours de l'école doctorale, OCA 2002.

Astrophysique solaire par Jacques Dupré, cours Université Paris XI.

Ouvrages

Astrophysique générale par J.C. Pecker et E. Schatzman, éditions Masson, 1959.

Un siècle d'Astronomie par A. Dollfus, SAF et éditions Vuibert, 2003.

50 ans d'astronomie par A. Dollfus, EDP sciences, 1998.