

130 ans de spectrohéliogrammes aux observatoires de Paris et de Meudon (1893-2023)

J.-M. Malherbe, Observatoire de Paris, Université de Recherche PSL, CNRS, LESIA, Meudon, France

Courriel : Jean-Marie.Malherbe@obspm.fr

Identifiant ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4180-3729>

RESUME

Les observations à bande passante large de la photosphère solaire ont commencé à Meudon en 1875 sous les auspices de Jules Janssen. De son côté, Henri Deslandres a développé l'imagerie spectroscopique dès 1893, à l'observatoire de Paris. Il a inventé, en même temps que George Hale à Kenwood (USA), mais de manière tout à fait indépendante, le spectrohéliographe conçu pour l'imagerie monochromatique de l'atmosphère solaire. Deslandres a étudié deux types de spectrographes : le « *spectrohéliographe des formes* », c'est-à-dire un instrument à bande passante étroite pour révéler les structures chromosphériques (comme les filaments, les protubérances, les plages et les taches) ; et le « *spectrohéliographe des vitesses* », ou « *par sections* », pour enregistrer les profils des raies le long de coupes transversales du Soleil, par pas de 20" à 30". Ce deuxième appareil était destiné à mesurer les vitesses radiales (plus exactement les décalages Doppler) des structures en mouvement. Deslandres s'installa à Meudon en 1898 avec ses instruments et testa diverses combinaisons, afin d'améliorer les résolutions spectrale et spatiale, le conduisant au grand spectrohéliographe quadruple de 1908. Les observations systématiques en Call K ont commencé à cette date et ont été suivies dès 1909 par H α . Le service fut organisé par Lucien d'Azambuja et se poursuit aujourd'hui. Les pièces optiques et mécaniques ont été revues en 1989 et la technologie numérique fut introduite en 2002. Depuis 2018, les profils des raies complets sont enregistrés pour tous les points du Soleil, de sorte que l'instrument produit désormais des cubes de données. La collection est l'une des plus longues disponibles (plus de 100000 observations). Elle contient des images sporadiques de 1893 à 1907 (obtenues pendant la phase de développement) et des observations systématiques pendant 10 cycles solaires depuis 1908, dans les raies H α et Call K. Cet article résume 130 ans d'observations, de recherches instrumentales et de progrès techniques.

MOTS-CLES : Deslandres, d'Azambuja, Paris, Meudon, physique solaire, photosphère, chromosphère, spectroscopie, spectrohéliographe, spectrohéliogrammes, décalages Doppler, vitesse radiale

INTRODUCTION

Jules Janssen (1824-1907) a fondé l'observatoire de Meudon en 1875 et a introduit l'astronomie physique en France (Malherbe, 2022). Il a fallu deux décennies pour organiser la nouvelle institution (Janssen, 1896) et construire des instruments modernes (comme le double réfracteur et le télescope d'un mètre). Pendant ce temps, Janssen a commencé à observer la photosphère solaire, la couche visible [note 1]. Le premier daguerréotype du Soleil entier avait été obtenu bien avant, dès 1845 par Hippolyte Fizeau et Léon Foucault, à l'observatoire de Paris. Janssen a développé de son côté la photographie à haute résolution spatiale (Lecocguen & Launay, 2005) révélant les petits détails de la photosphère (granules et micro taches solaires appelées pores) avec un réfracteur optimisé construit par Adam Prazmowski (1821-1885). Les images furent enregistrées sur des plaques de verre de 30 x 30 cm² (Figure 1). Les émulsions étaient sensibles au bleu, au voisinage de la bande G de Fraunhofer (longueur d'onde de 4300 Å [note 2]). 6000 plaques ont été exposées, mais 99% ont malheureusement été détruites ou perdues. Les observations les plus réussies, montrant des détails fantastiques de la granulation pour l'époque, ont été publiées dans l'atlas photographique solaire (Janssen, 1903). Pour mémoire, la granulation (5 millions de granules de taille typique 1.5" soit 1000 km) recouvre uniformément la photosphère et constitue la signature de la convection interne.

Au même moment, Henri Deslandres (1853-1948), soutient son « *Doctorat ès Sciences* » (1888) dans le laboratoire d'Alfred Cornu à l'École Polytechnique, et est engagé en 1889 par l'Amiral Ernest Mouchez (le directeur de l'observatoire de Paris depuis 1878). Il est chargé d'organiser un laboratoire de spectroscopie, dans le cadre de l'expansion de l'astronomie physique introduite par Janssen à Meudon. Une biographie de Deslandres a été rédigée par d'Azambuja (1948) et une beaucoup plus étendue par Lequeux (2022a). Deslandres a d'abord construit un spectrographe classique et étudié les profils de la raie du Calcium ionisé (Call) à 3934 Å de longueur d'onde (la raie K) ; il a réussi à résoudre la structure fine du cœur en 1892. Ce fut le point de départ de la grande aventure des spectrohéliographes en France. Le principe a été proposé beaucoup plus tôt par Janssen (1869a, 1869b, 1869c) : avec un spectrographe classique, des images monochromatiques peuvent être délivrées par une fente de sortie située dans le spectre (sélectionnant la lumière d'une raie spectrale) lorsque la fente d'entrée balaie la surface solaire. Il est possible de déplacer soit l'image solaire sur la première fente, soit le spectrographe entier. Janssen a expérimenté un spectrohélioscope constitué d'un spectrographe tournant à grande vitesse autour de l'axe reliant les

deux fentes pour exploiter la persistance des impressions lumineuses sur la rétine. [Millochau & Stefanik \(1906\)](#), collaborateurs de Janssen, décrivent cet instrument ([Figure 1](#)) comme suit : « *il s'agit d'un spectroscope à vision directe... Au foyer de la lentille de la lunette, se trouve une deuxième fente, dont les deux lèvres peuvent être ajustées indépendamment et utilisées pour isoler le rayonnement souhaité. Cette fente est observée avec un oculaire positif. Le spectroscope ainsi décrit est contenu dans un tube, qui peut tourner rapidement autour de son axe au moyen d'un système d'engrenages. Cet instrument constitue donc un spectrohéloscope, et était destiné à l'étude visuelle des protubérances ; mais en substituant une plaque sensible à l'oculaire, il pourrait être immédiatement transformé en spectrohéliographe. L'appareil de M. Janssen incarne les principales caractéristiques du spectrohéliographe, bien que son idée n'ait pas été appliquée en pratique pendant une vingtaine d'années* ». Ainsi, deux décennies plus tard, le spectrohéliographe photographique est inventé sur cette base par George Hale à Kenwood (1892) et par Henri Deslandres à Paris (1893), simultanément mais indépendamment. A cet égard, Janssen affirme en 1906 : « *la méthode, que j'ai proposée en 1869, consiste en l'utilisation d'une seconde fente pour sélectionner dans le spectre, formé par la première fente, une raie spectrale d'intérêt. Hale et Deslandres ont habilement appliqué ce principe* ».

De nombreux spectrohéliographes ([Tableau 1](#)) ont été construits dans le monde, en suivant les techniques de Hale et Deslandres. Par exemple, des séries d'observations continues dans la raie Call K ont été collectées par les spectrohéliographes de Kodaikanal en Inde, du Mont Wilson aux États-Unis, de Mitaka au Japon, de Sacramento Peak aux États-Unis, de Coimbra au Portugal, de Meudon en France ou d'Arcetri en Italie. Ils ont produit des archives étendues dans le temps, certaines couvrant jusqu'à 10 cycles solaires, qui se sont avérées essentielles pour étudier l'activité solaire à long terme et analyser les événements rares (comme de grandes éruptions énergétiques, de gros groupes de taches solaires ou des filaments géants [[note 3](#)]). L'intensité de Call K est un excellent indicateur pour reconstruire l'irradiance et le magnétisme passés, car le cœur de la raie remonte fortement dans les régions brillantes (les plages) où le champ magnétique et le chauffage chromosphérique sont plus intenses ([Ermolli et al., 2018](#)).

Tableau 1. Collections majeures de spectrohéliogrammes dans la raie Call K. La colonne BP indique la bande passante des images monochromatiques en Angström [[note 2](#)]. Les spectrohéliogrammes de Meudon et de Coimbra ont des caractéristiques similaires et sélectionnent le centre de la raie (K3) grâce à leur bande passante étroite. Pour les deux observatoires, la collection supplémentaire dans l'aile violette (K1v) double le nombre d'images indiqué. Les images du Mont Wilson (K3) ont une bande passante similaire. D'après [Chatzistergos et al. \(2020\)](#).

Observatoire	Détecteur	Période	Nombre d'images	BP [Angström]	Pixel [arcsec]
Arcetri	Plaque	1931–1974	4871	0.3	2.5
Catania	Plaque	1908–1977	1008		1.1, 5
Coimbra	Plaque/CCD	1925–2019	19758	0.16	2.2
Kharkiv	Plaque/CCD	1952–2019	564	3.0	3.3
Kislovodsk	Plaque/CCD	1960–2019	9738		1.3, 2.3
Kodaikanal	Plaque	1904–2007	45047	0.5	0.9
Kyoto	Plaque	1928–1969	3119	0.74	2.0
McMath-Hulbert	Plaque	1948–1979	4932	0.1	3.1
Meudon	Plaque/CCD	1893–2019	20117	0.15, 0.09	2.2, 1.5, 1.1
Mitaka	Plaque	1917–1974	4193	0.5	0.9, 0.7
Mont Wilson	Plaque	1915–1985	39545	0.2	2.9
Sacramento Peak	Plaque	1960–2002	7750	0.5	1.2
Wendelstein	Plaque	1947–1977	422		1.7, 2.6

Les spectrohéliographes produisaient historiquement des images monochromatiques réparties le long des cycles solaires ([Figure 2](#)) à l'époque des plaques photographiques. La plupart d'entre eux ont fonctionné dans les raies Call K et H α de Fraunhofer formées dans la chromosphère. Ils ont été progressivement abandonnés dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle pour des lunettes utilisant des filtres passe bande étroits (comme les filtres de Fabry-Pérot ou de Lyot), plus compacts et capables d'observer, à une cadence plus élevée, des événements en évolution rapide (comme les éruptions). Cependant, avec les détecteurs électroniques modernes, il y a un regain d'intérêt pour l'imagerie spectroscopique, car les spectrohéliographes numériques peuvent maintenant fournir les profils complets des raies en chaque point du Soleil. Cette grande nouveauté est d'une importance cruciale pour les modèles de transfert radiatif et les simulations magnétohydrodynamiques (MHD), qui nécessitent l'observation des mouvements de matière (basée sur les mesures de décalage Doppler des raies [[note 4](#)]).

Cet article revient sur la fantastique saga de 130 ans d'observations monochromatiques et d'avancées technologiques aux observatoires de Paris et de Meudon. La [section 1](#) présente brièvement les pionniers. Les [sections 2 et 3](#) décrivent la phase expérimentale et de développement (1892-1907), tandis que la [section 4](#) détaille les spectrohéliographes de deuxième génération (1908-1909). Les recherches de L. d'Azambuja et le programme de cartes synoptiques sont abordés à la [section 5](#). Les observations spécifiques (1919-1939) réalisées pour l'étude des mouvements (mesures Doppler [[note 4](#)]) sont relatées dans la [section 6](#), tandis que la [section 7](#) développe l'âge d'or des observations systématiques et des grands relevés solaires dans le contexte international (1908-1988). Cette longue période a permis d'enregistrer des événements rares abordés dans la [section 8](#). Enfin, la [section 9](#) résume l'ère moderne menant à l'instrument numérique de pointe, après 2017.

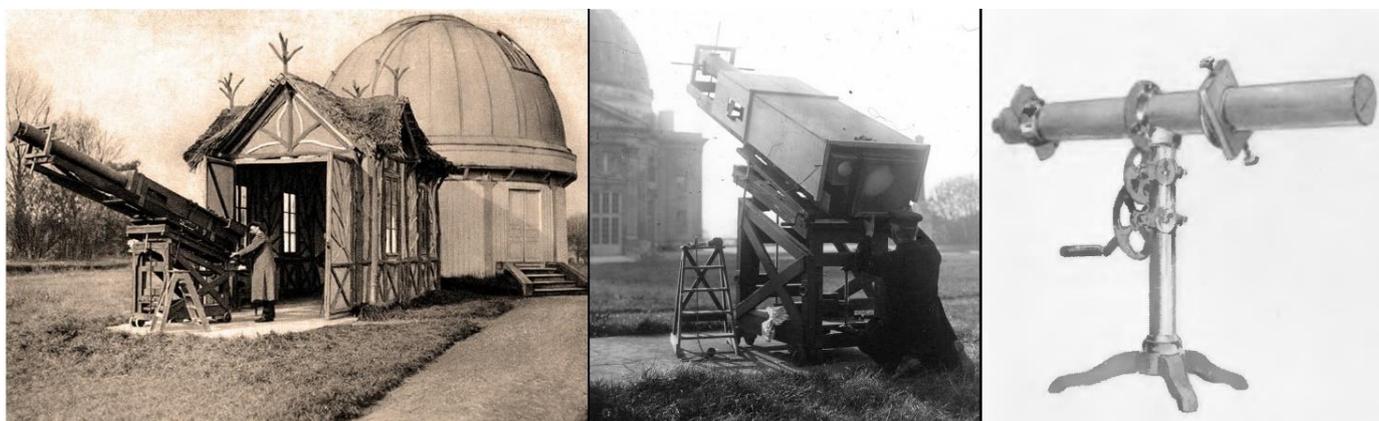


Figure 1. Les instruments de Janssen. À gauche et au centre : la lunette solaire a produit 6000 images de la photosphère pendant 25 ans. Il s'agissait d'un réfracteur à large bande passante de 135 mm de diamètre (distance focale de 2.2 m) optimisé pour la partie bleue du spectre. Un oculaire agrandit l'image primaire (20 mm de diamètre) pour enregistrer les détails de la surface solaire sur des plaques photographiques de 30 x 30 cm². Les meilleures images de la granulation solaire et des taches ont été publiées dans l'atlas photographique de Janssen. À droite : l'ancêtre du spectrohéliographe est constitué d'un spectroscopie à vision directe à deux fentes, tournant autour de son axe à l'aide d'une manivelle et d'engrenages (à gauche : crédit observatoire de Paris ; au centre : crédit Gallica/BNF ; à droite : d'après [Millochau & Stefanik, 1906](#)).

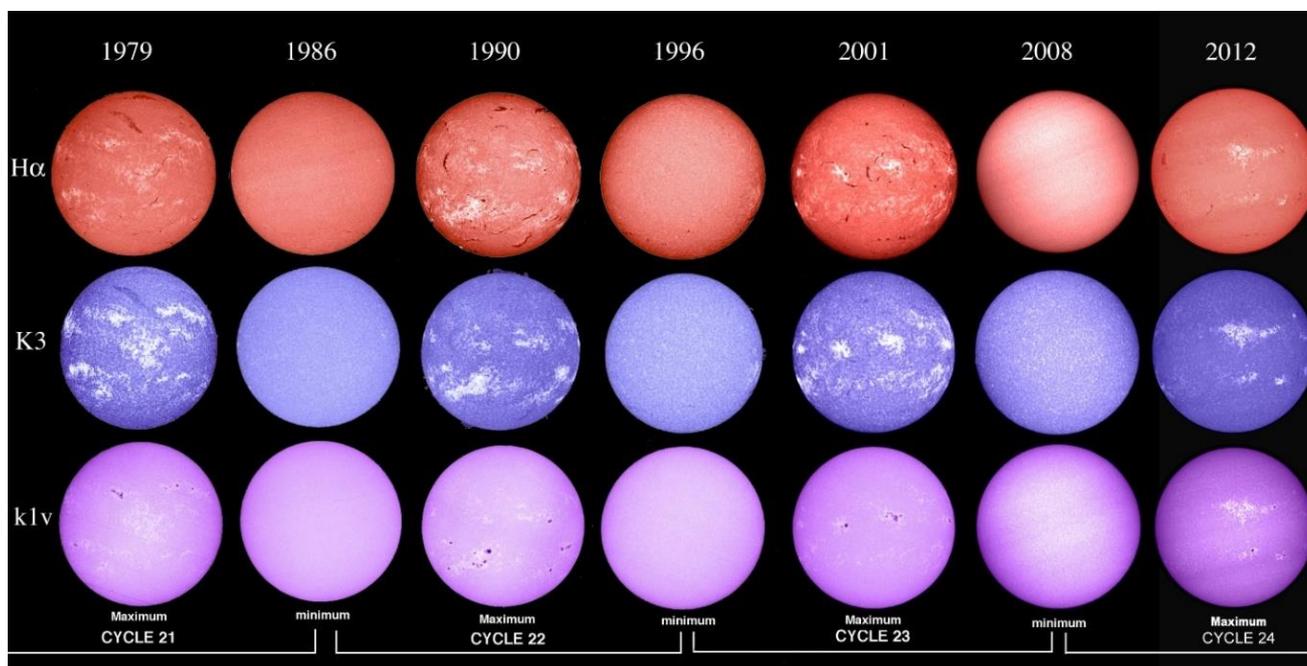


Figure 2. Un sous-ensemble d'images aux minima et maxima solaires successifs obtenues au spectrohéliographe de Meudon (cycle de 11 ans). La chromosphère (avec des filaments sombres et des plages brillantes) est visible au centre de la raie H α ou au centre (K3) de la raie CaII K. La photosphère (taches et facules brillantes) apparaît dans l'aile bleue (K1v) de la raie CaII K. Fausse couleurs. Les différentes longueurs d'onde révèlent les phénomènes d'activité solaire à différentes hauteurs dans l'atmosphère. Les structures sont liées au magnétisme solaire, fort dans les taches, intermédiaire dans les régions faculaires et faible dans les filaments. Crédit observatoire de Paris.

1 - LES PIONNIERS

Pour étendre ses travaux démarrés à Kenwood (Chicago), G. Hale fonda en 1905 l'observatoire du Mont Wilson et y installa un spectrohéliographe de cinq pieds (Hale, 1906b) alimenté par le télescope Snow (Hale, 1906a) pour recueillir régulièrement des images monochromatiques du Soleil. Entre temps, Deslandres (Figure 3) s'installa à Meudon en 1898, établissement spécialisé en physique solaire et en imagerie à large bande du Soleil, afin de bénéficier de meilleures conditions pour le développement de ses activités de recherche. En effet, elles aboutiront dix ans plus tard, en 1908, sous la forme d'un spectrohéliographe quadruple exceptionnel de 14 mètres placé dans un nouveau laboratoire, dédié à la surveillance de l'activité solaire et à la recherche.

Deslandres engagea en 1899 un jeune assistant, Lucien d'Azambuja (1884-1970, Figure 3), qui n'avait que quinze ans. A la mort de Janssen en 1907, Deslandres fut nommé nouveau directeur de l'observatoire de Meudon et son élève d'Azambuja devint responsable des instruments solaires ; il fut chargé d'organiser le service des observations systématiques. Deux biographies de L. d'Azambuja ont été écrites par Röscher (1970) et Martres (1998). Les observations systématiques de la photosphère et de la chromosphère [note 1] ont commencé en 1908 et se poursuivent aujourd'hui (Figure 2). Deslandres revint à Paris en 1926 lorsque les deux observatoires se réunirent, pour devenir le premier directeur de l'institution ainsi élargie. D'azambuja soutint sa thèse de « *Doctorat ès Sciences* » (d'Azambuja, 1930) et prit la direction du site de Meudon. Il y initia le dessin des cartes synoptiques de la chromosphère (d'Azambuja, 1928). Il publia ensuite, en collaboration avec son épouse Marguerite (1898-1985, née Roumens, Figure 3, biographie rédigée par Martres, 1991), un volumineux mémoire (280 pages, d'Azambuja & d'Azambuja, 1948) sur les filaments et les protubérances [note 3], qui deviendra une étude de référence. Ce travail scientifique et les cartes synoptiques furent leur contribution commune et majeure à la physique solaire. La vie à l'observatoire de Meudon, à l'époque de Deslandres, a été décrite par Lequeux (2022b), et après 1925, par Mme d'Azambuja (1980). Lorsque L. d'Azambuja partit en retraite en 1954, son épouse lui succéda à la tête du service solaire, et à son tour prit sa retraite en 1959 ; et finalement, ils quittèrent ensemble Meudon à cette date, après 60 années d'extraordinaire activité (1899-1959) consacrées au Soleil.

Roger Servajean (1913-1986) et Gualtiero Olivieri (1928-2021), engagés respectivement par L. d'Azambuja en 1938 et 1945 (Olivieri n'avait alors que dix-sept ans), poursuivirent les observations, en collaboration avec Marie-Josèphe Martres (1924-2017) puis Elizabeth Nesme-Ribes (1942-1996). Olivieri est resté 47 ans à l'observatoire et a eu la chance de travailler pendant 14 ans avec les d'Azambuja. Il a résumé la période postérieure à la seconde guerre mondiale (1945-1950) dans quelques mémoires (Olivieri, 1993). Enfin, l'auteur de cet article est responsable du spectrohéliographe de Meudon depuis 1996, en collaboration avec Isabelle Bualé.

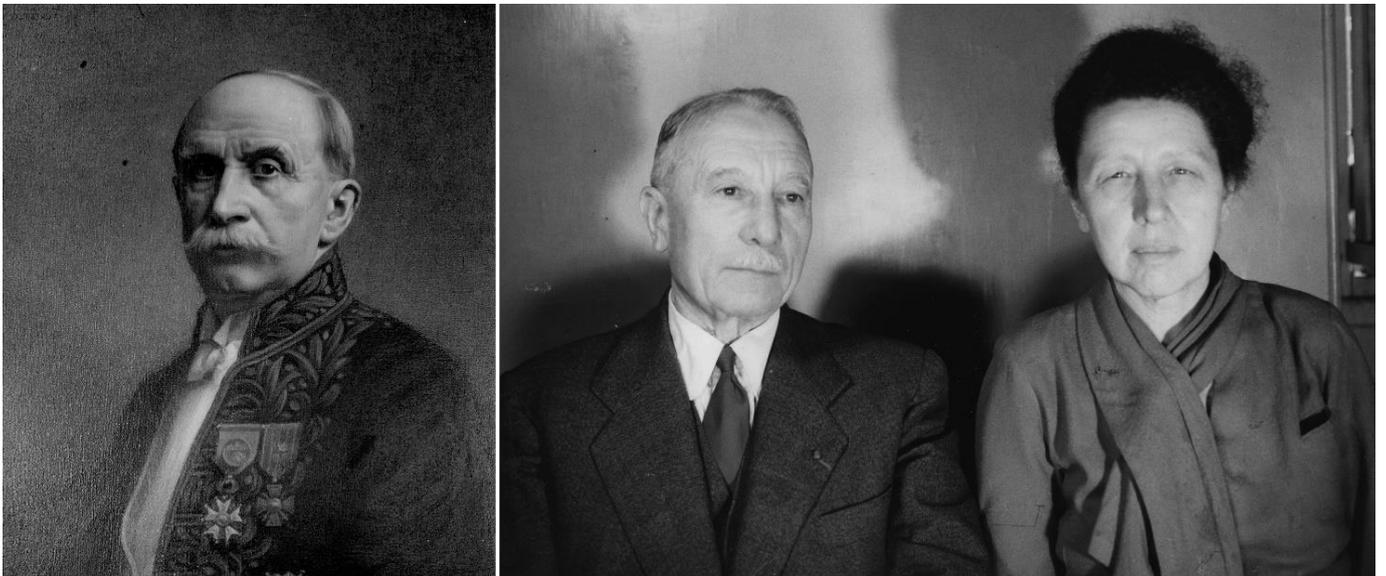


Figure 3. Les pionniers. Henri Deslandres (1853-1948, à gauche) a développé les spectrohéliographes français entre 1893 et 1909. Lucien d'Azambuja (1884-1970, au centre) et Marguerite d'Azambuja (née Roumens, 1898-1985, à droite) ont organisé les observations systématiques du Soleil et créé des produits dérivés (tels que des cartes synoptiques et des catalogues de structures). Ces personnages sont à l'origine de l'une des plus longues collections mondiales d'images monochromatiques du Soleil (observations sporadiques de 1893 à 1907 et continues depuis 1908, à l'exception de la première guerre mondiale). Crédit observatoire de Paris.

2 - LA NAISSANCE DU SPECTROHELIOGRAPHE DE DESLANDRES A PARIS (1891-1897)

Deslandres fut recruté en 1889 pour établir un laboratoire spectroscopique par l'amiral Mouchez, successeur d'Urbain Le Verrier (1811-1877) à la tête de l'observatoire de Paris. Le Verrier était un spécialiste bien connu de mécanique céleste, mais il avait négligé l'importance de l'astronomie physique en cours de développement dans de nombreuses institutions et pays. [Dollfus \(2003a, 2003b\)](#) a raconté les débuts de la spectroscopie solaire à Paris.

[Deslandres \(1894a, 1894b\)](#) a exposé avec précision ses recherches instrumentales. Il monta d'abord un spectrographe classique dans le jardin nord de l'observatoire parisien ([Figure 4](#)) alimenté en lumière par un petit sidérost de Foucault de 30 cm de diamètre [[note 5](#)]. De nombreux tests de différentes combinaisons optiques furent entrepris. En mai 1891, Deslandres utilisa un objectif de 30 cm de diamètre pour former l'image solaire sur la fente de son spectrographe. Il était composé d'un collimateur de 0.50 m et d'une chambre de 0.70 m, disposait d'un réseau réglable, d'un support de plaque photographique et d'une deuxième chambre auxiliaire pour l'inspection visuelle du spectre. En août 1891, d'autres essais furent effectués avec un miroir concave de 20 cm de diamètre, d'abord avec des prismes, puis avec un réseau plan de Rowland plus dispersif, dans l'ordre 4. Enfin, en Décembre 1891, Deslandres introduisit un collimateur et une chambre de plus longue focale (1.35 m pour les deux), permettant de doubler la dispersion. Dès 1891, il réussit à observer la série de Balmer de l'Hydrogène ($H\alpha$ à $H\epsilon$, désignant les transitions électroniques du niveau 2 aux niveaux 3, 4, 5, 6, 7) ainsi que les raies fortes Call H et K dans le proche ultraviolet du spectre. Les émulsions photographiques étant sensibles au bleu, il étudia les profils de la raie Call K dans diverses structures chromosphériques [[note 3](#)] comme les plages brillantes, les protubérances et les taches solaires ([Figure 5](#)). Deslandres remarqua la complexité du profil de la raie K du Calcium, composé d'un coeur étroit (K3), de deux pics adjacents (K2r, K2v) et d'ailes étendues (K1r, K1v, les lettres r et v désignant respectivement l'aile rouge et violette), qui se forment à différentes altitudes ([Figure 5](#), en haut). Il découvrit que les composantes K2 et K3 peuvent varier considérablement en fonction de la structure observée, en particulier dans les plages, car la raie est très sensible aux fluctuations de température.

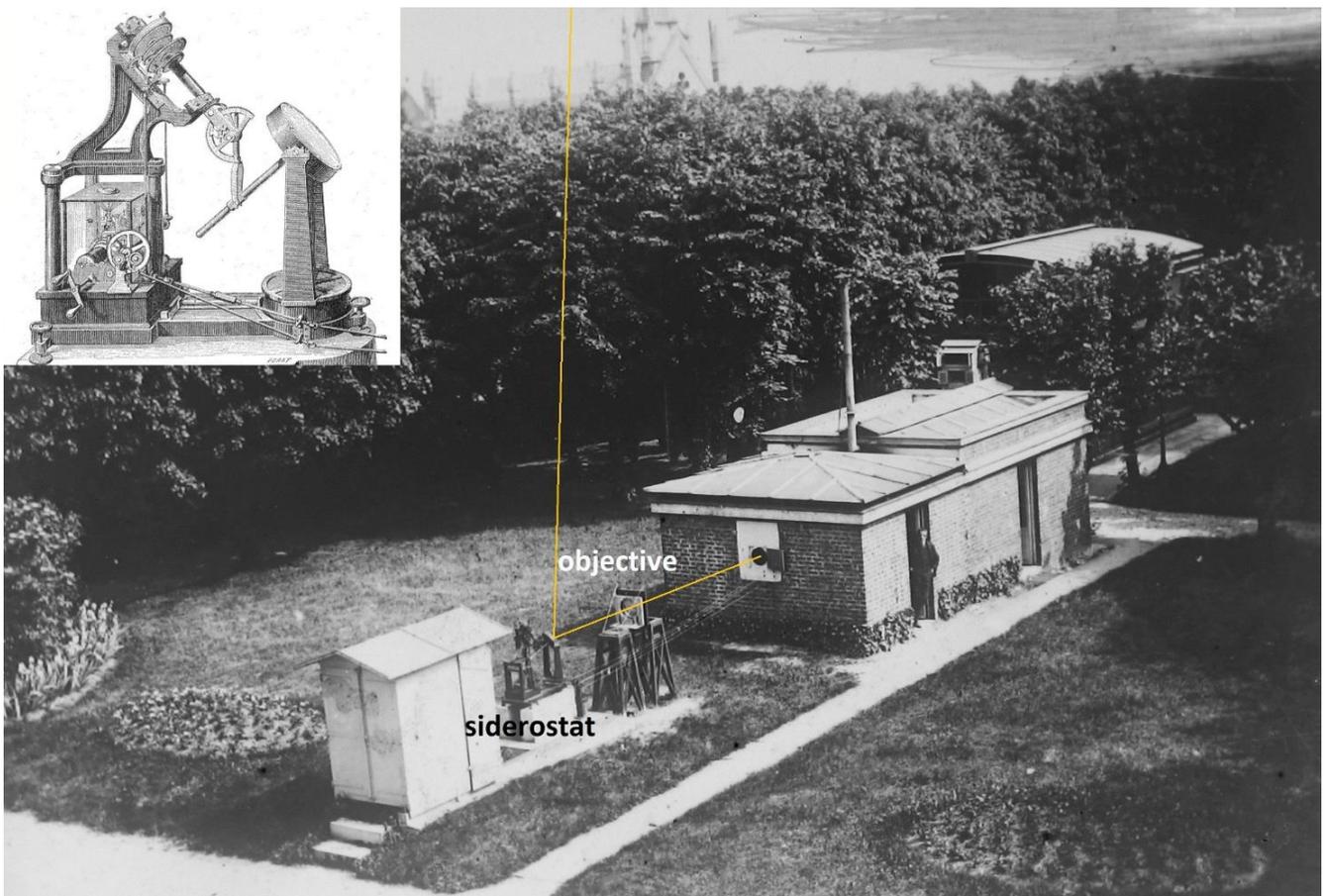
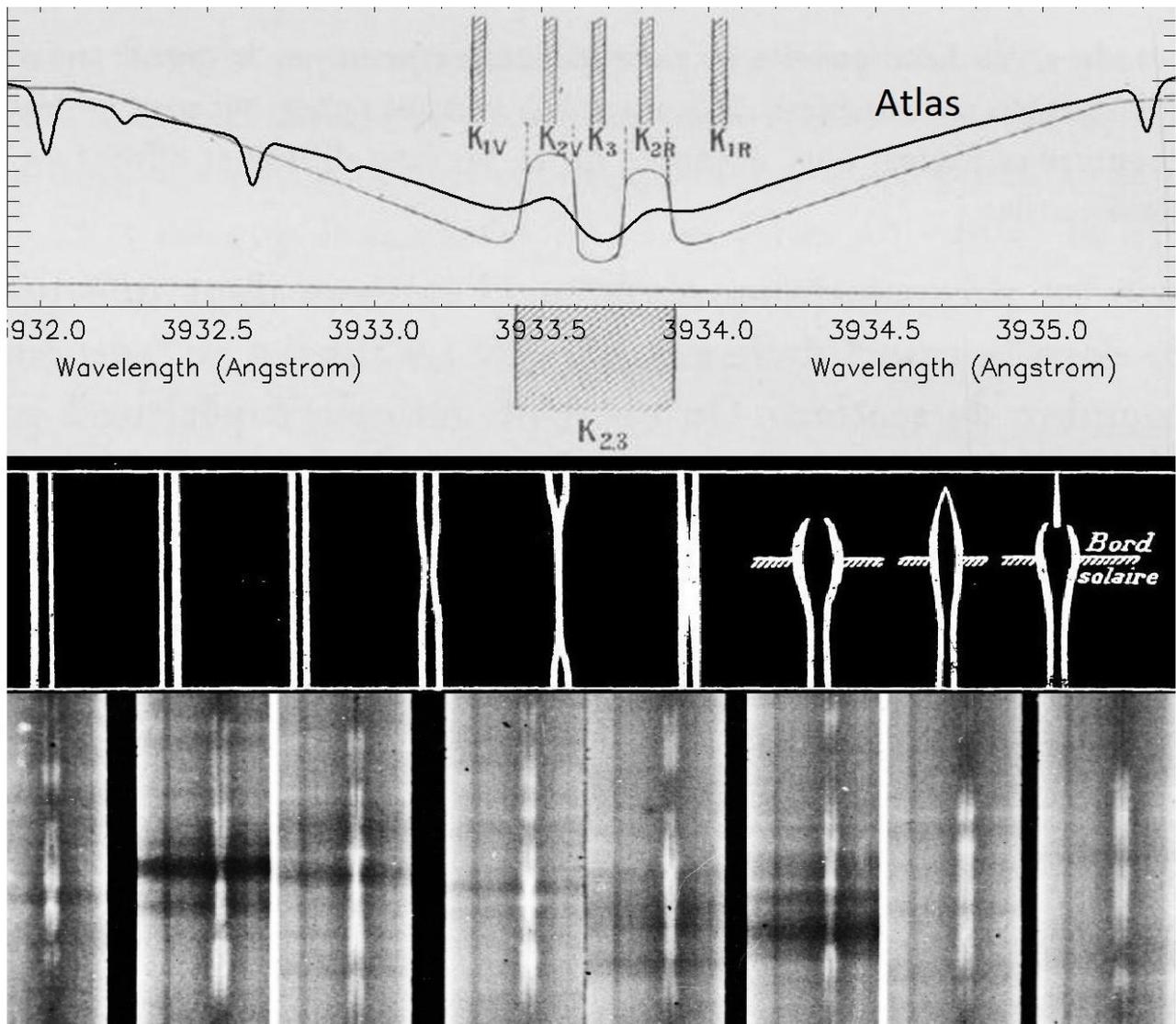


Figure 4. Le spectrohéliographe de Deslandres à Paris (1890-1897), dans le jardin situé au nord de l'observatoire. La lumière solaire est recueillie par un petit sidérost de Foucault (coin supérieur). Le faisceau réfléchi est horizontal et a une direction fixe. Il traverse un objectif qui forme l'image solaire sur la fente du spectrographe, situé à l'intérieur du bâtiment. Le spectrographe et la plaque photographique roulent ensemble sur des rails pour balayer la surface solaire et enregistrer les images monochromatiques. Crédit observatoire de Paris.



K2v, K2r drawings and K line observations at various locations

Figure 5. Observations de la raie Ca II K par Deslandres (1892) et identification des différentes composantes (spectrographe à réseau). En haut : dessin montrant les détails du profil de la raie K (un profil d'atlas moderne est superposé d'après [Delbouille et al., 1973](#)). K1v, K1r sont respectivement les ailes violette et rouge, formées dans la photosphère. K2v et K2r sont des pics à $\pm 0.2 \text{ \AA}$ du centre de la raie K3, tous sont formés dans la chromosphère, mais K3 possède la plus haute altitude. Le premier spectrohéliographe utilisait un prisme unique et n'était pas capable de séparer K2v, K3 et K2r ; il fournissait à la place une intégration en longueur d'onde appelée K23 (bande passante de 0.5 \AA). Au milieu : dessins des profils à différents endroits du Soleil, y compris le limbe (les traits blancs représentent les composantes K2v et K2r). En bas : spectres enregistrés sur des plaques photographiques (18 mai 1894) dans diverses régions actives (longueur d'onde en abscisse, direction le long de la fente en ordonnée). Les pics K2v et K2r sont particulièrement brillants dans les plages (chaudes) et disparaissent dans les taches solaires sombres (froides). D'après [Deslandres \(1905a et 1910\)](#) et crédit observatoire de Paris.

Les premiers spectrohéliographes furent testés entre 1892 et 1894 avec la raie Ca II K, en raison de la sensibilité dans le bleu des plaques photographiques. L'objectif initial de Deslandres étant d'étudier la nature des structures solaires, et il décida de déterminer deux paramètres complémentaires : l'intensité et la vitesse radiale. À cette fin, il construisit et testa deux types de spectrohéliographes ([Deslandres, 1905a](#)).

Le premier instrument, appelé « *spectrohéliographe des formes* », produisait une image monochromatique grâce à la deuxième fente dans le spectre, en sélectionnant la partie centrale K23 de la raie K (c'est-à-dire l'intégration en longueur d'onde de K2r, K3, K2v, voir [Figure 5](#)). L'appareil montrait les formes et la brillance ou l'intensité des structures chromosphériques ; il roulait à vitesse constante sur des rails pour balayer le Soleil avec la première fente. L'objectif d'entrée avait un diamètre de 12 cm, une distance focale de 2.80 m, tandis que les longueurs focales du collimateur et de la chambre étaient respectivement de 0.50 m et 1.0 m (grandissement 2.0),

de sorte que l'image monochromatique faisait 50 mm de diamètre. L'élément dispersif était un prisme unique de flint léger et d'angle de 60° au minimum de déviation.

Le deuxième appareil était appelé « *spectrohéliographe des vitesses* » ou encore « *spectrohéliographe par sections* ». Il utilisait une fente beaucoup plus large dans le spectre (typiquement 1.5 mm au lieu de 0.1 mm), afin de transmettre le profil complet de la raie Call K (Figure 5, en bas). Il permettait de mesurer le décalage Doppler [note 4] de la composante K3 afin de quantifier les vitesses projetées sur la ligne de visée (ou vitesses radiales) des structures. Comme la fente de sortie était élargie, le spectrographe devait se déplacer pas à pas (1 pas = 20"-30" sur la surface solaire), de sorte que les profils des raies correspondant aux sections (ou coupes) équidistantes sur le Soleil étaient enregistrés de manière contiguë sur la plaque photographique. Afin de résoudre correctement les détails des profils, un élément à forte dispersion était nécessaire, soit un réseau de Rowland à l'ordre 4. L'objectif d'entrée avait un diamètre de 30 cm, une distance focale de 5.0 m, tandis que les focales du collimateur et de la chambre étaient identiques (1.30 m, grandissement 1.0), donnant des sections d'environ 50 mm de hauteur.

D'Azambuja (1920a, 1920b) nous explique le montage optique et les différents mécanismes des premiers spectrohélographes (Figure 6). Le spectrographe se déplace à vitesse constante V_1 pour balayer la surface solaire (première fente F_1). La deuxième fente (F_2) sélectionne la raie spectrale. Afin de former une image monochromatique du Soleil, la plaque photographique (C_2) bouge simultanément à la vitesse $V_2 = \gamma V_1$, où $\gamma = f_2/f_1$ est le facteur de grandissement du spectrographe. Le rôle des deux leviers (L_1) et (L_2) est d'amplifier le mouvement de (F_1) ; ils sont reliés au point fixe (A) et tournent autour du point pivot (R) attaché au spectrographe. Les longueurs (L_1 , L_2) des leviers sont dans le rapport du grandissement optique, soit $L_2/L_1 = \gamma$. Les leviers (L_1 , L_2) et les points (A, R) sont indiqués sur les deux photographies de la Figure 6 montrant le « *spectrohéliographe des formes* » (à gauche, en déplacement continu et avec prisme à faible dispersion) et le plus sophistiqué « *spectrohéliographe des vitesses* » (à droite, en translation discontinue et avec réseau de dispersion élevée). Les mouvements pas à pas du deuxième instrument étaient effectués manuellement ou par le dispositif mécanique décrit plus loin.

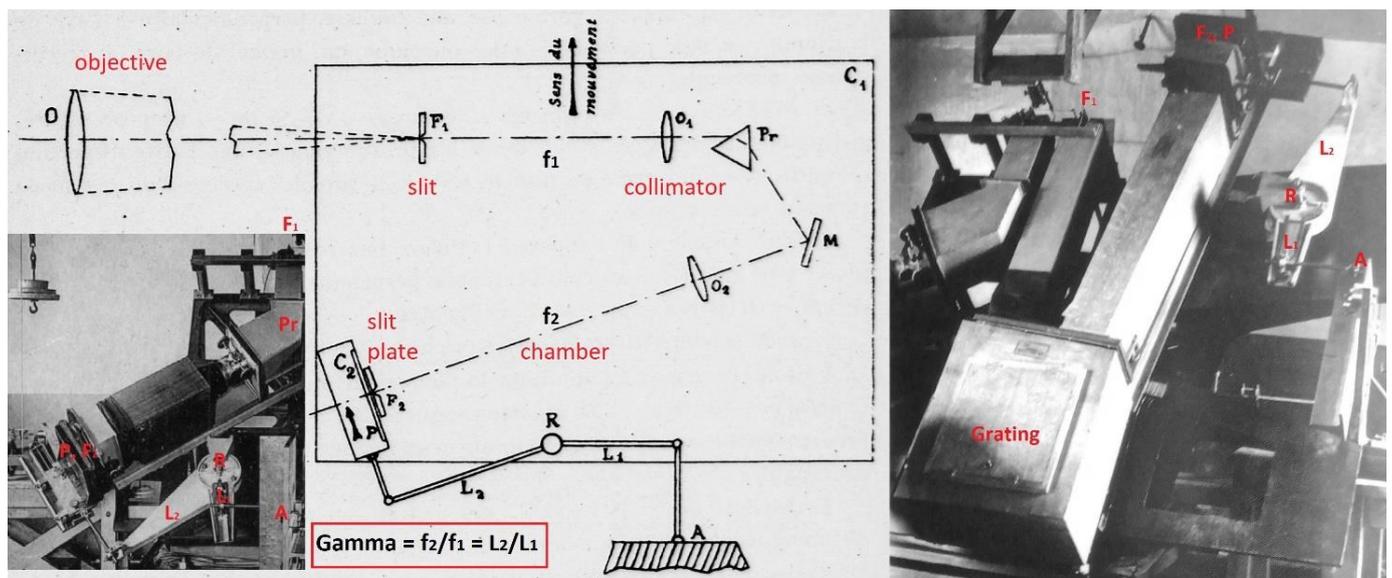


Figure 6. Le principe du spectrohélographe (dessin d'après d'Azambuja, 1920b). Le spectrographe se déplace sur des rails et la fente (F_1) balaie la surface solaire. La deuxième fente (F_2) sélectionne la raie dans le spectre. Un mécanisme translate la plaque photographique pour y former une image monochromatique (O = objectif ; F_1 = fente d'entrée ; O_1 = collimateur ; O_2 = chambre ; M = miroir plan ; Pr = prisme ; F_2 = fente de sortie ; A = point fixe ; R = point pivot attaché au spectrographe). Le grandissement optique $\gamma = f_2/f_1$ est égal au rapport L_2/L_1 des longueurs de leviers. Les deux photographies montrent le « *spectrohéliographes des formes* » à gauche (instrument à prisme et faible dispersion) et le « *spectrohéliographe des vitesses* » à droite (instrument à réseau et dispersion plus forte). Ils sont installés sur la même table roulante ; dans les deux cas, les points (A, R) et les leviers (L_1 , L_2) sont indiqués. Crédit observatoire de Paris.

L'un des premiers spectrohélogrammes (1893) obtenus en K23 au centre de la raie Call K, à l'aide d'un prisme unique, est représenté sur la Figure 7 (diamètre de l'image 50 mm). Il révèle les taches solaires et des zones brillantes autour, appelées par Deslandres « *plages faculaires* ». Hale utilise le nom de « *flocculi* », également pour les petits points lumineux formant le réseau chromosphérique (des cellules de 30000 km appelées supergranules) en dehors des régions actives. Deslandres préférerait les termes « *plages* » ou « *facules* » pour les grandes zones brillantes, qui dépendent de la phase du cycle d'activité solaire de 11 ans, et réservait « *flocculi* » au réseau, qui est

permanent. Les filaments solaires sombres [note 3] n'étaient pas encore visibles, car la bande passante de K23 était trop large. Nous savons que ces structures n'apparaissent que dans le coeur de la raie (K3), qui ne pouvait pas être sélectionné par ces spectrohéliographes de première génération. Cependant, K23 a révélé les protubérances au limbe, sur le fond de ciel. Comme le temps d'exposition requis pour les protubérances est cinq fois supérieur à celui utilisé pour le disque solaire, Deslandres a interposé un masque circulaire sur l'image pour éliminer l'excès de lumière entrant dans le spectrographe.

En 1897, ce spectrohéliographe a été un peu modifié. Par la suite, il a été alimenté par le même objectif d'entrée de 30 cm de diamètre (focale de 5.0 m) que celui utilisé pour le « spectrohéliographe des vitesses » (décrit ci-dessous). Le collimateur et la lentille de chambre, respectivement de longueur focale 0.65 m et 1.0 m (grandissement optique 1.54), produisaient des images monochromatiques plus grandes (82 mm de diamètre), proches de la taille standard de 86 mm adoptée en 1908.

Les premiers spectrohéliogrammes dédiés aux vitesses radiales ont été produits en 1894 avec le deuxième appareil se déplaçant de manière discontinue, par pas de 30" environ, et utilisant le réseau de Rowland à dispersion élevée, pour résoudre le profil de la raie Call K (Figure 8). L'image était composée de 60 sections, ou 60 coupes transversales du Soleil, fournissant le profil de la raie le long de la fente d'entrée. Pour chaque pas du spectrographe (0.8 mm), la plaque photographique se déplaçait de 2.2 mm. Pour cette raison, l'image finale (environ 50 x 140 mm²) était elliptique et composée de la juxtaposition de 60 spectres (λ , y), λ et y étant respectivement la longueur d'onde et la coordonnée le long de la fente. La largeur de la fente de sortie dans le spectre (1.5 mm) correspondait à une bande spectrale d'environ 2 à 3 Å centrée sur la raie. Les déplacements du coeur K3 de la raie (décalages Doppler [note 4]) étaient mesurés pour fournir la vitesse de la matière projetée sur la ligne de visée.

Nous avons vu que l'objectif initial de Deslandres était d'enregistrer avec la plus grande régularité possible des images monochromatiques de la chromosphère, et aussi d'étudier les mouvements de matière dans les structures solaires. Les instruments de première génération développés à Paris (1891-1897) ont démontré que cet objectif pouvait être atteint. De nombreux développements originaux se sont poursuivis à Meudon après 1898 ; ils débouchèrent en 1908 sur la seconde génération d'instruments dotés de capacités améliorées, tant pour les observations systématiques que pour les activités de recherche pure.

Spectroheliogram Call K23 - 17 November 1893
Paris observatory

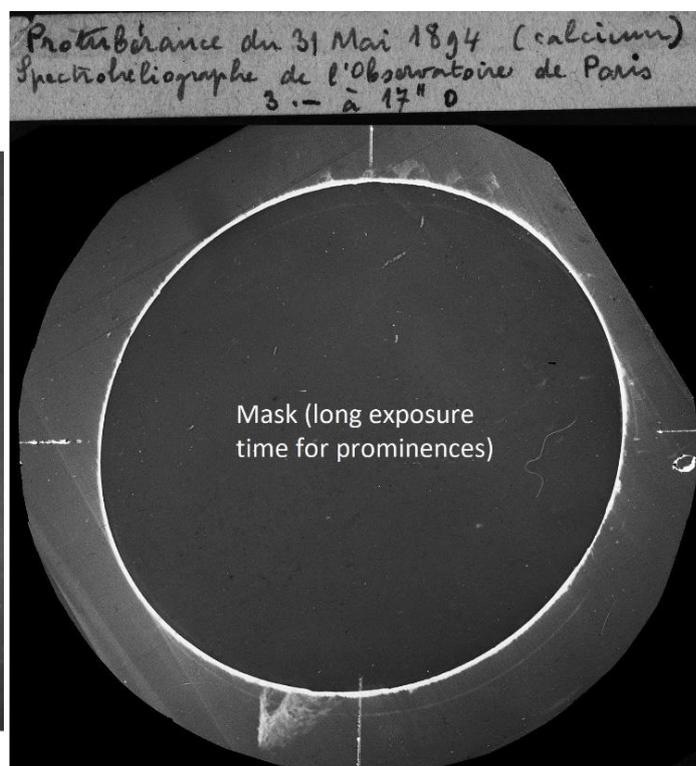
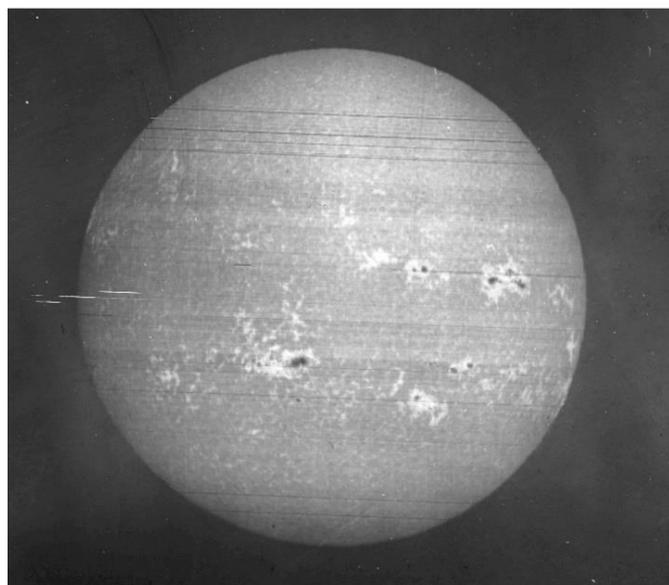


Figure 7. Premiers spectrohéliogrammes (1893) obtenus à Paris par Deslandres dans la raie Call K (K23 ou intégration en longueur d'onde des composantes K2v, K3, K2r). Dans l'image de droite, un masque a été placé dans l'image solaire pour augmenter le temps d'exposition et dévoiler les protubérances solaires au limbe, qui sont beaucoup moins lumineuses que le disque. Crédit Observatoire de Paris.

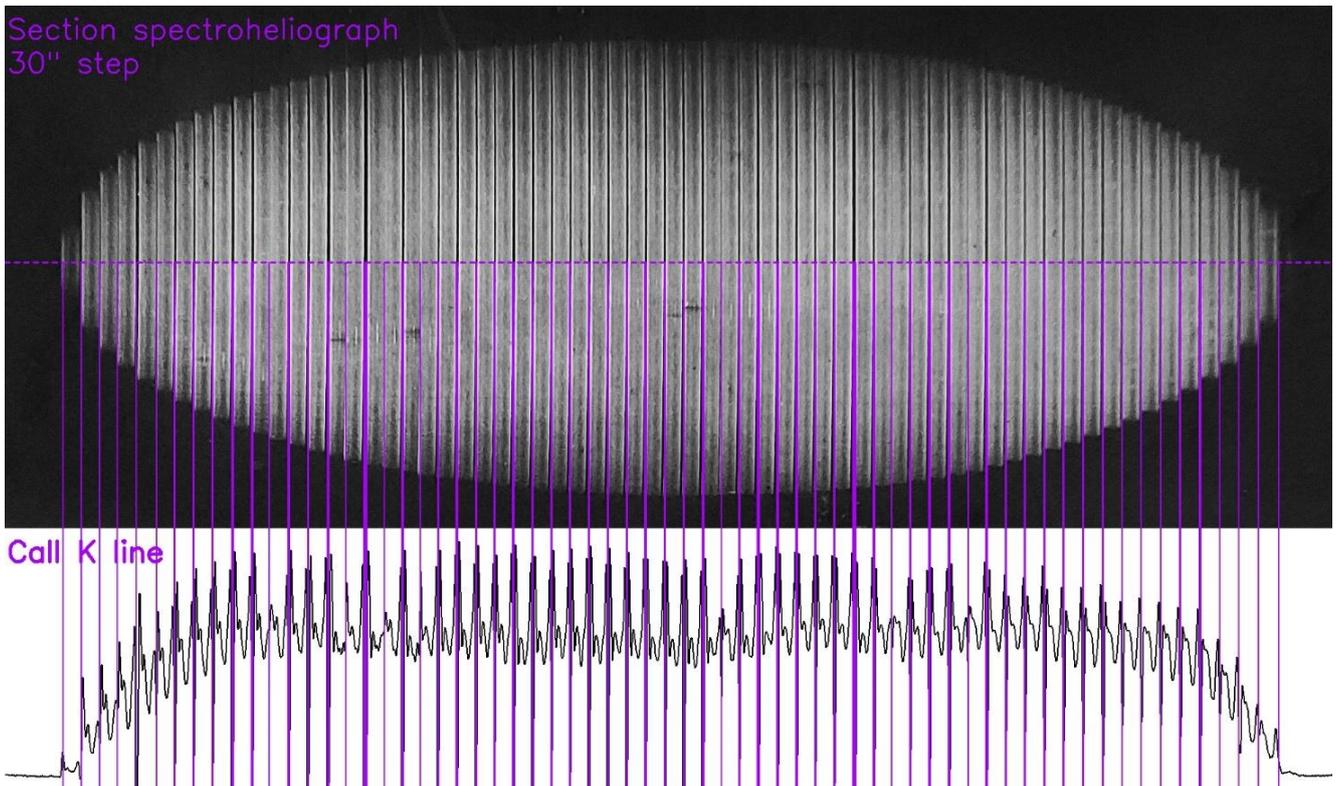


Figure 8. En haut : « spectrohéliogramme par sections » (18 mai 1894) obtenu à Paris par Deslandres dans la raie Call K. Le balayage de la surface solaire était discontinu ; la fente se déplaçait par pas d'environ 30", de sorte que 60 sections, ou coupes transversales du Soleil, étaient enregistrées contiguëment sur la plaque photographique. La fente de sortie, située dans le spectre, était élargie pour enregistrer le profil de la raie dans une bande passante de 2 à 3 Å permettant la mesure des vitesses projetées sur la ligne de visée, via le décalage Doppler de la composante K3. En bas : les profils de la raie Call K le long de l'équateur pour chaque section. Crédit observatoire de Paris.

3 - EXPERIENCES DE DESLANDRES AU PETIT SIDEROSTAT DE MEUDON (1898-1907)

Deslandres décida de quitter Paris en 1898 et de relocaliser ses instruments et ses activités de recherche à l'observatoire de Meudon. En effet, il explique : « *il n'a pas été possible d'en faire plus à l'observatoire de Paris, qui est principalement impliqué dans l'astrométrie et considère les recherches solaires comme une seconde priorité... J'ai déménagé en 1898 à l'observatoire de Meudon, consacré à la physique solaire et offrant des perspectives plus intéressantes...* ». Mais à Meudon, ce n'était pas si simple et tout restait à faire ! A l'arrivée de Deslandres, l'observatoire avait l'aspect que l'on peut voir sur la [Figure 9](#) et la [Figure 10](#). Le petit laboratoire (B) a été construit en 1898 afin d'installer les instruments parisiens, et le laboratoire beaucoup plus grand (D) a été érigé en 1907 pour la deuxième génération de spectrohéliographes.

A l'arrivée de Deslandres à Meudon, les instruments de Paris furent installés dans le nouveau laboratoire de la [Figure 11](#) appelé « *Petit Sidérost* », construit à cet effet ([Deslandres, 1905b](#)). La lumière solaire était captée par un sidérost polaire ([Figure 12](#)) [note 5] précédemment utilisé par Janssen pour observer le transit de Vénus de 1874 au Japon. Le diamètre du miroir était de 30 cm. En pratique, Deslandres trouva à Meudon des conditions d'observation pires qu'à Paris ! Le sidérost polaire lui apporta de nombreuses difficultés par rapport au sidérost de Foucault parisien ; en particulier, les spectrohéliographes ne pouvaient pas être horizontaux mais devaient rester inclinés. Cependant, le contexte meudonnais (car la physique solaire y était la première priorité) et les perspectives d'extensions et de développements futurs étaient bien meilleures.

Deslandres fut bientôt aidé par L. D'Azambuja, embauché en 1899. Il rapporte : « *la nouvelle organisation fut mise au point à Meudon avec un jeune assistant, L. d'Azambuja, dont le zèle et l'intelligence étaient remarquables* ». Les deux spectrohéliographes ([Figure 13](#)) étaient montés sur une table inclinée de 1,70 x 1,10 m², contenant l'axe polaire, et roulait doucement sur deux rails. L'objectif d'imagerie de 20 cm de diamètre avait une distance focale de 3.10 m, fournissant une image primaire de 29 mm de diamètre.

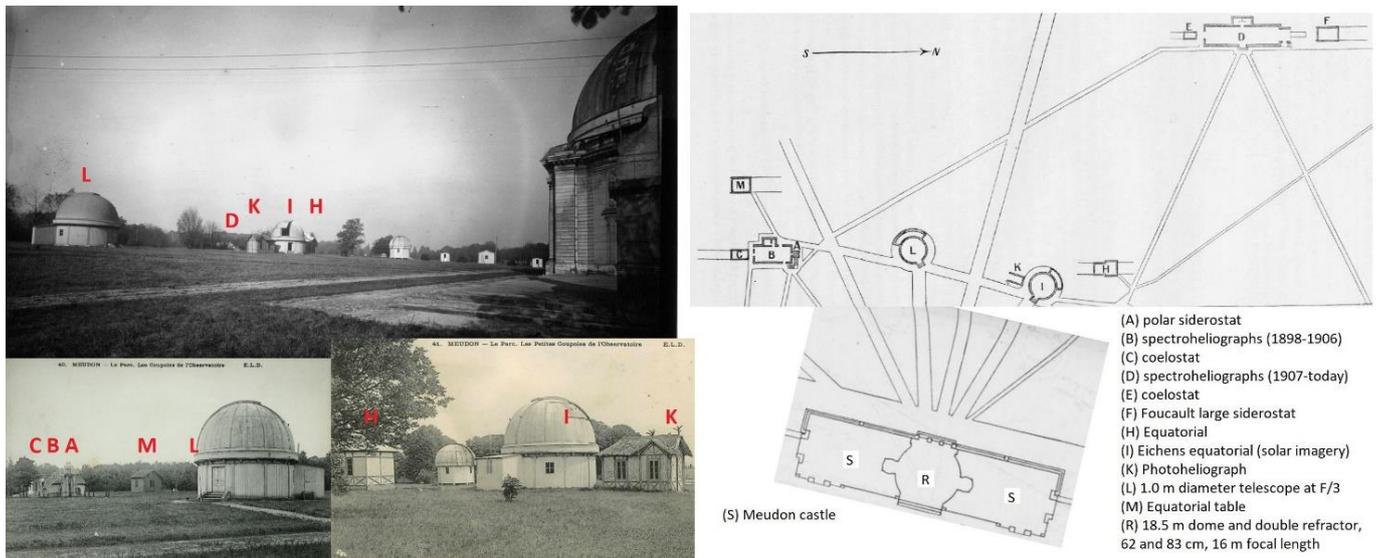


Figure 9. L'observatoire de Meudon en 1910. Deslandres a installé les instruments parisiens dans le laboratoire (B), construit en 1898. Il était alimenté par un siderostat polaire (A) ; en 1906, un petit coelostat (C) a été ajouté. Puis en 1908, le grand spectrohéliographe quadruple a été construit dans le bâtiment (D), alimenté par le coelostat (E). Plus tard, un grand siderostat de Foucault (F) a été ajouté, mais il ne fut jamais employé aux observations quotidiennes. La célèbre lunette de Janssen pour l'imagerie solaire à large bande est en (K). Les instruments de nuit (double réfracteur de 83 cm et 62 cm, télescope de 100 cm), achevés en 1893, sont respectivement placés en (R) et (L). Crédit observatoire de Paris et d'après [Deslandres \(1910\)](#).

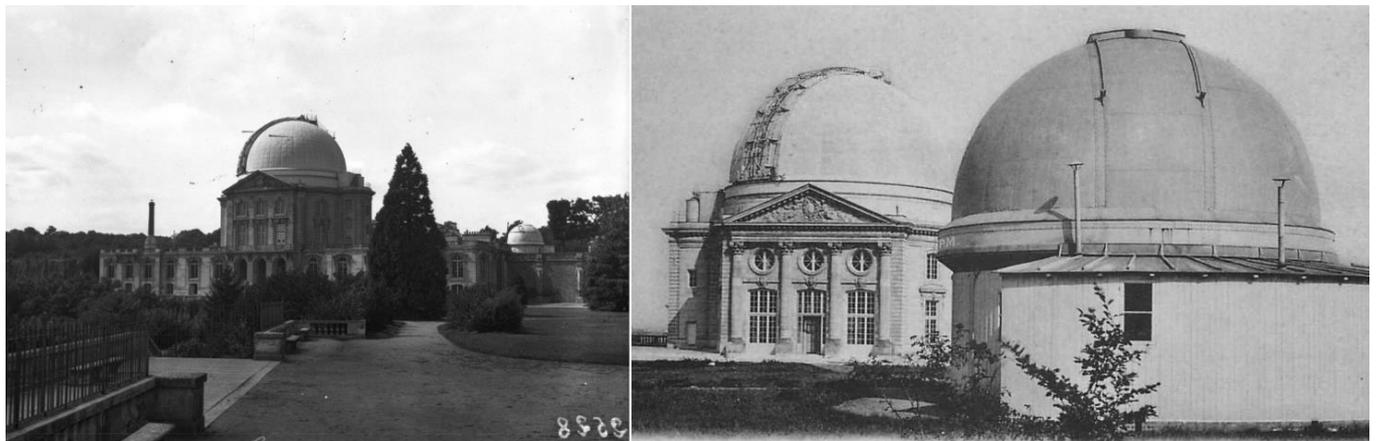


Figure 10. Le château de Meudon (à gauche : côté Est ; à droite : côté Ouest) et les instruments de nuit, indiqués respectivement par les lettres R (double réfracteur) et L (télescope de 100 cm) sur la [Figure 9](#). Crédit Gallica/BNF (à gauche) et observatoire de Paris (à droite).

Le « *spectrohéliographe des formes* » pour l'imagerie monochromatique de la chromosphère de Calcium ([Figure 14](#), à gauche) était mis en mouvement continu pendant les observations, sous l'action du moteur hydraulique (le piston dans le cylindre a, b et les réservoirs d'eau a', b' de la [Figure 13](#)). Le spectrographe présentait des distances focales de 0.30 m et 1.0 m, respectivement pour le collimateur et la lentille de chambre (grandissement de 3.3), et incorporait un seul prisme de flint d'angle 60° (dispersion modérée de 0.06 mm/Å). La fente sélectrice dans le spectre fournissait des images monochromatiques K1v (aile violette de la raie) ou K23 (centre) de 90 mm de diamètre, respectivement pour la photosphère et la chromosphère. Les temps d'exposition étaient compris entre 2 et 6 minutes, et trois fois plus longs pour les protubérances. Les filaments, qui nécessitent de sélectionner uniquement le coeur K3 de la raie, n'étaient bien sûr pas encore visibles.



Figure 11. Lorsque Deslandres s'installa à Meudon en 1898, ce laboratoire, appelé « *Petit Sidérostât* » (B sur la [Figure 9](#)), fut érigé. La lumière solaire était captée par un sidérostât polaire (A sur la [Figure 9](#)) et dirigée vers un objectif d'imagerie (détails sur la [Figure 12](#)), situé près du miroir plan en rotation. Un trou dans le toit permettait au faisceau lumineux convergent d'alimenter les deux spectrohéliographes mobiles, installés côte à côte sur une table inclinée. Crédit observatoire de Paris.

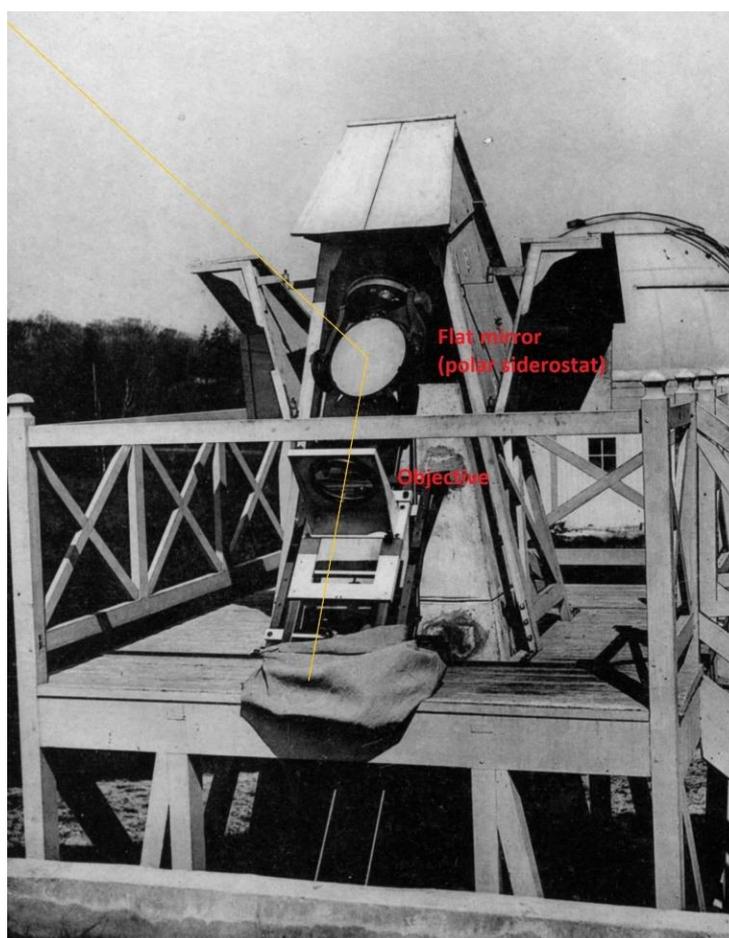


Figure 12. Le sidérostât polaire (A sur la [Figure 9](#)) et l'objectif d'imagerie (en arrière-plan, on voit le dôme du télescope de 100 cm). Le faisceau lumineux convergent est dirigé vers les spectrohéliographes à travers un trou dans le toit du bâtiment. L'objectif forme une image solaire primaire de 30 mm, agrandie par les spectrographes. Crédit observatoire de Paris.

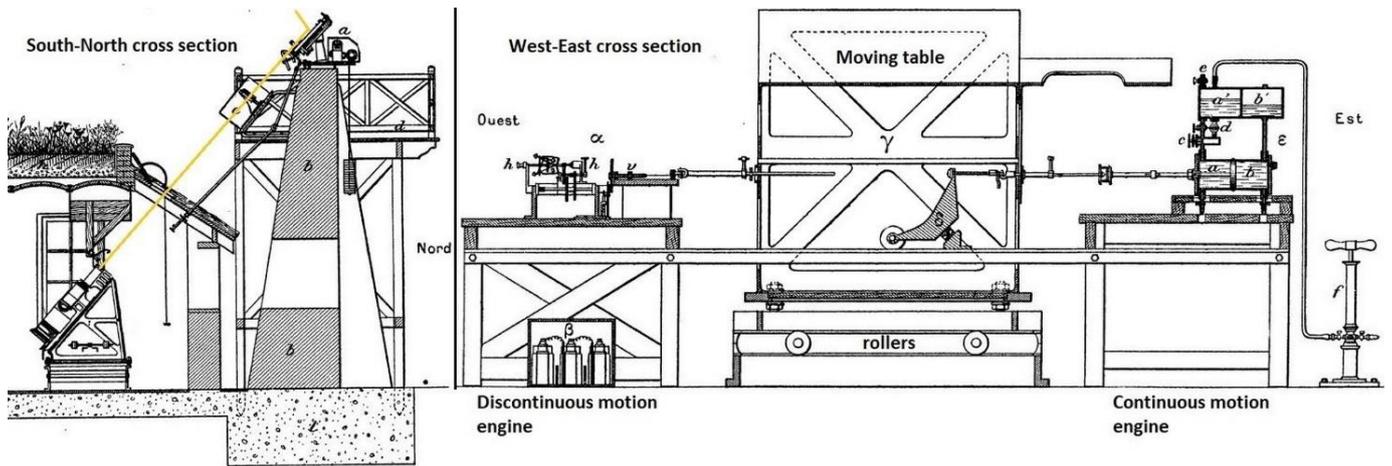


Figure 13. Vues latérales et de face des spectrohéliographes montés par Deslandres dans le laboratoire du « *Petit Sidérostas* » (1898). À gauche (vue latérale) : le sidérostas polaire (a), l'objectif imageur (c) et les spectrohéliographes. À droite (vue de face) : les spectrohéliographes sont fixés sur une table inclinée (γ), se déplaçant sur des rails et contenant l'axe polaire. Le premier moteur (côté Est) est dédié à la translation continue nécessaire aux images Call K du « *spectrohéliographe des formes* ». Il roule sous l'action du moteur hydraulique (ϵ) et du piston entre réservoirs d'eau (a, b). Le second mécanisme (côté Ouest) assure le déplacement pas à pas requis pour le « *spectrohéliographe des vitesses* » affecté aux vitesses radiales, et comprend le moteur électrique (α), le dispositif pas à pas (h) de la [Figure 15](#) et l'ensemble de batteries (β). D'après [Deslandres \(1905b\)](#).

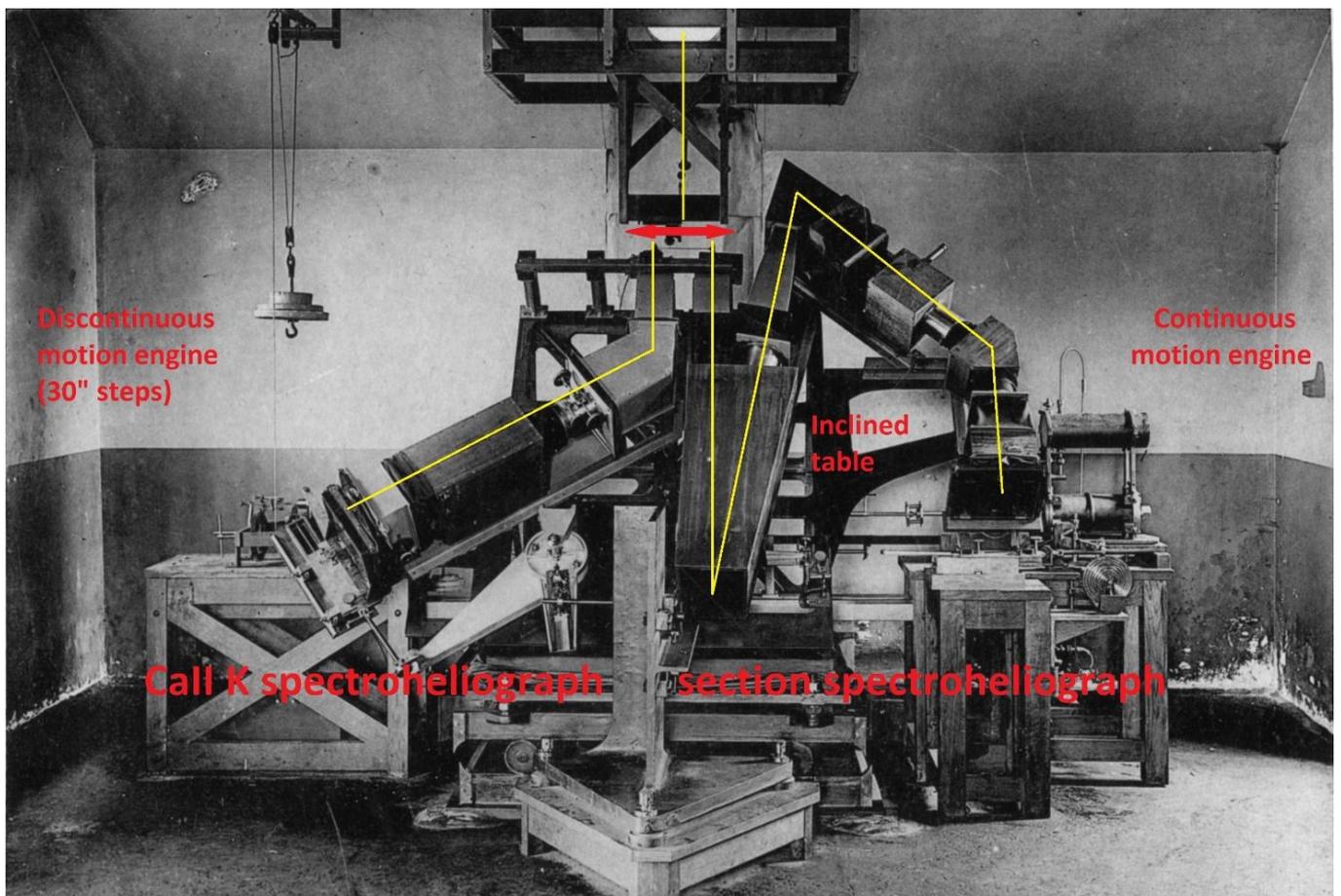


Figure 14. Les deux spectrohéliographes du bâtiment dit du « *Petit Sidérostas* » à Meudon. À gauche : le « *spectrohéliographe des formes* » Call K (composante K23) à faible dispersion utilise un prisme unique et se déplace à vitesse constante pendant les observations. À droite : le « *spectrohéliographe par sections* » se déplace de façon discontinue par pas de 30" (22000 km sur le Soleil), et dispose d'une dispersion plus élevée. Il est composé de deux spectrographes additifs (détails sur la [Figure 15](#)), le premier intègre un réseau de Rowland plan et le second un prisme séparateur d'ordres, et comporte 3 fentes, dont l'une réduit la lumière diffusée. Crédit observatoire de Paris.

Le « *spectrohéliographe par sections* » (Figure 14, à droite, et Figure 15, à gauche) fut amélioré par rapport à celui opérant à Paris. Il était muni d'un réseau de Rowland de 55 x 80 mm² dans l'ordre 4 (560 traits/mm, cinq fois plus dispersif que le prisme), un collimateur de 0.50 m et une chambre de 1.0 m (grandissement optique égal à 2.0). Il enregistrait 90 sections (ou coupes) du Soleil, de 2 x 60 mm², placées côte à côte sur la plaque photographique. Environ 10 s de temps d'exposition étaient nécessaires pour chaque section et 15 minutes pour l'observation complète. Cependant, le réseau créait beaucoup de lumière diffusée et d'ordres mélangés, de sorte qu'un deuxième spectrographe à faible dispersion, avec un seul prisme de 60° et une troisième fente, a été ajouté afin d'éliminer la lumière parasite et d'enregistrer des spectres de meilleure qualité. Ce second spectrographe avait un grandissement de 1.0 (distance focale de 0.50 m, tant pour le collimateur que pour la chambre). Déplacer automatiquement la table du spectrohéliographe pas à pas était une contrainte compliquée. Deslandres imagina l'appareil spécial de la Figure 15 (à droite) qui produisait des mouvements pas à pas à partir d'un crochet et d'engrenages tournant à vitesse constante sous l'action d'un moteur électrique. La translation de la table prenait 1.5 s par pas, tandis que le temps d'exposition était ajustable dans la gamme allant de 1.5 à 16.5 s pour chaque section, en utilisant différentes combinaisons de roues dentées.

Les deux spectrohéliographes faisaient appel au système de leviers décrit plus haut (Figure 6), afin de synchroniser la translation des supports de plaques photographiques avec le mouvement des spectrographes. Bien sûr, les observations avec les deux instruments n'étaient pas simultanées, mais successives.

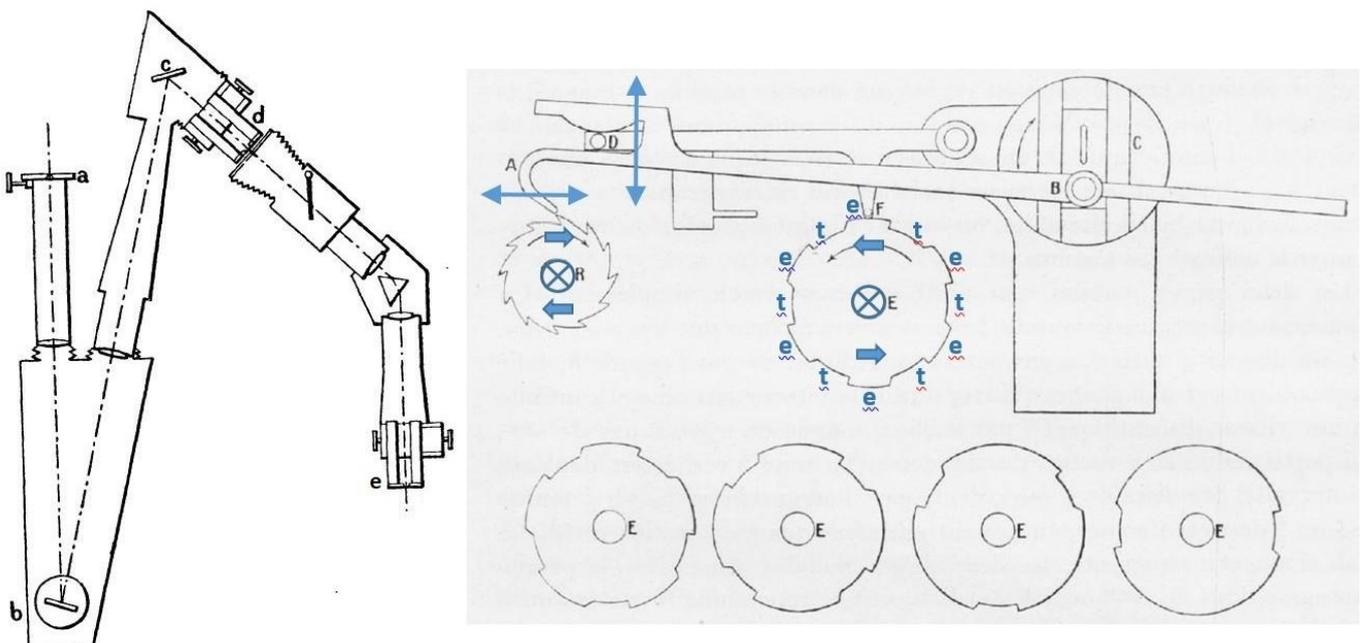


Figure 15. Le « *spectrohéliographe des vitesses* » du « *Petit Sidérostat* » à Meudon. A gauche : fente d'entrée dans le plan image (a), réseau de Rowland (b), miroir plan (c), deuxième fente (d) dans le spectre (bande passante de quelques Angström); le deuxième spectrographe à prisme élimine les ordres parasites et réduit la lumière diffusée ; la plaque photographique est située derrière la troisième fente (e). À droite : ce mécanisme convertit la rotation continue des roues (C) et (E) en une rotation pas par pas de l'engrenage (R) sous l'action des mouvements combinés des éléments (AB) et (DF), respectivement dans les directions horizontale et verticale. Le spectrohéliographe est poussé par une vis montée sur l'axe (R). Lorsque l'index (F) est levé (position e), l'exposition de la plaque se produit ; lorsque (F) est bas (position t), le spectrographe se déplace sous l'action du crochet (A). La roue (E) disposait de plusieurs dents (e) dont la largeur commandait le temps de pose : 1.5, 2.1, 3.0, 4.5, 7.5, 16.5 s pour respectivement 6, 5, 4, 3, 2 ou 1 dents. Chaque pas (t) prenait 1.5 s, et la période de rotation de (E) était toujours de 18 s. D'après Deslandres (1905b, 1910).

La localisation des deux spectrohéliographes dans le laboratoire est reportée sur la Figure 16 et notée (a, b). Cependant, le « *spectrohéliographe par sections* » (b) pour les vitesses radiales a souvent évolué, et Deslandres a testé de nombreuses combinaisons optiques, avec différentes chambres à deux ou trois fentes, un réseau ou une série de prismes (Dollfus, 2005). Il y avait aussi plusieurs inconvénients dans la disposition des appareils. D'une part, les deux spectrohéliographes ne pouvaient pas travailler simultanément pour enregistrer les « *formes* » (nécessitant le mouvement continu de la table) et les spectres « *par sections* » (par déplacement pas à pas). D'autre part, comme un instrument de recherche indépendant faisait défaut, pour expérimenter bien d'autres raies que Call K sans perturber les observations quotidiennes et la surveillance solaire, il apparut préférable de séparer les deux activités.

A cet effet, un petit coélostat (Figure 16) [note 5] fut ajouté en 1906 au sud du bâtiment, qui fut donc agrandi pour recevoir les nouveaux instruments (c, d), préfigurant les spectrohéliographes de deuxième génération de 1909. Contrairement à (a, b) qui se déplaçaient pour balayer la surface solaire, les spectrographes (c, d) étaient fixes, horizontaux et alimentés par un objectif mobile. Le coélostat dirigeait la lumière vers un miroir concave (m) de 20 cm de diamètre et de 4.0 m de distance focale. Il formait une image solaire de 37 mm sur la fente d'entrée du spectrohéliographe (c) ou (d). Le balayage de la surface solaire était assuré par la translation du miroir concave imageur (m). L'instrument (d) utilisait un réseau et des miroirs concaves, à la fois pour le collimateur (focale de 1.0 m) et la chambre (2.50 m), délivrant des spectres de 92 mm de hauteur. Il s'agissait d'un spectrohéliographe polyvalent pour toutes les raies situées dans une large gamme de longueurs d'onde, allant du jaune au violet.

L'instrument (c) est détaillé sur la Figure 17 ; il s'agissait d'un « spectrohéliographe par sections », mais le miroir imageur (m) avait été remplacé par une lentille de 18 cm de diamètre (distance focale de 3.60 m), fournissant des spectres de 140 mm de hauteur avec le collimateur de 0.80 m et la chambre de 3.40 m. L'observation était composée de 140 sections de 1 mm, de sorte qu'elle ne délivrait pas des images elliptiques (comme celle de la Figure 8), mais des images circulaires, contrairement à l'instrument initial (b). Ce spectrohéliographe pouvait fonctionner en même temps que l'instrument (a) enregistrant les « formes » des structures solaires. Des spectres H α ont été obtenus en 1908 avec le réseau de Rowland ; la série de trois prismes (angle de 62°30') a principalement été utilisée pour mesurer les décalages Doppler de la composante K3 de la raie du Calcium, à partir desquels les vitesses projetées sur la ligne de visée étaient estimées.

- (a) spectroheliograph (prism, continuous motion)
- (b) section spectroheliograph (3 prisms or grating, discontinuous motion)
- (f) polar siderostat
- (g) photographic laboratory
- (k,l) mechanical translators
- (n) objective

After 1906

- (c) new section spectroheliograph (grating + prism)
- (d) multi-purpose grating spectrograph
- (h) coelostat (2 mirrors)
- (m) concave mirror

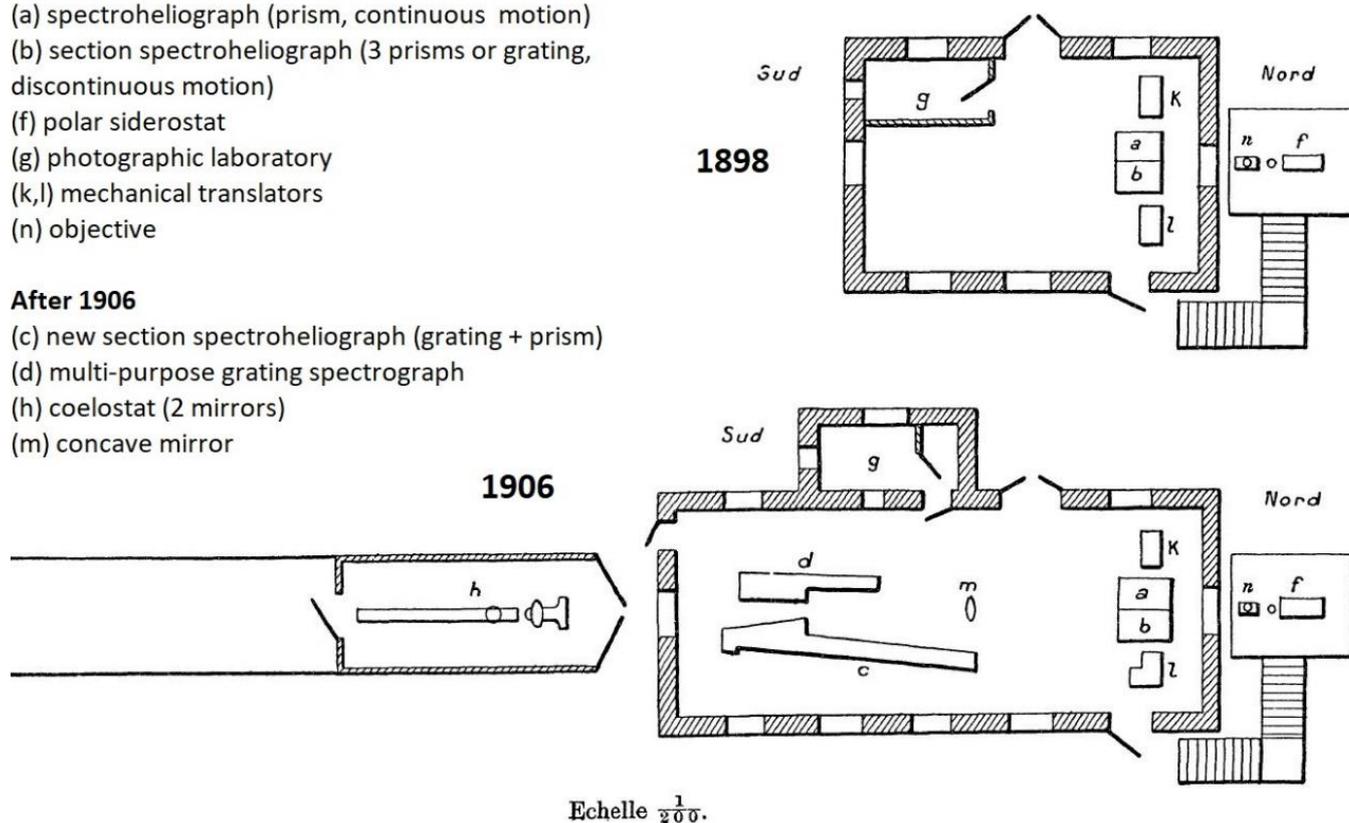


Figure 16. Le « Petit Sidérostas » en 1898 (haut, 5 x 7 m²) et en 1906 (bas, 5 x 12,5 m²). L'organisation de 1898 correspondait au transfert du « spectrohéliographe des formes » (a) et du « spectrohéliographe des vitesses » (b) de Paris à Meudon, en utilisant le sidérostas polaire (f) et l'objectif (n). L'organisation de 1906 comprenait les nouvelles expériences (c, d) au sein d'un laboratoire agrandi. (d) était un spectrographe de recherche polyvalent et multi-longueur d'onde, tandis que (c) était un « spectrohéliographe par sections » amélioré et principalement dédié aux mesures de vitesses radiales en Call K. Tous deux étaient alimentés par le nouveau coélostas (h), au sud du bâtiment. D'après Deslandres (1907a).

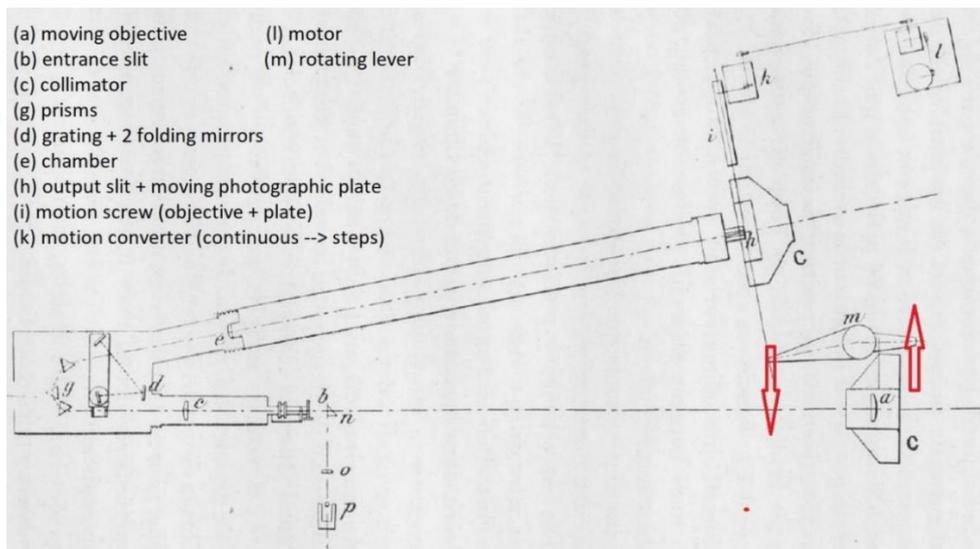


Figure 17. Le nouveau « *spectrohéliographe des vitesses* » au « *Petit Sidérostat* » en 1906, noté (c) sur la [Figure 16](#). Il utilise soit trois prismes pour Call K (g), soit un réseau plan (d) pour H α . (l) est un moteur agissant simultanément sur l'objectif d'entrée (a) et la plaque photographique (h), via le mécanisme (k), qui convertit la rotation continue du moteur (l) en déplacements pas à pas (détails sur la [Figure 15](#)). (i) est une vis tournante ; (m) est un point pivot fixe avec deux bras de leviers de longueurs différentes, afin d'égaliser le rapport des vitesses de translation de (h) et de (a) au grandissement optique du spectrographe (principe de la [Figure 6](#)). D'après [Deslandres \(1910\)](#).

4 - LE GRAND SPECTROHELIOGRAPHE QUADRUPLE (1908-1909) DE DESLANDRES ET D'AZAMBUJA

Le premier congrès de l'union internationale pour la coopération en matière de recherches solaires s'est tenu au château de Meudon en mai 1907 ([Figure 18](#)), quelques mois avant la mort de J. Janssen. Une réunion préparatoire avait eu lieu trois ans auparavant à Saint-Louis, aux États-Unis, organisée par G. Hale (qui venait de fonder l'observatoire du Mont Wilson, où le télescope Snow et son spectrohéliographe ont pris place). Deux autres rencontres eurent lieu au Mont Wilson (1910) et à Bonn (1913). Ces congrès marquèrent le commencement d'une grande collaboration internationale en astronomie solaire, qui s'est développée principalement après la première guerre mondiale. Le Conseil International de la Recherche (IRC), rebaptisé en 1931 ICSU (Conseil International des Unions Scientifiques), a promu la coopération par la création d'une série d'organisations devenues célèbres, telles que l'Union Astronomique Internationale (UAI) et l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique (UGGI), toutes deux fondées en 1919. Les premières assemblées eurent lieu à Rome (1922) et à Cambridge (1925). Une commission spéciale entre les deux unions fut instituée pour étudier les relations Soleil-Terre. Deslandres était membre du comité exécutif lorsque celui-ci recommanda de coordonner les observations solaires et terrestres. Il déclara en 1925 que le spectrohéliographe quadruple « *peut être présenté comme l'instrument typique pour les études solaires* ». Décrivons maintenant cette réalisation sophistiquée.

A la mort de Janssen (1907), Deslandres fut nommé directeur de l'observatoire de Meudon. Il obtint un soutien financier pour construire un laboratoire de 6 x 26 m² (appelé « *Grand Sidérostat* », [Figure 19](#)) destiné à abriter son projet de grand spectrohéliographe quadruple ([Figure 20](#) et [Tableau 2](#)). En effet, un grand sidérostat de Foucault (75 cm de diamètre) fut mis en commande, il sera situé au Nord du bâtiment pour suivre le Soleil et réfléchir sa lumière dans la direction horizontale. Mais l'assemblage d'une pièce mécanique aussi importante et compliquée se révéla une entreprise difficile, qui prit beaucoup plus de temps que prévu. Pour cette raison, Deslandres décida d'installer dès 1908, au Sud du laboratoire, un coélostat à deux miroirs (de 40 cm de diamètre) pour alimenter les instruments de nouvelle génération. Cet appareil fut beaucoup plus facile et plus rapide à mettre en place, et du coup, ce coélostat temporaire est finalement devenu permanent. Les schémas de l'ensemble, réalisés à la main, se trouvent dans le carnet de Deslandres ([Deslandres, 1907b](#)) ; enfin, ce coélostat a été remplacé en 1920 par un nouveau. Le spectrohéliographe quadruple ([Figure 20](#)) a été décrit par [Deslandres \(1910\)](#) et [d'Azambuja \(1930\)](#). Deslandres le qualifie ainsi : « *C'est un instrument complexe, difficile à régler. Dans mes recherches, j'ai été aidé en permanence par L. d'Azambuja, un jeune et brillant astronome, dont le nom est associé au mien dans mes découvertes* ». En effet, Deslandres était de plus en plus absorbé par les tâches de directeur de Meudon, et dut déléguer l'installation et les réglages du nouveau spectrohéliographe quadruple à d'Azambuja. L'objectif était de disposer de deux instruments pour les observations systématiques en H α et Call K, et de deux autres instruments polyvalents avec de meilleures performances (comme une dispersion plus élevée et un vaste domaine spectral, de l'ultraviolet au proche infrarouge), dédiés à la recherche solaire en spectroscopie.



Figure 18. Le premier congrès de l'union internationale pour la coopération en recherches solaires, en mai 1907 au château de Meudon. Quelques personnes sont identifiées sur la photographie : (1) L. d'Azambuja, (2) G. Hale, (3) B. Baillaud (directeur de l'observatoire de Paris), (4) Mme Janssen, (5) J. Janssen (directeur de l'observatoire de Meudon), (6) la fille de Janssen, (7) Mme Deslandres, (8) H. Deslandres. Les personnages de la photographie ont été nommés par d'Azambuja (1967) dans une lettre envoyée à R. Michard. Crédit observatoire de Paris.

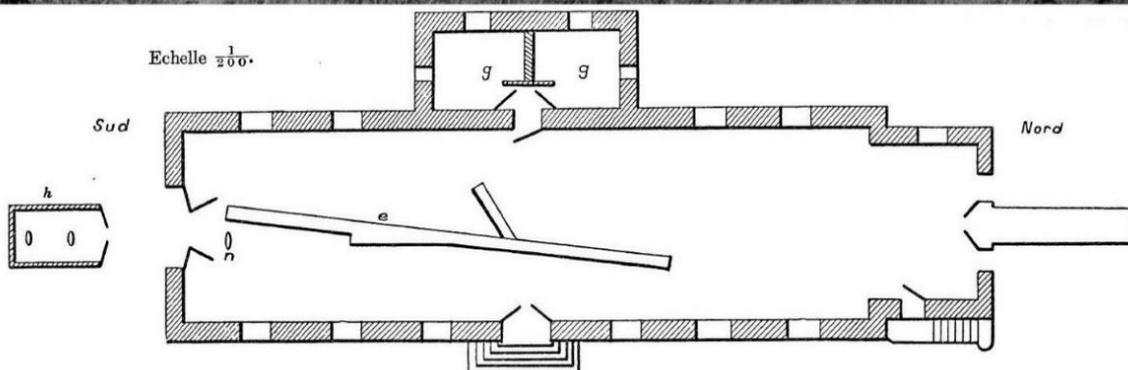
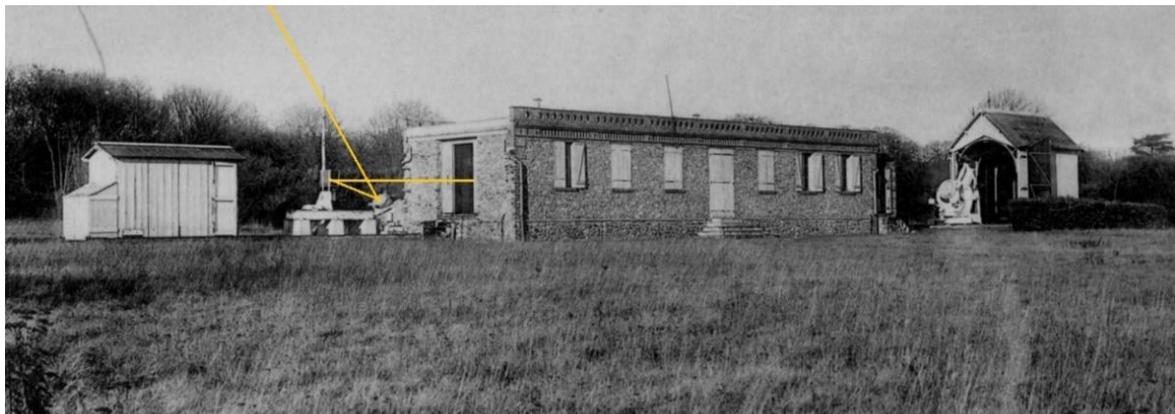
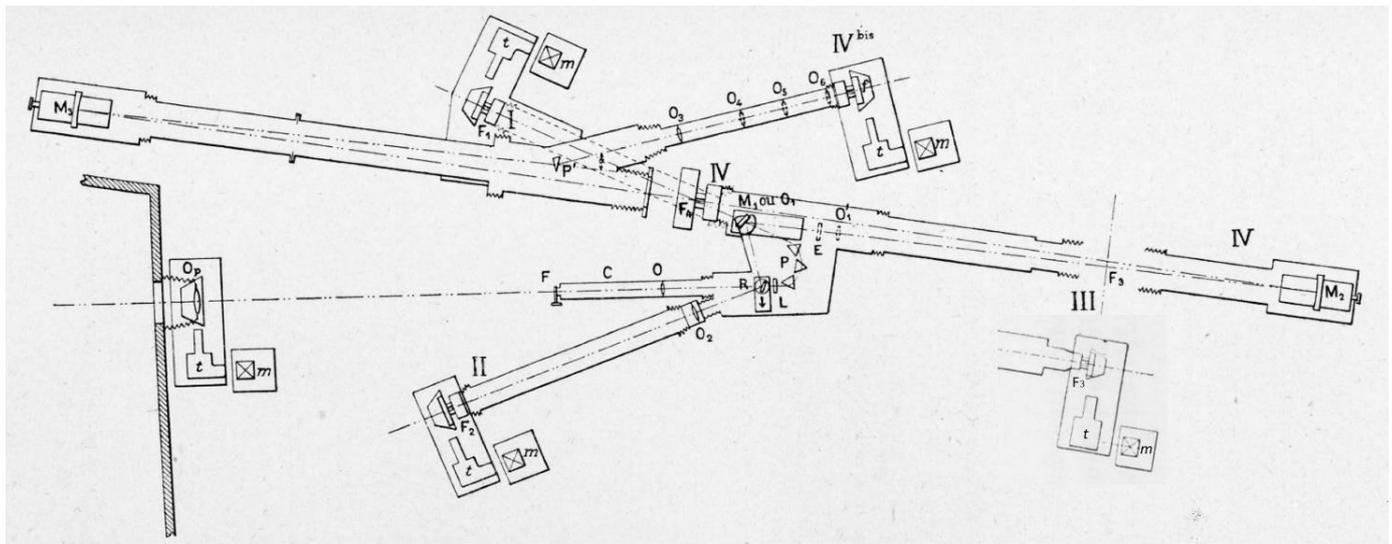


Figure 19. Le laboratoire dit du « Grand Sidérost » construit en 1907 ($6 \times 24 \text{ m}^2$) a permis de démarrer les observations systématiques de Call K en 1908 et de H α en 1909, avec deux combinaisons dédiées du grand spectrohéliographe quadruple (e). Il était alimenté par le coelostat (h) au Sud du bâtiment (à gauche) et l'objectif (n). Le sidérost de Foucault (à droite) a été achevé plus tard, de sorte qu'il n'a jamais été utilisé pour les observations systématiques. Les cabinets photographiques étaient en (g). D'après Deslandres (1907a) et crédit observatoire de Paris.



- COMMON PARTS:
 (Op) Objective
 (t,m) speed converter + motor
 (F) entrance slit
 (O) collimator
- SPECTRO 1 (Call K)
 (P) three prisms
 (O1) chamber lens
 (F1) output slit
 (t,m) photographic plate + speed converter + motor
- SPECTRO 2 (Halpa)
 (R) grating
 (O2) chamber lens
 (F2) output slit
 (t,m) photographic plate + speed converter + motor
- SPECTRO 3
 Multi-purpose with prisms or grating
 (M1) flat mirror
 (O'1) chamber lens
 (F3) output slit
 (t,m) plate + speed converter + motor
- SPECTRO 4 (2 slits)
 multi-purpose, high dispersion
 (M1) flat mirror
 (M2) concave mirror
 (F4) output slit
 205 mm image
- SPECTRO 4bis (3 slits)
 with prisms or grating for both
 (F4) pre-slit in the spectrum
 (M3) concave mirror
 (P) prism (order selection)
 (O3,O4,O5,O6) four optical reductions
 (f) output slit (60, 40, 20, 9 mm image)
- For both, (t,m) photographic plate + speed converter + motor

Figure 20. Le spectrohéliographe quadruple (1909) était extrêmement complexe, polyvalent et composé de quatre instruments plus ou moins superposés. Deux d'entre eux (spectrographes 1-2) étaient utilisés pour les observations systématiques, en Call K et H α , et les autres (spectrographes 3-4-4bis), plus dispersifs, à des fins de recherche. Les détails de chaque instrument sont présentés dans le [Tableau 2](#), et leur conception optique est détaillée par la [Figure 22](#) et la [Figure 26](#). L'objectif d'entrée (Op), la fente (F) et le collimateur (O) étaient communs aux quatre combinaisons, de sorte qu'elles ne pouvaient pas fonctionner simultanément, mais alternativement. Cependant, il était facile de passer de l'une à l'autre. D'après [d'Azambuja \(1930\)](#).

Tableau 2. Les combinaisons optiques du spectrohéliographe quadruple de la [Figure 20](#) (schémas optiques individuels détaillés sur les [Figures 22](#) et [26](#)). L'objectif d'entrée, la fente et le collimateur étaient communs aux quatre chambres.

Chambre	Chemin optique (Figure 20)	Focale (m)	Diamètre de l' image (mm)	Raie spectrale
Pour les observations systématiques				
1	P+O ₁ +F ₁	3.0	86	Call K
2	R+O ₂ +F ₂	3.0	86	H α
Pour les observations de recherche				
3	(P ou R)+M ₁ +O' ₁ +F ₃	3.0	86	polyvalent
4	(P ou R)+M ₁ +M ₂ +F ₄	7.0	205	polyvalent
4bis (2 spectros et réduction d'image γ)	(P ou R)+M ₁ +M ₂ +F ₄ +M ₃ +P'	2 x 7.0		
	avec O ₁ ($\gamma = 0,29$)		58.5	polyvalent
	ou O ₂ ($\gamma = 0,19$)		39.5	polyvalent
	ou O ₃ ($\gamma = 0,09$)		19.5	polyvalent
	ou O ₄ ($\gamma = 0,04$)		9.0	polyvalent

Une photographie du spectrohéliographe quadruple, construit par Deslandres et d'Azambuja, est donnée par la [Figure 21](#). A l'avant, se trouvent l'objectif d'entrée et les deux spectrohéliographes de 3.0 m (1-2) dédiés aux observations systématiques, organisées par d'Azambuja et commencées respectivement en 1908 pour Call K et 1909 pour H α . Dans le fond, se trouvent les spectrohéliographes consacrés à la recherche solaire (3-4-4bis), respectivement de 3.0, 7.0 m et 2 x 7.0 m de longueur focale. Toutes les combinaisons utilisent alternativement l'objectif d'imagerie de 25 cm (focale de 4.0 m), balayant la surface solaire et fournissant une image de 37 mm, la fente d'entrée (S) et le collimateur (13 cm de diamètre, 1.30 m de focale).



Figure 21. Le spectrohéliographe quadruple (1909) avec le coélostat (à gauche) et l'objectif d'imagerie (focale de 4 m). On voit la chambre Call K (bras gauche, schéma optique de la [Figure 22](#)), la chambre H α (bras droit, schéma sur [Figure 22](#)), les moteurs électriques (M) déplaçant l'objectif et les plaques photographiques, et les « transformateurs de vitesse » associés (T, détails mécaniques sur la [Figure 23](#)). (S) est la fente d'entrée commune. Crédit observatoire de Paris.

Les schémas des spectrohéliographes (n°1-2 du [Tableau 2](#)) consacrés aux observations systématiques sont présentés par la [Figure 22](#). Un réseau plan était employé pour la raie H α (568 traits/mm, taille de 8 x 5,5 cm²) tandis qu'une série de trois prismes (verre flint au minimum de déviation, angle de 61°, section de 15 x 13,5 cm²) servait pour Call K. La fente d'entrée avait une largeur de 35 μ m (correspondant à 1,8" ou 1300 km sur le soleil). La deuxième fente (largeur de 80 μ m) dans le spectre sélectionnait des bandes passantes étroites de 0.14 Å et 0.47 Å, respectivement pour les raies Call K et H α . Avec le facteur de grandissement de 2.31, l'objectif de chambre (15 cm de diamètre, distance focale de 3.0 m) formait des images monochromatiques au diamètre standard de 86 mm sur les plaques de verre photographiques.

Contrairement aux instruments de première génération de Paris et de Meudon, le spectrohéliographe quadruple était immobile et il n'y avait plus de couplage mécanique (comme le système à leviers de la [Figure 17](#)) entre l'objectif d'entrée et les porte-plaques photographiques. Chaque chariot (les couples [t, m] sur la [Figure 20](#)) possédait son propre moteur électrique synchrone relié à un « transformateur des vitesses » ; c'était une sorte de convertisseur de vitesse finement réglable ([Figure 23](#)), qui garantissait la circularité des images monochromatiques. Le galet ajustable de ce dispositif mécanique permettait d'adapter soigneusement la vitesse de la plaque photo à la vitesse de balayage du Soleil, dont le rapport dépendait des différents grandissements (gamme 0.04-5.54) des spectrographes. En effet, comme indiqué par le [Tableau 2](#), les spectrohéliogrammes avaient des diamètres compris entre 9 et 205 mm (86 mm en standard), pour un objet d'entrée commun de 37 mm délivré par l'objectif imageur.

La [Figure 24](#) montre quelques-unes des premières observations systématiques, qui ont débuté en 1908 pour la raie Call K (la composante centrale K3 était sélectionnée, car il était désormais possible de l'isoler avec la série de trois prismes) et en 1909 pour H α . Cependant, pendant une courte période, l'ancienne et la nouvelle génération de spectrohéliographes, dans les deux laboratoires différents, travaillèrent ensemble, comme le montre la [Figure 25](#). Call K1v et K23 étaient produits par le « spectrohéliographe des formes » à prisme unique de faible dispersion du « Petit Sidérostas », tandis que K2v et K3 étaient observés avec l'instrument à trois prismes de dispersion élevée du

« Grand Sidérostat ». Fait notable, les filaments solaires sombres apparurent pour la première fois sur les spectrohélogrammes K3, en raison de la bande passante étroite de 0,14 Å (Figure 25). Environ 1000 observations étaient effectuées par an. Par exemple, en 1920, le nombre de clichés fut de 159 K1v, 104 K23, 285 K3, 168 longues expositions K3 pour les protubérances et 112 H α (828 au total). Après la première guerre mondiale, en raison du manque de main-d'œuvre, les observations avec les anciens instruments furent progressivement abandonnées ; celles réalisées en K1v (pour les taches solaires et les facules) et en K3 (pour les régions actives, les plages et les filaments) continuèrent avec les instruments de nouvelle génération, auxquelles on ajouta H α qui montre un aspect complémentaire des filaments et des plages.

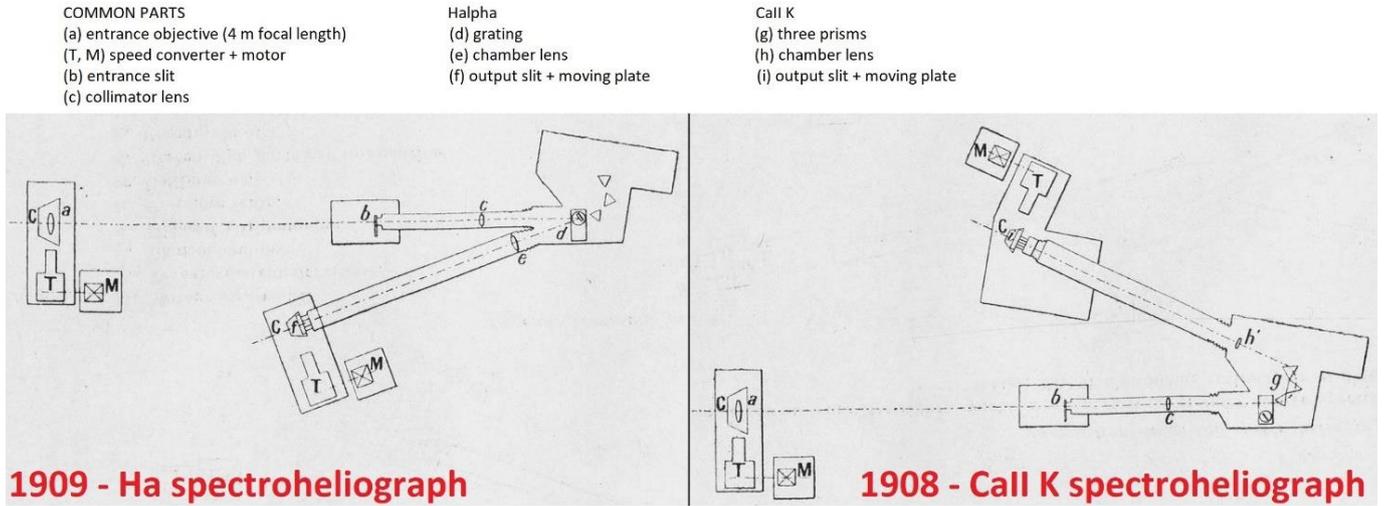


Figure 22. Les deux spectrohélographes (n°1-2) dédiés aux observations systématiques en H α (à gauche, avec réseau plan) et Call K (à droite, avec trois prismes). (a), (b), (c) sont des éléments communs (respectivement l'objectif d'imagerie, la fente et le collimateur). Chaque raie spectrale a sa propre chambre. (M) et (T) sont des couples composés d'un moteur synchrone et d'un « transformateur de vitesse » (détails mécaniques de la Figure 23), qui ajustent précisément la vitesse de balayage de l'objectif d'imagerie à celle des chariots supportant les plaques photographiques. D'après Deslandres (1910).

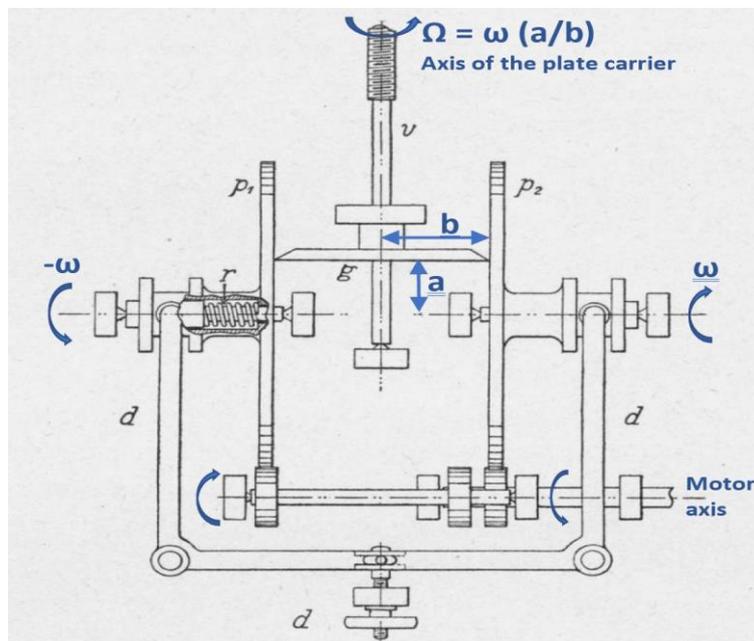


Figure 23. Le « transformateur des vitesses » est l'élément mécanique majeur qui synchronise la translation de l'objectif d'imagerie et des plaques photographiques. (v) est une vis (de vitesse angulaire $\Omega = \omega (a/b)$) entraînant le porte-plaques. (p1) et (p2) sont des disques circulaires tournant dans des directions opposées (vitesses angulaires fixes $\pm\omega$) sous l'action du moteur. (g) est un galet tournant à la vitesse $\Omega = \omega (a/b)$ où (b) est invariable et (a) est la distance réglable entre le galet et l'axe de rotation de (p1) et (p2). La valeur de (a) est choisie avec une précision de 0.1 mm afin d'obtenir une image monochromatique circulaire sur la plaque photographique ; on modifie (a) en relâchant le ressort (r) avec le levier (d). D'après Deslandres (1910).

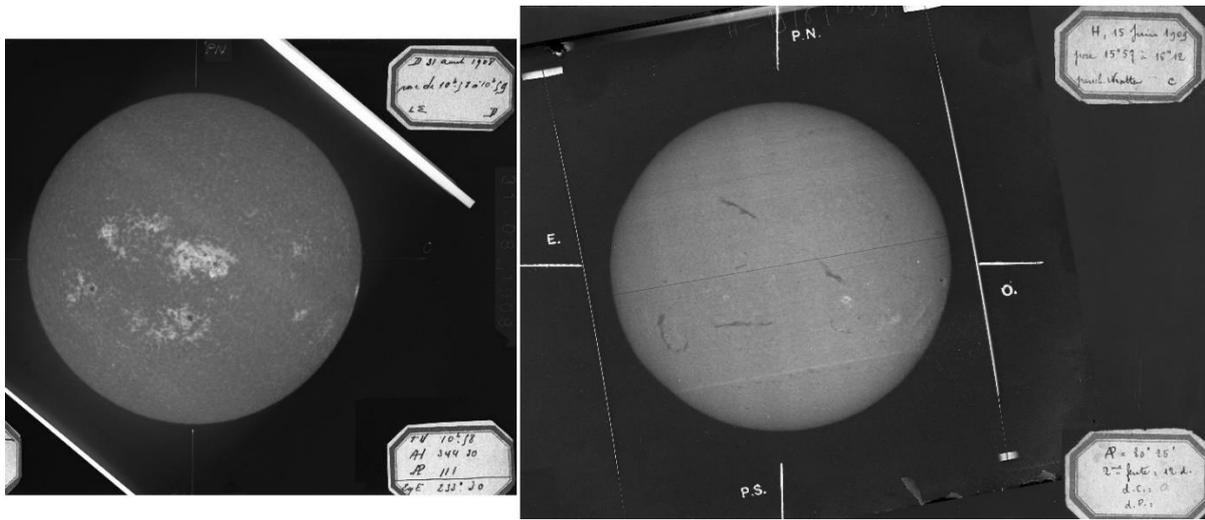


Figure 24. Quelques images parmi les premières observations systématiques faites avec les deux spectrohéliographes de la Figure 22. A gauche : Call K3 (31 août 1908). A droite : H α (15 juin 1909). Crédit observatoire de Paris.

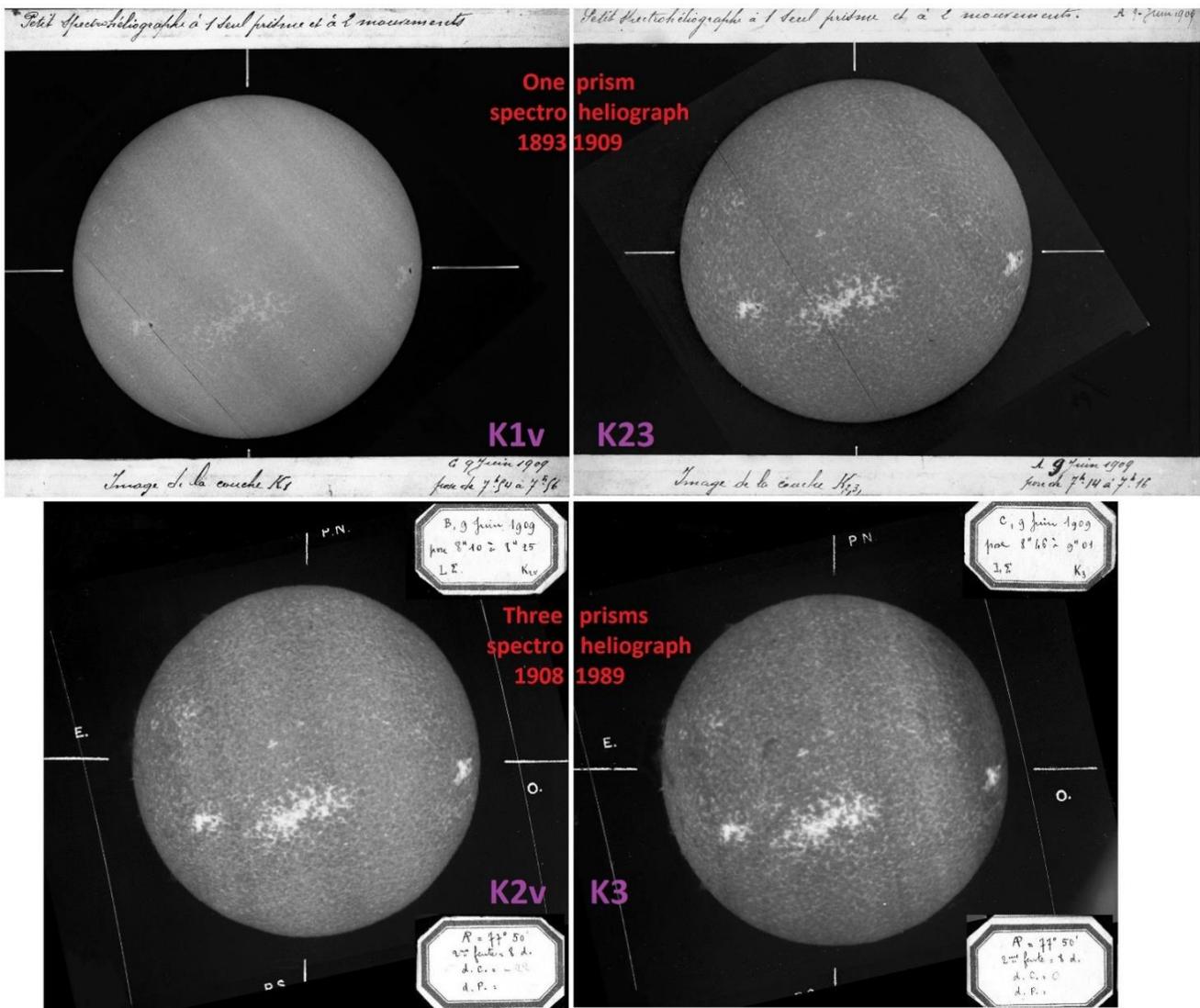
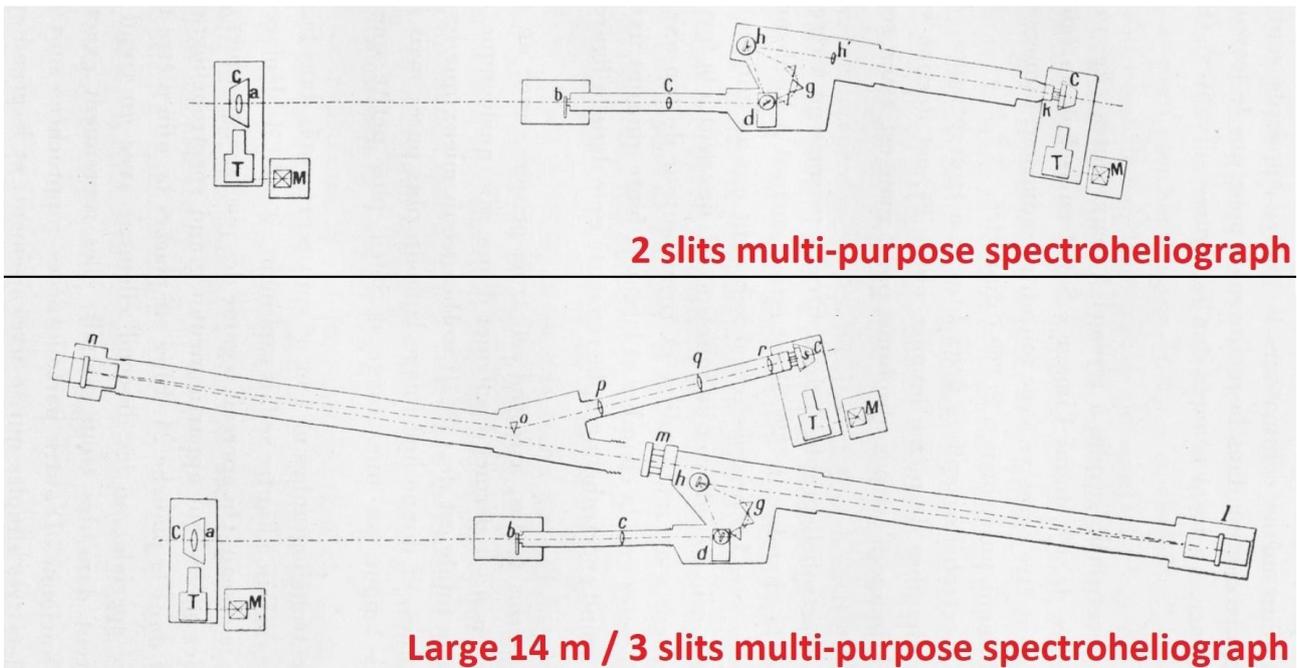


Figure 25. Pendant une courte période (1908-1920), les anciens spectrohéliographes (Figure 14) et les nouveaux (Figure 21) travaillèrent ensemble, fournissant, d'une part, des images Call K1v et Call K23 (en haut, prisme unique), et d'autre part, des images Call K2v et Call K3 (en bas, trois prismes, bande étroite de 0.14 Å). Les filaments apparaissent uniquement dans K3, car la bande passante K23 des premiers instruments était trop large. 9 juin 1909. Crédit observatoire de Paris.

Le spectrohéliographe polyvalent de 3.0 m (n°3 du [Tableau 2](#)) et le spectrohéliographe à dispersion élevée (7.0 m ou 14.0 m de longueur, respectivement n°4 ou n°4bis du [Tableau 2](#)) sont représentés schématiquement sur la [Figure 26](#). Ils furent intensivement employés par L. d'Azambuja pour son travail de thèse, qu'il a soutenue en 1930. Il étudia attentivement la dispersion de toutes les combinaisons optiques en fonction de la longueur d'onde, basées sur des prismes ou un réseau ([Figure 27](#) et [Tableau 3](#)). Le spectrohéliographe de 7.0 m (n°4) a fourni les meilleures performances avec le réseau (2.0 Å/mm), mais en contrepartie, la taille de l'image était très grande (205 mm) sur la deuxième fente dans le spectre, et beaucoup de lumière diffusée était présente. Pour ces raisons, un deuxième spectrographe à faible dispersion de 7.0 m, muni d'une troisième fente, a été ajouté (n°4bis). Dans cet instrument de 2 x 7.0 m, la lumière diffusée était réduite par la deuxième fente (élargie) au foyer du premier spectrographe, et les ordres parasites étaient éliminés par le prisme unique (o, [Figure 26](#)). La réduction d'image était dans le rapport des distances focales du miroir collimateur (noté n, 7.0 m) et de la lentille de chambre (appelée p, q, r, s par Deslandres, ou O₁, O₂, O₃, O₄ par d'Azambuja, respectivement de 2.0, 1.3, 0.65, 0.30 m), fournissant les facteurs d'amplification du [Tableau 2](#). D'Azambuja a comparé les capacités des spectrohéliographes installés dans divers pays entre 1892 et 1908. Le [Tableau 4](#) indique que les spectrohéliographes de Meudon étaient parmi les meilleurs instruments disponibles et que le grand spectrohéliographe de recherche de 7.0 m était probablement unique.

- (a) moving entrance objective (4 m focal length)
- (T, M) speed converter + motor
- (b) entrance slit
- (c) collimator lens
- (d) grating
- (g) three prisms
- (h) flat mirror
- (h') chamber lens
- (k) output slit + moving photographic plate



- (a) moving objective
- (T, M) speed converter + motor
- (b) entrance slit
- (c) collimator lens
- (d) grating
- (g) three prisms
- (h) flat mirror
- (l) concave mirror (7 m focal length chamber)
- (m) pre-slit in the spectrum (scattered light reduction)
image diameter = 200 mm
- Image reduction (afocal system):**
- (n) concave mirror (7 m focal length)
- (o) prism (order selection)
- (p, q, r) lenses for image reduction
(10 to 60 mm diameter)
- (s) output slit and moving plate

Figure 26. Les spectrohéliographes de recherche (n° 3-4-4bis). L'objectif (a), la fente d'entrée (b) et le collimateur (c) sont communs à toutes les combinaisons, qui ne pouvaient pas être utilisées simultanément, mais successivement. En haut : le n°3 est un spectrographe polyvalent à deux fentes et trois prismes (g) ou un réseau plan (d). En bas : le grand spectrohéliographe à trois fentes de 14 m (n°4-4bis) offre la dispersion la plus élevée et la plus grande image. La chambre (à droite) est un miroir concave (l) de 7.0 m de focale, le spectre est formé sur la deuxième fente (m). Le diamètre du Soleil est en (m) de 205 mm et la dispersion est la meilleure de toutes les combinaisons (0.5-2 Å/mm selon la longueur d'onde). Le second spectro (n°4bis, à gauche) est facultatif : il s'agit d'un spectro-réducteur afocal utilisant un second miroir concave (n) de 7.0 m de focale, un prisme (o) pour éliminer les ordres parasites, un jeu de quatre lentilles réductrices (p, q, r, s) et une troisième fente de sortie. Ce système à trois fentes réduisait la lumière parasite. (M) et (T) désignent respectivement les moteurs électriques et les « transformateurs de vitesse » de l'objectif d'entrée et des porte-plaques. D'après [Deslandres \(1910\)](#).

Dispersion
(Angström/mm)
of the four
spectroheliographs
with prisms (P)
or gratings (R)

S = systematic
observations

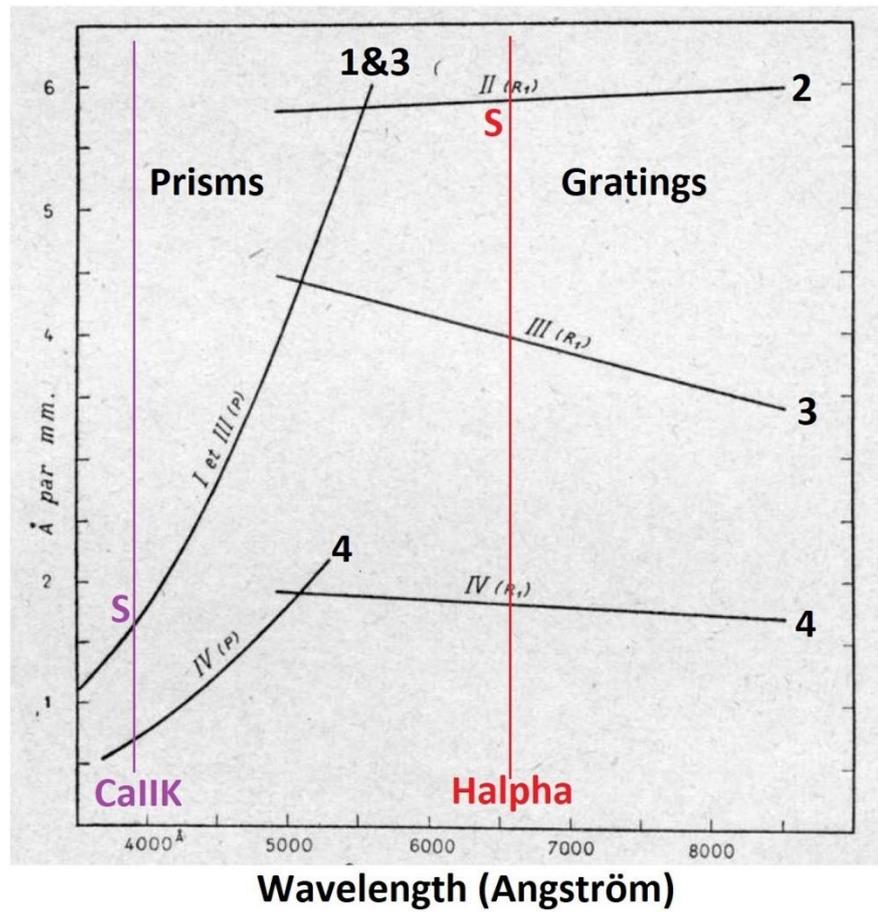


Figure 27. La dispersion du spectrohéliographe quadruple en fonction de la longueur d’onde (en abscisse). Pour les observations systématiques (S), les instruments n°1 (I) et n°2 (II) fournissaient respectivement 1.5 Å/mm pour Call K (trois prismes) et 6 Å/mm pour H α (réseau). Pour les travaux de recherche, l’instrument polyvalent n°3 (III) et l’instrument à dispersion élevée n°4 (IV) offraient respectivement 1-4 Å/mm et 0.5-2 Å/mm dans le domaine 3500-8500 Å, avec trois prismes ou réseaux. D’après d’Azambuja (1930).

Tableau 3. Caractéristiques des quatre spectrographes en 1909. D’après d’Azambuja (1930).

Spectrographe numéro	Eléments dispersifs	Longueur focale (m)	Domaine spectral (Å)	Dispersion (Å/mm)			Diamètre image (mm)
				à λ (Å) avec prismes ou réseau			
1	3 prismes	3.0	3900-4100	3934	1.7		86.5
2	réseau	3.0	3600-9000	3934		5.7	86.5
				5184		5.8	87.5
				6563		5.9	89.5
3	prismes/réseau	3.0	3600-9000	3934	1.7	4.8	86.5
				5184	4.6	4.4	87.5
				6563	9.4	4.0	89.5
4	prismes/réseau	7.0	3600-9000	3934	0.7	2.0	206.0
				5184	2.0	1.9	205.5
				6563	4.1	1.8	205.0

Tableau 4. Comparaison des spectrohéliographes de divers instituts observant dans la raie Call K 3934 Å en 1909. Le spectrohéliographe quadruple de Meudon (1908) disposait de la meilleure dispersion, permettant des observations détaillées des profils des raies. D'après d'Azambuja (1930).

Date	Observatoire	Auteur	Disperseur	Chambre (m)	Dispersion (Å/mm)
1892	Kenwood	Hale	réseau ordre 4	1.0	3.7
1893	Paris	Deslandres	1 prisme	1.0	16.9
1903	Kensington	Lockyer	1 prisme	1.5	11.3
1903	Yerkes	Hale, Ellerman	2 prismes	1.0	8.5
1906	Kodaikanal	Smith, Evershed	2 prismes	2.0	4.2
1906	Tortosa	Cirera, Balcelli	1 prisme	1.0	22.5
1906	Mont Wilson	Hale	2 prismes	1.5	5.2
1906	Postdam	Kempf	réseau ordre 4	0.6	5.6
1907	Catania	Ricco	2 prismes	0.6	11.3
1908	Meudon	Deslandres	3 prismes	3.0 ou 7.0	1.7 ou 0.8

Que peut-on conclure, en termes de physique solaire, de cette phase de développement expérimental (1892-1908) au cours de laquelle de nombreuses séries d'observations monochromatiques ont été réalisées et ont permis d'explorer l'atmosphère solaire à différentes altitudes ? En résumé, les résultats suivants ont été établis :

- Les couches supérieures de la chromosphère apparaissent dans les coeurs des raies Call K ou H α , et présentent des structures, tels les filaments, qui n'apparaissent pas dans les couches inférieures révélées par les ailes de la raie Call K (K1 et K2)
- Les filaments sombres situés dans la couche supérieure nécessitent des instruments à dispersion élevée, capables de sélectionner le centre K3 de la raie Call K ; ceci n'est pas nécessaire pour les plages et les protubérances brillantes au niveau du limbe, pour lesquelles la bande passante de K23 est suffisante
- Les images dans les ailes de la raie, comme Call K1v, montrent la photosphère (taches solaires et facules)
- Alors que Hale, Ellerman et d'Azambuja pensaient que les filaments sombres sur le disque étaient la signature des protubérances brillantes au bord, Deslandres n'était pas convaincu par cette association. Le débat fut clos plus tard (1928), lorsque la communauté a officiellement considéré les filaments et les protubérances comme deux aspects différents du même objet, soit en absorption sur le disque, soit en émission au limbe.

5 - LES TRAVAUX DE RECHERCHE DE D'AZAMBUJA ET LE PROGRAMME DES CARTES SYNOPTIQUES

En 1914, les observations solaires furent interrompues par la première guerre mondiale. Deslandres et d'Azambuja étant mobilisés, il n'y avait plus aucune activité à Meudon. Les observations reprurent en 1919 et d'Azambuja termina en même temps ses études à l'Université. En 1923, Alfred Pérot (1863-1925), astronome à Meudon et professeur à l'Ecole polytechnique, amena l'une de ses assistantes, Marguerite Roumens, pour travailler sur les spectres stellaires. Elle fut finalement engagée en 1925 dans le service solaire à la mort de Pérot, et elle épousera plus tard L. d'Azambuja (1935). Avec son aide, il observa en 1926-1927 de nombreuses raies pour sa thèse, encore inexplorées (par rapport aux désormais bien connues H α et Call K). Ils profitèrent du grand spectrohéliographe de 7.0 m de la [Figure 26](#), afin de sonder la stratification atmosphérique et étudier les propriétés des structures solaires. Plus de douze raies furent choisies, plutôt formées dans la basse atmosphère : CaI 4227 Å, Srl 4078 Å, Mgl 3838 Å, Fel 4046, 4104, 4132, 4144, 4202, 4384 Å, Mgl 5184 Å, NaD1 5890 Å, H β 4861 Å, et des raies infrarouges du Calcium ionisé. Beaucoup d'entre elles furent examinées dans diverses régions, comme les plages, les régions actives, le soleil calme, et les résultats furent consignés dans la thèse ([d'Azambuja, 1930](#)). En comparant ces raies aux raies larges de Fraunhofer, d'Azambuja démontra que le choix initial fait par Deslandres (raies H α et Call K) était bien optimisé pour synthétiser au mieux les phénomènes de l'activité solaire, à la fois pour la photosphère et la chromosphère. Les raies H (3968 Å) et K (3934 Å) du Calcium ionisé donnant des résultats similaires (partie violette du spectre), la [Figure 28](#) montre deux raies du triplet infrarouge observé par d'Azambuja. Le contraste des structures chromosphériques, comme les régions faculaires brillantes et les filaments sombres, n'y est pas meilleur qu'au centre de la raie K. Une autre raie, CaI4227 Å du Calcium neutre ([figure 29](#)), révèle bien les taches solaires et les facules dans la photosphère, mais les résultats sont proches de l'aile bleue (K1v) de la raie K. Par conséquent, les observations au centre K3 de la raie Call K et dans l'aile bleue (K1v) semblaient idéales pour une collection à long terme d'images monochromatiques. Aujourd'hui, Call 8542 Å est régulièrement observée avec l'instrument SOLIS à Kitt Peak (USA) afin de produire des magnétogrammes (c'est-à-dire des images de champs

magnétiques) du disque chromosphérique via l'effet Zeeman [note 6]. On a découvert récemment que la raie Cal 4227 Å est la plus polarisée linéairement du spectre près du limbe (également appelé « *second spectre solaire* ») ; elle permet d'estimer l'intensité des champs magnétiques turbulents non résolus, qui échappent à l'effet Zeeman, via l'effet Hanle [note 7]. Depuis les années soixante-dix, les magnétographes (c'est-à-dire les télescopes enregistrant les champs magnétiques solaires) utilisent les raies du fer pour les observations systématiques des champs photosphériques (Mont Wilson, Kitt Peak et satellites SOHO/ESA/NASA et SDO/NASA). D'Azambuja, qui a beaucoup étudié ces raies, était loin d'imaginer ces développements futurs de la spectroscopie. A son époque, la nature magnétique des taches solaires venait d'être découverte par Hale (1908), et la loi de la polarité des taches solaires (le cycle magnétique de 22 ans) avait juste été établie par Hale & Nicholson (1925).

La série Balmer de l'hydrogène a été étudiée à plusieurs reprises par d'Azambuja (Figure 30), mais la raie H α est apparue sans aucun doute comme le meilleur choix pour les régions actives et les filaments. Ces travaux ont dévoilé des contrastes décroissants pour les plages et les filaments le long de la série, comme mentionné et discuté par d'Azambuja (1938). Pour cette raison, de telles observations n'ont jamais été faites régulièrement. La raie infrarouge Hel 10830 Å a également été abordée par d'Azambuja (1938). Il s'agit de la première observation mondiale de cette raie, qui n'a jamais été systématiquement reproduite (Figure 31). Les observations quotidiennes de Hel 10830 Å ont démarré bien plus tard (1974) à Kitt Peak (USA), et les observations systématiques depuis l'espace de Hel 304 Å (Hélium ionisé) ont débuté à bord de la mission SOHO/ESA/NASA en 1996 et se poursuivent aujourd'hui avec le satellite SDO/NASA. Cette raie de l'extrême ultraviolet montre les canaux des filaments dans la basse couronne, entourant leur noyau froid d'Hélium et d'Hydrogène neutres.

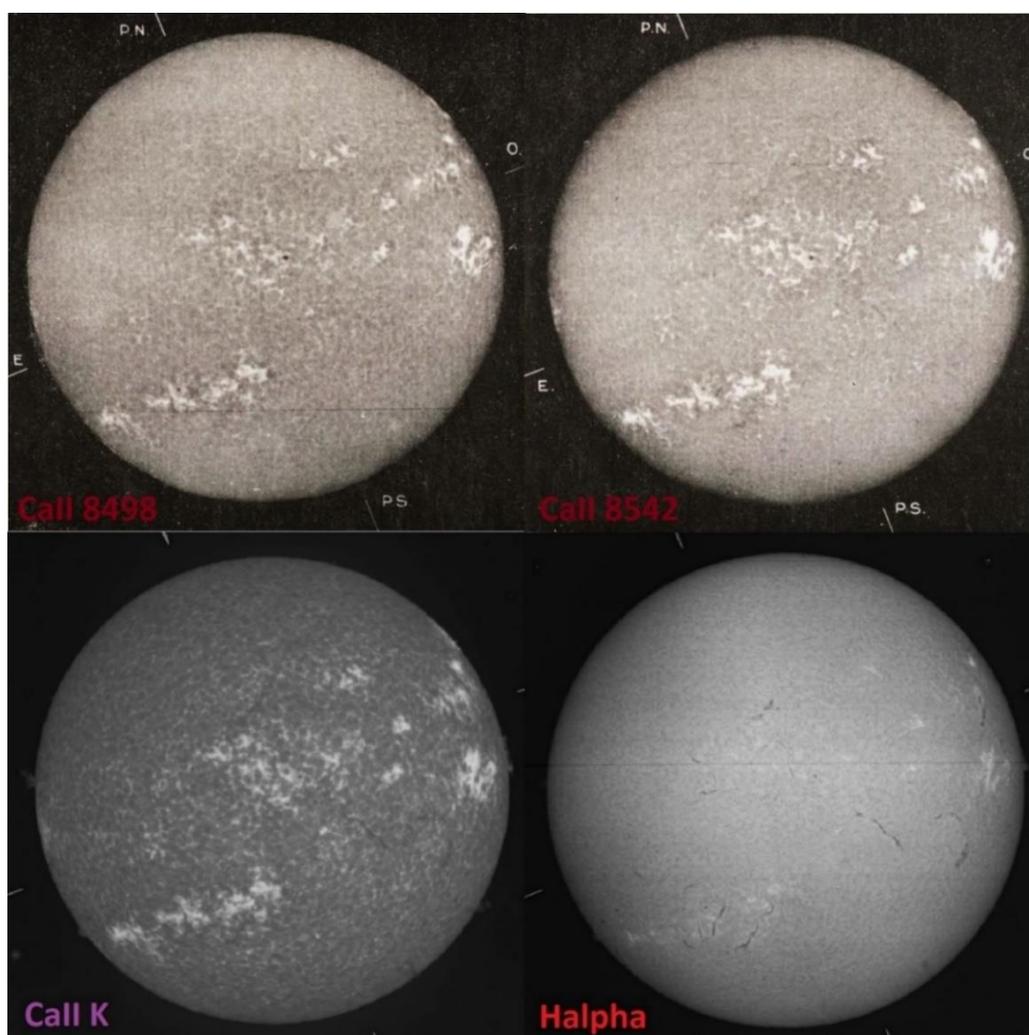


Figure 28. Test des raies infrarouges ionisées de Call (8498 Å et 8542 Å, en haut), comparé aux observations habituelles des raies Call K et H α (en bas). 9 septembre 1928. Les structures apparaissent plus contrastées au centre K3 de la raie K (3934 Å) qu'en infrarouge. Nous expliquons aujourd'hui ce résultat par les altitudes de formation de 1000 km, 1250 km (chromosphère basse) et 1800 km (chromosphère) respectivement pour ces trois raies du Calcium. D'après d'Azambuja (1930) et crédit observatoire de Paris.

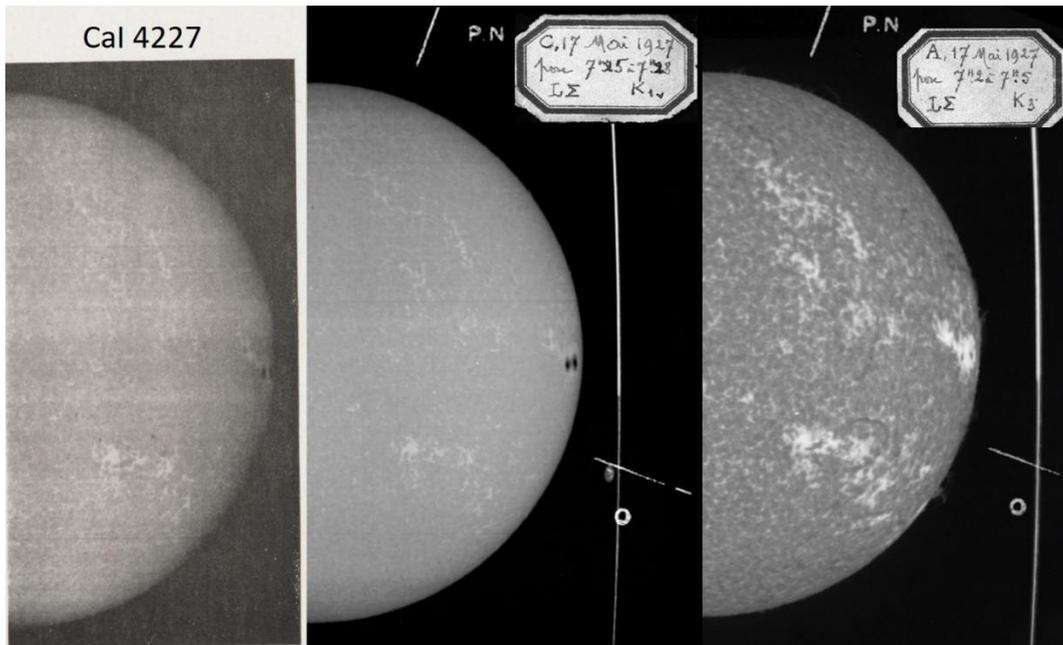


Figure 29. Test de la raie neutre Cal 4227 Å (gauche). Les autres longueurs d'onde (à droite) sont les spectrohéliogrammes quotidiens dans Call K1v (aile bleue) et Call K3 (cœur de raie). Cal 4227 Å fournit des images de la photosphère (taches solaires, facules) qui sont proches des images Call K1v. 17 mai 1927. D'après [d'Azambuja \(1930\)](#) et crédit observatoire de Paris.

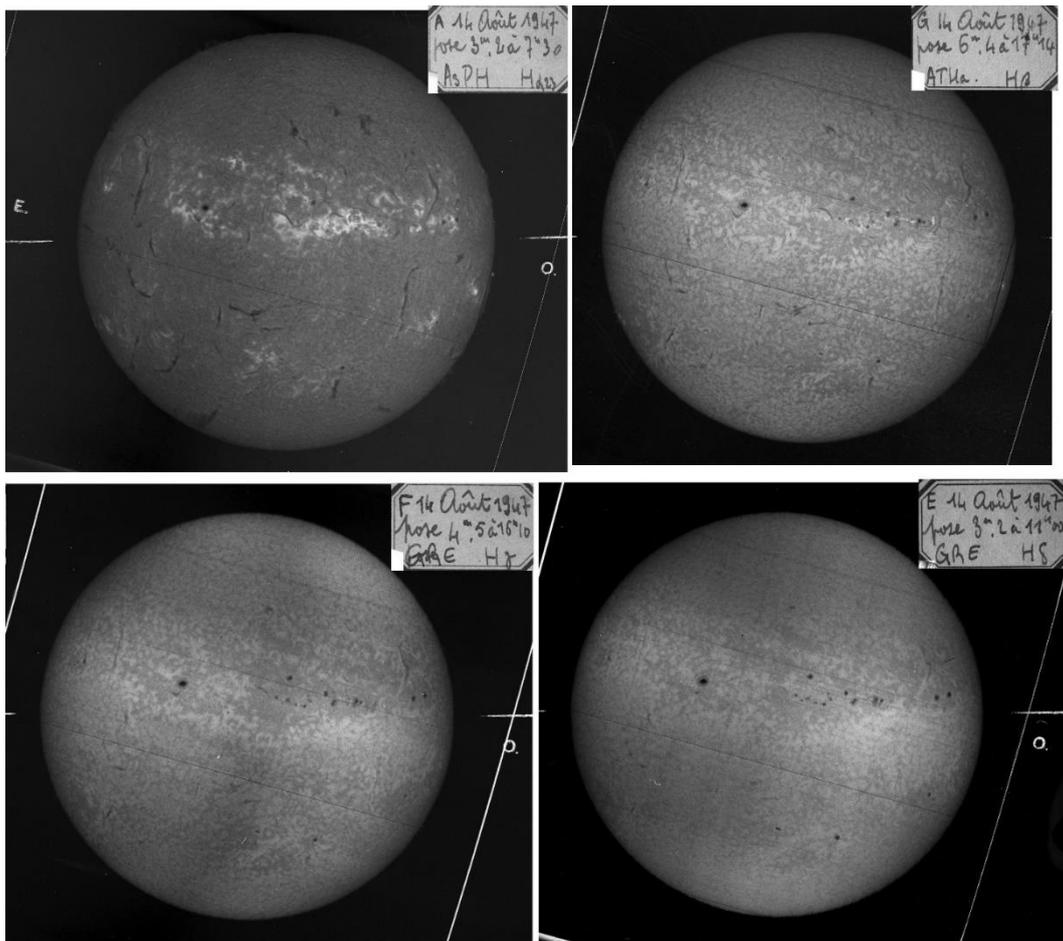
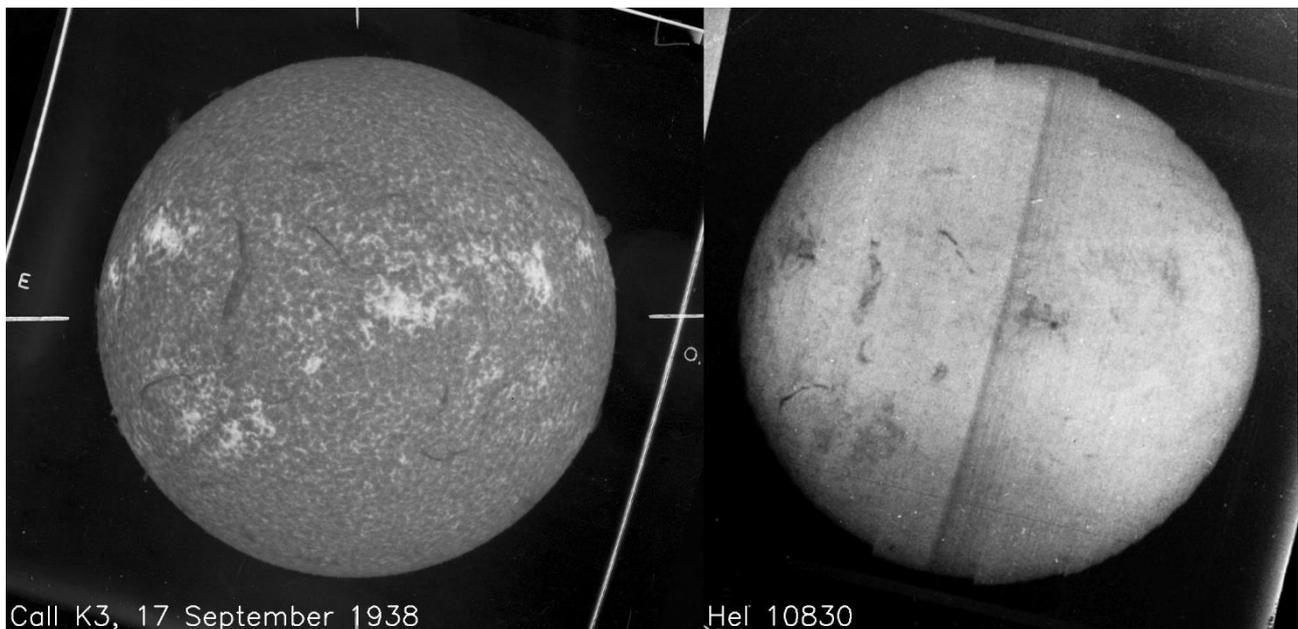


Figure 30. Test de la série de Balmer H α (6563 Å), H β (4861 Å), H γ (4340 Å), H δ (4101 Å). Le contraste des structures solaires, comme les filaments et les plages, diminue en progressant dans la série de Balmer. Les raies deviennent plus faibles et se forment plus profondément dans la chromosphère. H ϵ (3970 Å, non représentée) a également été observée, mais est située dans l'aile étendue de la raie Call H (3968 Å) et impossible à isoler correctement. 14 août 1947. Crédit observatoire de Paris.



Graphique 31. Test de la raie infrarouge He I 10830 Å (à droite), la première observation mondiale. L'image habituelle Call K3 est affichée (à gauche) à titre de comparaison. 17 septembre 1938. D'après [d'Azambuja \(1938\)](#) et crédit observatoire de Paris.

Des catalogues et des dessins de la photosphère en lumière blanche (taches solaires, facules), et des protubérances au limbe, ont été entrepris dès 1883 à l'observatoire de Zürich (« *Eidgenössische Sternwarte* », Suisse, [Illarionov & Arlt, 2022](#)). Afin d'étudier l'activité solaire à long terme et le comportement des filaments solaires, des plages et des taches, ainsi que leur influence mutuelle, d'Azambuja proposa de tirer parti des images monochromatiques à plusieurs altitudes. Il initia en 1913 un programme ambitieux, le dessin de cartes synoptiques des structures appartenant à la couche supérieure (filaments de la chromosphère) et à la couche inférieure (taches solaires). Une carte préliminaire fut publiée après la première guerre mondiale ([d'Azambuja, 1921](#)) et présentée au colloque de l'UAI en 1922. Lors du symposium de 1925, 30 rotations furent montrées et une diffusion internationale des cartes de Meudon fut suggérée. Les spectrohéliogrammes Call K3 et H α servaient respectivement pour les plages et les filaments, et Call K1v pour les taches. Le dessin consistait à reporter, pour chaque rotation synodique du Soleil (durée moyenne de 27.2753 jours), la position moyenne des structures solaires sur des cartes rectangulaires, avec la longitude en abscisse et la latitude en ordonnée. Chaque rotation est identifiée par un numéro de Carrington à partir du 9 novembre 1853. La collection commence à la rotation 876 (Mars/Avril 1919, [Figure 32](#)) et se termine à la rotation 2008 (Octobre 2003). Chaque carte est accompagnée de différents tableaux consignants de nombreux paramètres, comme les coordonnées, la durée de vie, la longueur, la hauteur ou la superficie des structures observées ([Figure 33](#)). Lorsque les données de Meudon manquaient à cause des nuages, un accord avec Kodaikanal (Inde), le Mont Wilson (États-Unis) et Coïmbra (Portugal) fut établi pour l'emploi de leurs images respectives. Les cartes synoptiques furent publiées périodiquement par [d'Azambuja \(1928\)](#) dans les *Annales de l'observatoire de Paris-Meudon*, et plus tard dans *l'Astronomie*. Mme d'Azambuja a beaucoup contribué à cette entreprise de longue haleine qui impliquait aussi G. Olivieri et R. Servajean. La conversion des coordonnées sphériques des spectrohéliogrammes en coordonnées rectangulaires était une tâche compliquée et ennuyeuse. Pour cette raison, R. Servajean et H. Grenat (1900-1968) imaginèrent en 1949 un dispositif anamorphique ([Figure 33](#)), afin de convertir optiquement les spectrohéliogrammes en planisphères. Ce surprenant instrument fut construit par Marcel Brebion, technicien en mécanique, qui reçut le diplôme d'un des « *meilleurs ouvriers de France* ». Olivieri nous avertit, dans ses mémoires, que « *Mme d'Azambuja était extrêmement sévère quant à la qualité du travail, et qu'il avait parfois réussi à produire des résultats acceptés par Mr d'Azambuja, mais qui furent auparavant refusés par son épouse* » ! Mme d'Azambuja se souciait de la réputation du groupe de Meudon et avait une grande estime pour les travaux qui y étaient menés, si bien que Milosevic, astronome en visite, formula un jour cette remarque humoristique : « *c'est comme si le Soleil était la propriété de Mme d'Azambuja* ». Les cartes synoptiques ont servi de base au mémoire de recherche monumental sur les filaments solaires publié par [d'Azambuja & d'Azambuja \(1948\)](#). Il est considéré comme une « *bible* » parmi les astronomes de Meudon et est comparable à une thèse. Les propriétés morphologiques des filaments y sont étudiées, avec leur rotation et leurs mouvements, ainsi que leurs relations avec les taches et les plages environnantes. Après le départ en retraite de Mme d'Azambuja en 1959, le programme de cartes synoptiques s'est poursuivi sous les auspices de M.-J. Martres, qui fut embauchée en 1955 et à son tour partit en 1988. Elle a publié dans *l'Astronomie* les cartes de la période 1958-1991 (plus de 400 rotations) et de nombreux articles basés sur leur interprétation et concernant les filaments. Les cartes furent malheureusement

arrêtés en 2003 lorsque la dernière dessinatrice (Germaine Zlicaric) quitta Meudon. Elles restent disponibles à <ftp://ftp.bass2000.obs.spm.fr/pub/synoptic/> et contiennent encore bien des informations inexplorées.

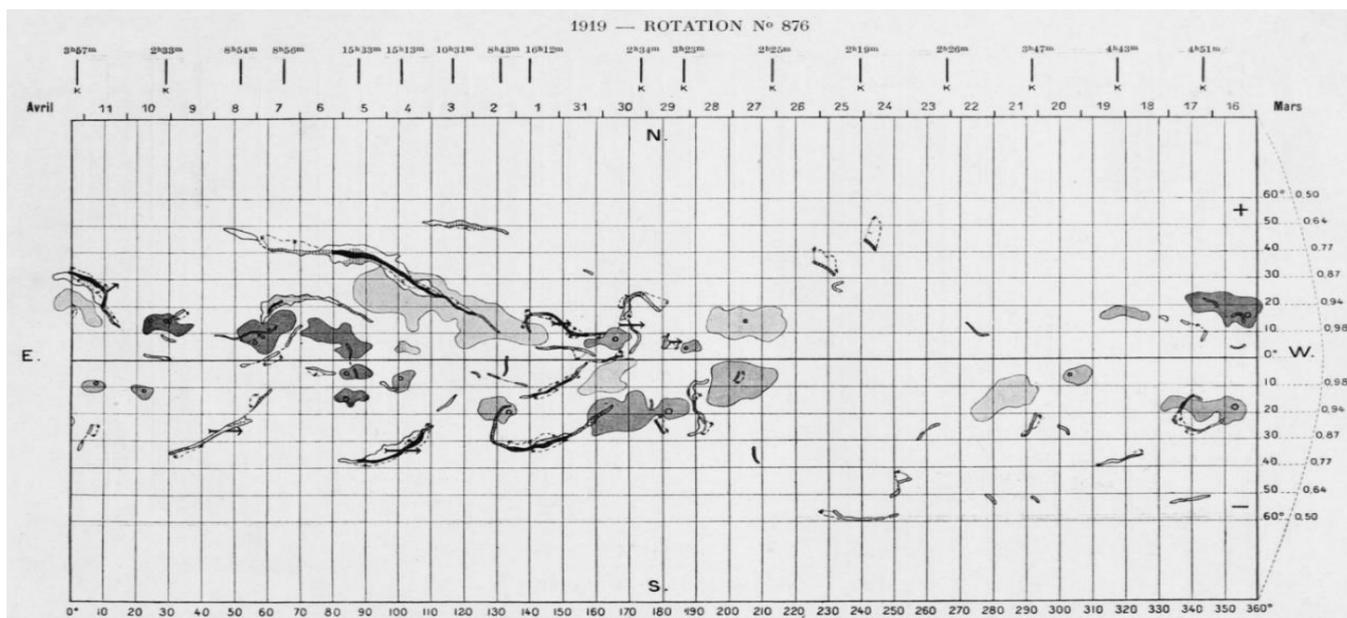


Figure 32. La première carte synoptique de la chromosphère et des taches solaires commence à la rotation 876, Mars/Avril 1919 (abscisse : longitude ; ordonnée : latitude). Les cartes représentent, pour chaque rotation, les taches, les filaments et les plages ; elles sont accompagnées de tableaux (Figure 33) caractérisant les structures observées. D'après d'Azambuja (1928).

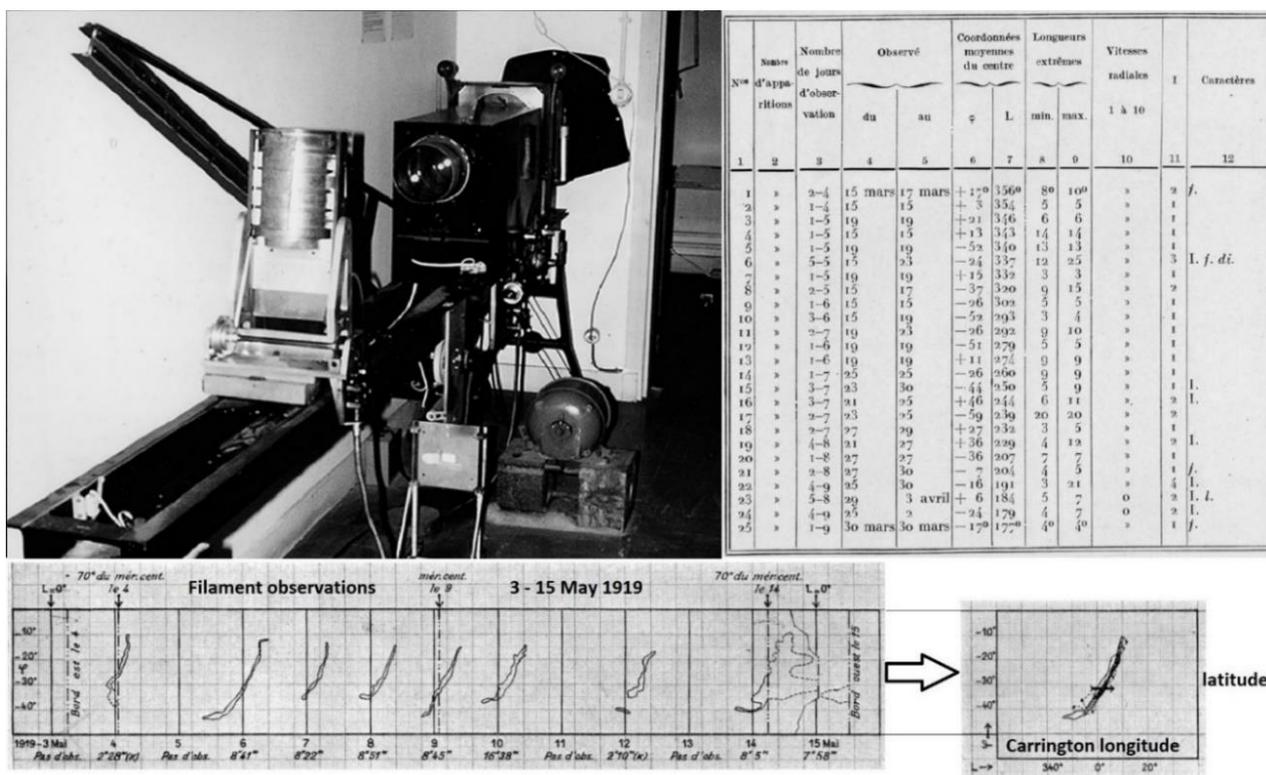


Figure 33. L. d'Azambuja initia le dessin des cartes synoptiques de la chromosphère et des taches. Chaque carte était complétée par un tableau. Le premier publié (à droite, associé à la rotation 876 de la Figure 32) concerne les filaments et fournit les dates d'observation, coordonnées, longueurs, un indice quantifiant les vitesses radiales (intervalle 0-10, unité = 5 km/s) obtenues à partir des « spectrohéliogrammes par sections » (si disponibles) et un indice d'importance (1-10). La dernière colonne contient des commentaires (S=stable, I=instable, f=fin, l=épais, di=discontinu...). Le bandeau inférieur explicite la méthode de dessin des filaments : l'enveloppe moyenne de la structure est reportée sur la carte. Le système anamorphique (à gauche) a été imaginé pour simplifier le processus. Crédit observatoire de Paris et d'après d'Azambuja (1928).

6 - SPECTROHELIOGRAMMES SPECIFIQUES POUR LES VITESSES RADIALES (1919-1939)

Les « *spectrohéliogrammes par sections* » sont constitués de spectres de la raie Call K, enregistrés pas à pas, par des déplacements discontinus de l'objectif d'entrée et de la plaque photographique. Les spectres sont des sections ou coupes du Soleil (approximativement Nord/Sud) ; en fonction du pas des sections, ou de la bande passante en longueur d'onde de chaque section (fixée par la largeur de la fente de sortie), l'image finale sur la plaque photographique était soit elliptique (Figure 34, pas de 5"), soit circulaire (Figure 35, pas de 22"). Les profils des raies étaient analysés pour déterminer les mouvements des structures à partir du décalage Doppler de la composante centrale (K3), comme le montre la Figure 34 (à droite). Le décalage (nommé α sur la figure) est proportionnel à la vitesse projetée sur la ligne de visée (ou vitesse radiale) ; il était mesuré à partir d'une origine connue en longueur d'onde. Ces mesures servaient à étudier la dynamique des filaments et furent rapportées dans les catalogues associés aux cartes synoptiques, via un indice (0-10, unité = 5 km/s) et un signe (décalage bleu/rouge).

La Figure 35 montre un « *spectrohéliogramme par sections* », obtenu lorsque les observations furent menées sur une base régulière après la première guerre, ainsi que les images monochromatiques standard (au diamètre de 86 mm) obtenues quotidiennement en Call K1v (photosphère), Call K3 et H α (chromosphère). Le nombre et la bande passante des sections ou coupes transversales, ainsi que le pas de balayage du Soleil, ont été calculés pour produire des images circulaires, avec environ 86 sections de 1 mm (correspondant à la bande passante de 2.0 Å et au pas de 22" sur le Soleil), enregistrées de manière contiguë sur la plaque photographique. De telles observations de la raie Call K avaient lieu deux fois par jour (une pour le disque complet et une autre pour les protubérances remarquables), avec la priorité donnée aux spectrohéliogrammes habituels. Par exemple, en 1920, 333 observations avec le « *spectrohéliographe par sections* » ont été effectuées (fournissant un total de 1200 images en ajoutant les clichés monochromatiques). Deslandres (1924) nous explique que les observations quotidiennes consistaient en : « (i) la couche inférieure en Call K1v pour les taches solaires et les facules ; (ii) la couche supérieure en Call K3 pour les filaments sombres et les protubérances ; (iii) la couche supérieure en H α , révélant d'autres détails ; (iv) deux observations pour les vitesses radiales, une pour le disque et une autre pour les protubérances ». Cependant, l'analyse des profils des raies et les mesures de vitesse étaient si délicates et si longues pour les opérateurs (qui n'étaient pas nombreux et également observateurs) que cette observation spécifique fut abandonnée en 1939, à l'entrée de la seconde guerre mondiale, et n'a jamais été reprise par la suite. Cependant, les observations monochromatiques de la photosphère (Call K1v) et de la chromosphère (Call K3, H α) ont heureusement été préservées pendant la guerre.

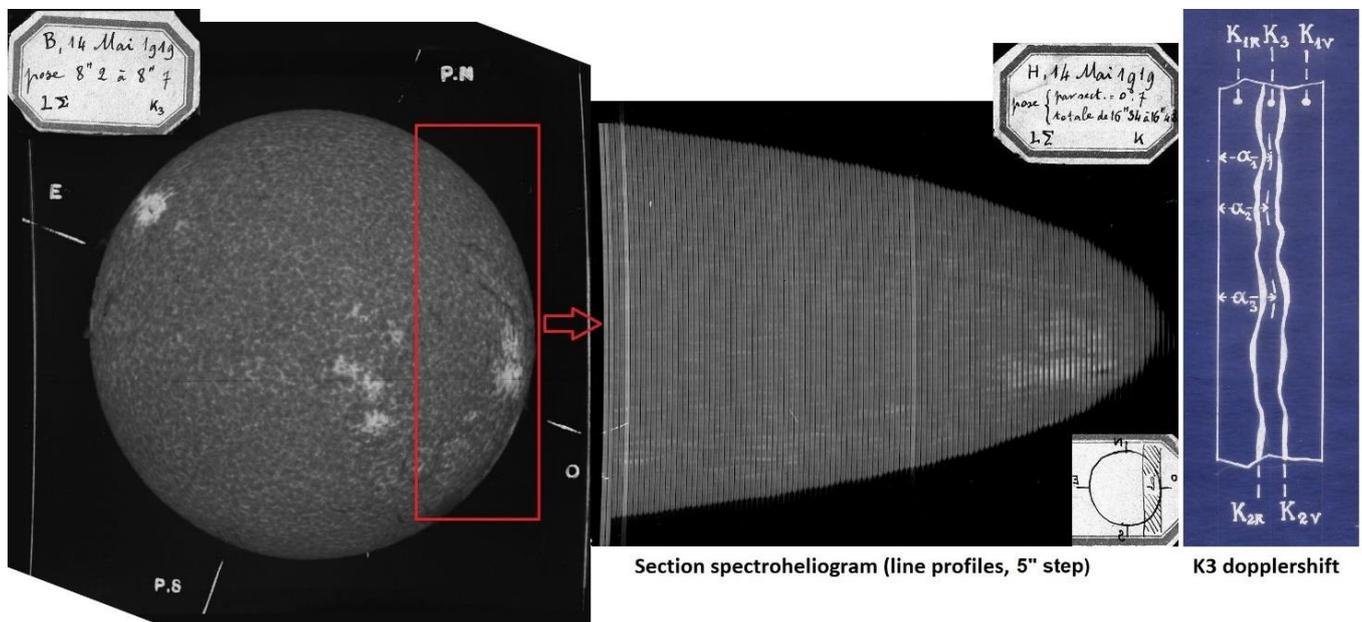


Figure 34. Observations pour la mesure des vitesses radiales (mouvement en projection sur la ligne de visée), 14 mai 1919. L'image centrale est un « *spectrohéliogramme par sections* » de la partie Ouest du Soleil (le rectangle rouge dessiné sur l'image monochromatique Call K3 à gauche). Il est constitué de la juxtaposition de spectres (par pas de 5") de la raie Call K. Le dessin (à droite) montre comment était déterminé le décalage Doppler α du cœur de la raie (la composante K3). Crédit observatoire de Paris et d'Azambuja (1920b).

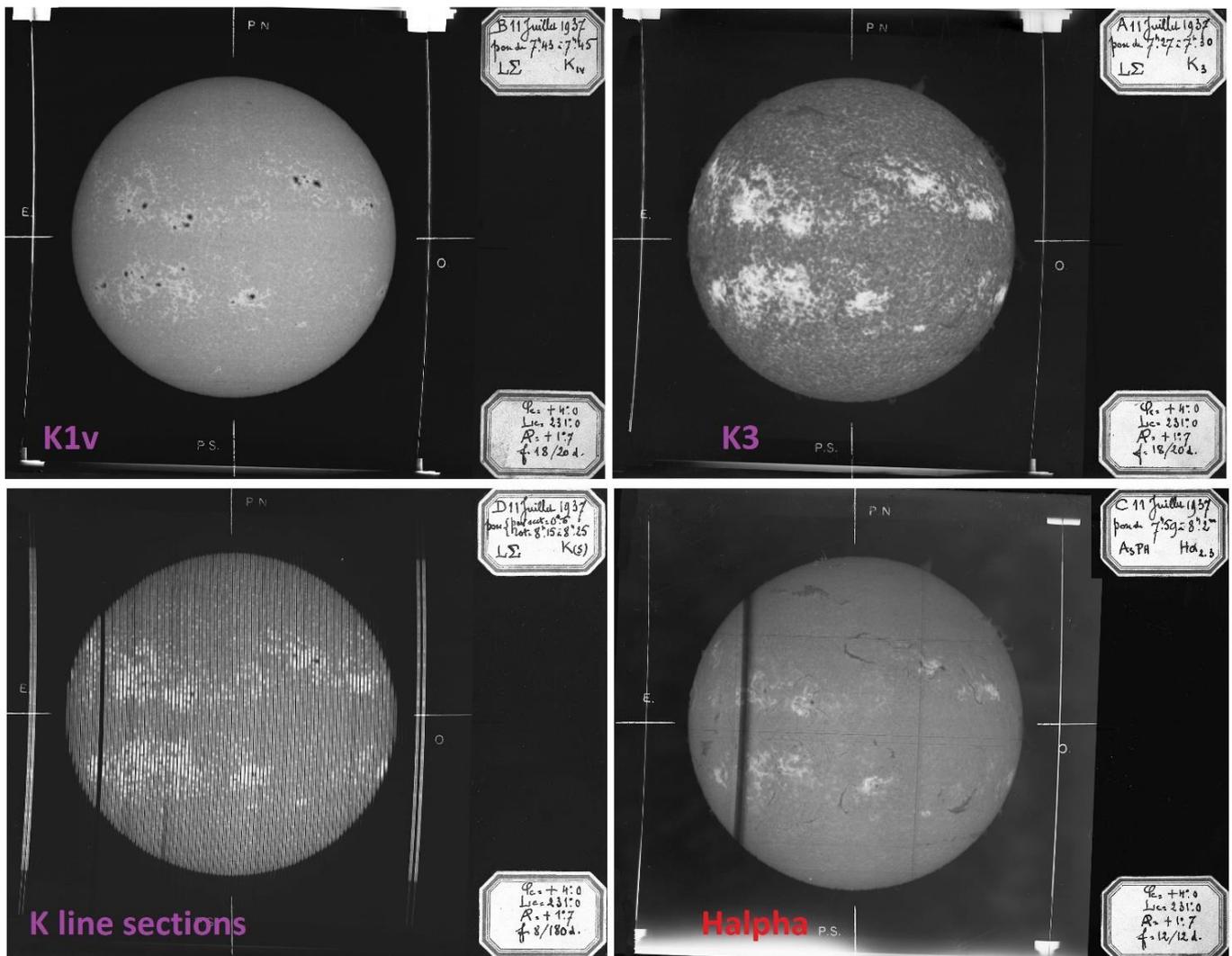


Figure 35. Observations standard faites quotidiennement avec les spectrohéliographes jusqu'en 1939 (exemple du 11 juillet 1937). En haut : Call K1v (photosphère) et Call K3 (chromosphère). En bas : « *spectrohéliogramme par sections* » pour les mesures de vitesse radiale (profils de la raie Call K par pas de 22'') et l'image H α habituelle. Crédit observatoire de Paris.

7 - L'AGE D'OR DES OBSERVATIONS MONOCHROMATIQUES DU SOLEIL ET LEUR ORGANISATION INTERNATIONALE APRES LA PREMIERE GUERRE MONDIALE

Nous avons vu que les observations systématiques ont été totalement interrompues par la guerre de 1914-1918. Elles reprirent dès 1919 avec les deux configurations optiques de 1909 (Figure 22), correspondant aux photographies de la Figure 36, prises en 1921 quelques années après la fin du conflit. La raie Call K était dispersée par trois prismes ; la chambre correspondante (A2) est située à gauche de l'observateur qui se trouve juste à côté de l'image solaire de 37 mm et de la fente d'entrée (S) du spectrographe. La raie H α était formée grâce à un réseau plan ; la chambre associée (A1) se trouve au-dessus du pilier droit. Les supports des plaques photographiques des chambres (A1, A2) sont visibles, ainsi que les fentes de sortie (75 μ m de large) qui sélectionnaient les raies dans le spectre. Le diamètre des images monochromatiques était définitivement fixé à 86 mm. Il est intéressant de noter l'évolution depuis 1909 (Figure 21) : les supports en bois ont été remplacés par des piliers en brique et un nouveau dispositif mécanique (N) a été accroché au plafond. (N) fonctionne toujours aujourd'hui : il s'agit d'un couplage mécanique entre le moteur (M) qui translate l'objectif d'imagerie (non visible) et une « lune » artificielle située dans le plan de l'image. Elle est constituée d'une densité neutre ronde de valeur unité (ND1, diamètre 37 mm, transmission de 10%) se déplaçant avec l'image solaire lors du balayage de la surface, afin d'observer les structures peu lumineuses du limbe. En effet, les temps d'exposition requis pour les protubérances sont plus longs que pour le disque solaire ; l'atténuateur permet de les observer sans saturer le disque (à part la chromosphère juste au bord solaire). Comme la dimension angulaire du Soleil varie selon les saisons, deux « lunes » de diamètres différents sont disponibles, une « lune d'hiver » et une « lune d'été ».

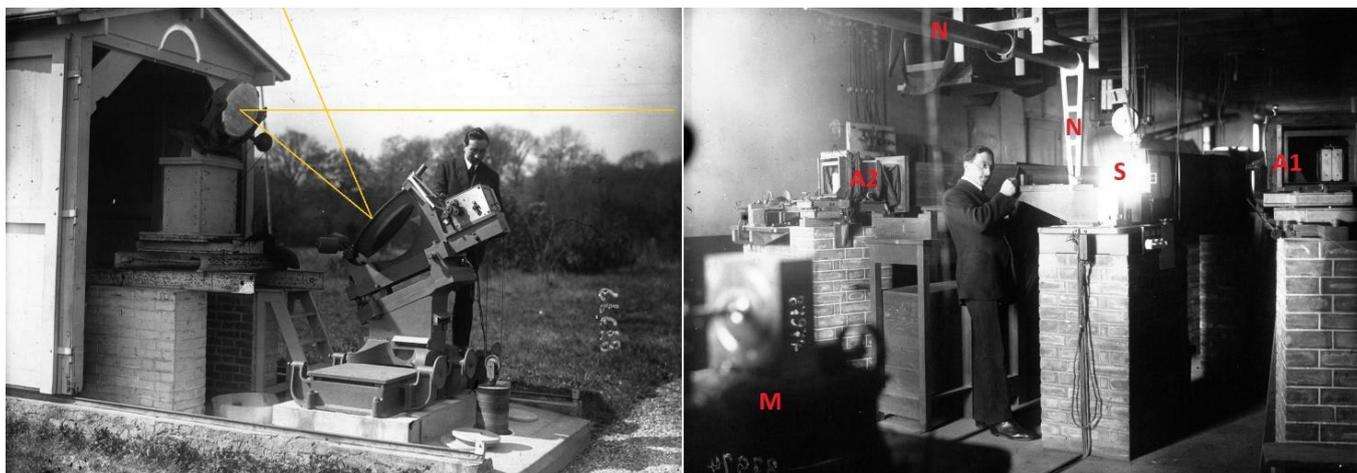


Figure 36. : le coélostât à deux miroirs en 1921 (à gauche). Après les deux réflexions, le faisceau horizontal traverse l'objectif (non représenté) pour former une image solaire de 37 mm sur la fente du spectrographe (S, à droite). Elle se déplace à l'aide du moteur (M) de l'objectif. Les chambres Call K (A2) et H α (A1) sont dotées de supports de plaques motorisés, qui bougent 2.31 fois plus vite que l'objectif. On voit la fente de sortie de la chambre (A1). (N) est un tuyau rotatif de métal qui est couplé mécaniquement au support de l'objectif et maintient un atténuateur dans l'image solaire, permettant d'observer à la fois les structures du disque et du limbe avec un long temps de pose. Crédit Gallica/BNF.

En accord avec la formule de Deslandres (« *il faut enregistrer en continu tous les phénomènes variables du Soleil et de la Terre* » pour comprendre leurs interactions), le spectrohéliographe fut complété en mai 1921 par un magnétomètre détectant les fluctuations du champ magnétique terrestre. Il était situé à proximité des instruments solaires et constitué d'une aiguille magnétisée et d'un enregistreur, afin d'étudier l'influence des taches solaires et des plages sur la direction du champ magnétique terrestre. Lorsque la déviation de l'aiguille était importante, elle déclenchait une sonnerie pour alerter les opérateurs qu'un événement survenait. Les observations systématiques n'ont pas été interrompues par la guerre de 1939-1945, à l'exception des « *spectrohéliogrammes par sections* » dans la raie Call K, définitivement arrêtés en 1939. Après la guerre, André Danjon (1890-1967), directeur des observatoires de Paris-Meudon de 1945 à 1963, créa trois équipes : « les spectrohéliographes » (observations solaires quotidiennes de la photosphère et de la chromosphère), « les couches externes du Soleil » (protubérances et couronne chaude), « les comètes et nébuleuses », respectivement dirigées par L. d'Azambuja, B. Lyot et F. Baldet (Figure 37). A la retraite de Mr d'Azambuja en 1954, Mme d'Azambuja devint responsable des spectrohéliogrammes et des cartes synoptiques. B. Lyot décéda dramatiquement en 1952 lors de la mission d'éclipse de Khartoum, et fut remplacé en 1954 par Raymond Michard (1925-2015) à la tête de l'équipe des « couches externes ». Au départ de Mme d'Azambuja en 1959, Michard prit la responsabilité d'un service solaire unifié, transformé en département solaire et planétaire (nommé DASOP) après les événements de mai 1968, selon le nouveau statut de l'institution (Mein & Mein, 2020). Michard resta à la tête du DASOP jusqu'en 1971, et devint le premier président élu de l'observatoire de Paris (y compris Meudon et la station de radioastronomie de Nançay).

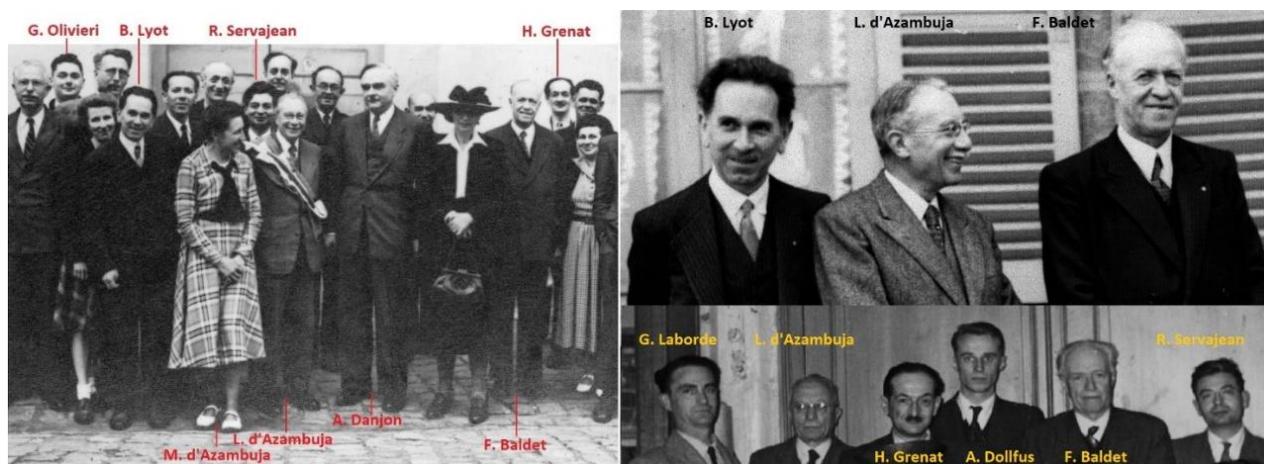


Figure 37. Le personnel scientifique de Meudon dans les années cinquante. A gauche : jubilé de L. d'Azambuja, après 50 ans d'astronomie à Meudon (1949). A droite (en haut) : Lyot, d'Azambuja et Baldet étaient à la tête des trois équipes scientifiques. A droite (en bas) : Laborde, Grenat et Servajean, affectés au service de d'Azambuja. Crédit observatoire de Paris.

Afin de suivre en temps réel l'activité solaire, Hale (1929) a inventé le spectrohélioscope visuel. Il s'agissait d'un spectrohéliographe à deux fentes oscillantes (Ré, 2014), ou bien mieux, à deux prismes d'Anderson (de section carrée) tournant à la même vitesse devant les fentes d'entrée et de sortie. Dans ce cas, le premier prisme (dans l'image solaire) servait à balayer la surface solaire et le deuxième prisme (derrière la fente dans le spectre) formait une image monochromatique en exploitant la persistance rétinienne. La coopération internationale dans le domaine des observations solaires a commencé dans les années trente. Hale (1931a) a été un précurseur et a initié un réseau de 23 spectrohélioscopes visuels, qui étaient identiques et disséminés dans de nombreuses stations pour établir une surveillance mondiale de l'activité chromosphérique. En 1932, la commission solaire de l'UAI se scinda en quatre groupes et d'Azambuja devint responsable de la subdivision dédiée aux phénomènes chromosphériques. D'Azambuja (1939) a exposé l'organisation en place pour la coordination des 23 stations situées en Amérique, en Europe, en Asie, en Australie et en Nouvelle-Zélande. Les observations des éruptions étaient recueillies et compilées par Meudon, qui publiait des listes, des indices et des tableaux dans le « *Bulletin for Character Figures of Solar Phenomena* », édité par l'observatoire de Zürich depuis 1928. Il a été rebaptisé « *Quarterly Bulletin of Solar Activity* » (QBSA) en 1939 et a été transféré en 1976 à Mitaka (Japon, une archive en ligne existe à <https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/en/wdc/qbsa.html>). Le QBSA fut délivré dans 60 pays jusqu'en 2009.

De nombreux résultats ont été obtenus avec les spectrohélioscopes (Hale, 1930, 1931a, 1931b). A Meudon, il était aisé de basculer rapidement entre le spectrohéliographe photographique et l'instrument visuel amovible de la Figure 38 et de la Figure 39. Il comportait deux prismes rotatifs d'Anderson. Le spectrohélioscope servait quotidiennement pendant deux heures pour inspecter les régions actives de la surface du Soleil, dans le but de détecter des événements évolutifs ou dynamiques rapides, comme des éruptions ou des instabilités de filaments (après 1955, cette tâche a été confiée à l'héliographe monochromatique utilisant un filtre de Lyot). Dans les années cinquante et pendant l'été, le directeur des observatoires de Paris-Meudon, A. Danjon, vivait à Meudon. Ses principales distractions étaient la cueillette des champignons dans la forêt avoisinante et les observations avec le spectrohélioscope visuel. Cet appareil est toujours présent mais n'est plus actif. Il faut noter qu'un « *spectrohéliocinématographe* » a été construit à Kitt Peak par McMath & Petrie (1934) avec des caméras cinématographiques de 35 mm pour enregistrer des observations à haute cadence, mais cette invention a rapidement été supplantée par les lunettes beaucoup plus pratiques utilisant des filtres (Lyot, 1944). Le relevé optique de l'activité solaire fut complété après 1948 par les longueurs d'onde radio. Laffineur & Houtgast (1949) transformèrent un radar allemand Würzburg de la seconde guerre mondiale (7,50 m de diamètre), installé à Meudon, en radiotélescope et détectèrent les sursauts solaires à la fréquence de 550 MHz (longueur d'onde de 55 cm). Cette antenne est l'ancêtre des instruments de Nançay (station créée en 1953).

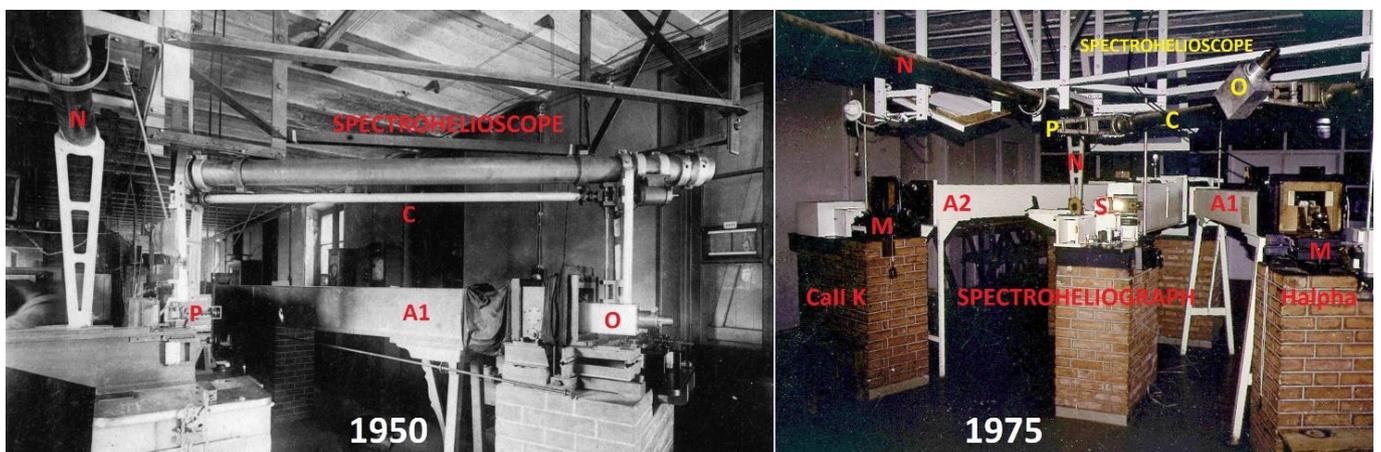


Figure 38. A gauche : le spectrohélioscope visuel dans les années cinquante fonctionnait avec deux prismes à rotation rapide, le premier devant la fente d'entrée (P) et le second derrière la seconde fente dans le spectre (O). Il y avait un seul moteur pour les deux prismes avec un accouplement mécanique (C). Un oculaire (O) permettait d'examiner la fente de sortie, qui formait un spectrohéliogramme en raison de la persistance de la lumière sur la rétine de l'œil. Seule la chambre (A1), dédiée aux images H α de la chromosphère, était concernée. A droite : le spectrohéliographe photographique (A1 pour H α , A2 pour Call K) et le spectrohélioscope visuel (escamoté, donc hors position d'observation), 25 ans plus tard, en 1975. Crédit observatoire de Paris.



Figure 39. A gauche (a) : Le spectrohéloscope visuel fonctionnait avec deux prismes tournant à grande vitesse, respectivement devant la fente d'entrée (rectangle b) et derrière la fente de sortie dans le spectre (rectangle c). Deux moteurs synchrones remplacent le moteur unique de la Figure 38, de sorte que la mécanique complexe d'entraînement a été supprimée. Au centre (b) : le prisme (section carrée de 14 mm) dans le plan de l'image (moteur au-dessus). A droite (c) : prisme (section carrée de 32 mm) dans le spectre entre la fente de sortie et l'oculaire (moteur au-dessus). Le rapport des sections (32/14) correspond au grossissement du spectrographe (2.31). Crédit observatoire de Paris.

Afin d'étudier l'impact des éruptions solaires sur la Terre, comme les perturbations ionosphériques et la recrudescence de particules propagées par le vent solaire, qui se produisent généralement dans un délai voisin de 24 heures, des messages (appelés ursigrammes) furent diffusés à la communauté géophysique par plusieurs pays. Ce fut mis en œuvre sous les auspices de l'Union Radio Scientifique Internationale (URSI) dès 1928. Un indice (0-5) quantifiait le niveau d'activité solaire. L'émission fut interrompue par la guerre 1939-1945, mais l'UAI recommanda à la Commission 11 (présidée par L. d'Azambuja) d'examiner la question de « *la prédiction des phénomènes terrestres d'origine solaire et la détermination des zones actives* » (d'Azambuja, 1949). Les ursigrammes reprirent en juin 1947 à partir d'informations recueillies par de nombreux observatoires et centralisées à Meudon par télégramme. Il n'était pas possible de prédire les éruptions solaires, mais les messages indiquaient quotidiennement la position des régions actives et le déclenchement d'éruptions. Cet outil étant jugé très important pour l'étude des relations entre le Soleil et la Terre (on dit aujourd'hui « météorologie spatiale », ou « Space Weather »), il fut étendu et de nouveaux centres de diffusion furent instaurés. En 1962, le « International Ursigram and World Days Service » (IUWDS) fut créé et favorisa le développement de méthodes de prévision de l'activité solaire. Il fut ensuite remplacé en 1996 par le « International Space Environment Service » (ISES, <http://www.spaceweather.org/>), avec 15 centres régionaux d'alerte (RWC, « Regional Warning Center ») placés à différentes longitudes (Meudon resta RWC jusqu'en 1997). Parmi eux, le « Space Weather Prediction Centre » (Boulder, USA, <https://www.swpc.noaa.gov/>) émet des prévisions quotidiennes et est aujourd'hui le service le plus exhaustif. Le Comité scientifique de physique solaire et terrestre (SCOSTEP, <https://scostep.org/>, « Scientific Committee On Solar TERrestrial Physics ») coordonne des programmes de recherche internationaux pour améliorer notre compréhension des instabilités solaires et la fiabilité des prévisions. Cela implique également des campagnes internationales d'observations multi-longueurs d'onde (depuis l'espace pour les rayonnements de haute énergie, au sol pour les événements optiques et radio) ; on peut citer par exemple le programme « Max Millennium » (https://solar.physics.montana.edu/max_millennium/).

A la retraite de Mme d'Azambuja (1959), les observations se poursuivent à Meudon avec Servajeau, Martres et Olivieri, qui quittèrent l'observatoire respectivement en 1975, 1988 et 1992. Mme d'Azambuja fut également fortement impliquée dans les cartes synoptiques et dans le catalogue des éruptions (QBSA). Elle participa activement à la préparation du programme français de l'Année Géophysique Internationale (IGY, 1957), avec Michard. Il initia de nouveaux instruments dédiés aux études de l'activité solaire (comme le spectrographe à éruptions du Pic du Midi ou les héliographes monochromatiques à haute cadence des observatoires de Meudon et de Haute Provence, voir Mein & Mein, 2020).

Après le retrait des d'Azambuja en 1959, le puissant spectrohéliographe de 7.0 m de la Figure 26 (principalement utilisé à des fins de recherche) fut légèrement transformé par Michard & Rayrole (1965) pour produire, aussi souvent que possible, des plaques de champ magnétique des taches solaires et des régions actives (PCM, Figure 40). Environ 100 observations ont été faites en quelques années. Ils utilisèrent une grille de Hale-Nicholson située à l'entrée du spectrographe alimenté par le Sidérost de Foucault de 75 cm (situé à droite de la

Figure 19) et un nouveau télescope grégorien de 40 cm (distance focale équivalente à 25 m), fournissant une image solaire de 235 mm. Cependant, il fonctionnait exactement comme le « *spectrohéliographe par sections* » de Deslandres, formant des spectres d'une raie du fer (sensible à l'effet Zeeman [note 6]), et balayant pas à pas les régions actives (le télescope et la plaque se déplaçaient simultanément). La dispersion du grand spectrographe de 7.0 m était de 3.85 mm/Å, pour la raie FeI 6302.5 Å, grâce au nouveau réseau Baush & Lomb de 1200 traits/mm. Chaque PCM (9 x 24 cm²) était réalisée par pas de 2.4" ou de 3.6", et contenait un maximum de 110 sections de 2 mm, chacune ayant une largeur spectrale de 0.52 Å. La grille était composée de bandes alternativement quart et trois quarts d'onde, générant les signaux à polarisation circulaire $\sigma+$ et $\sigma-$ de l'effet Zeeman. Un observateur (retraité il y a longtemps) m'expliqua un jour que les premières grilles étaient faites de cellophane (un matériau biréfringent) composant les sachets de bas de Mme Michard ! Pour FeI 6302.5 Å, l'écartement Zeeman ($w = 0.46 B$, en Å) est proportionnel au champ magnétique B (en Tesla). Le décalage en longueur d'onde entre $\sigma+$ et $\sigma-$ est du double. Dans les taches solaires ($B \approx 0.1$ Tesla), l'ordre de grandeur du décalage Zeeman est de 0.1 Å. Cette belle expérience, basée sur le spectrographe de d'Azambuja, est l'ancêtre du magnétographe de Meudon construit par Jean Rayrole (1932-2008) dans les années quatre-vingt et du télescope THEMIS (Tenerife), conçu par Rayrole et l'institut INSU/CNRS dans les années quatre-vingt-dix.

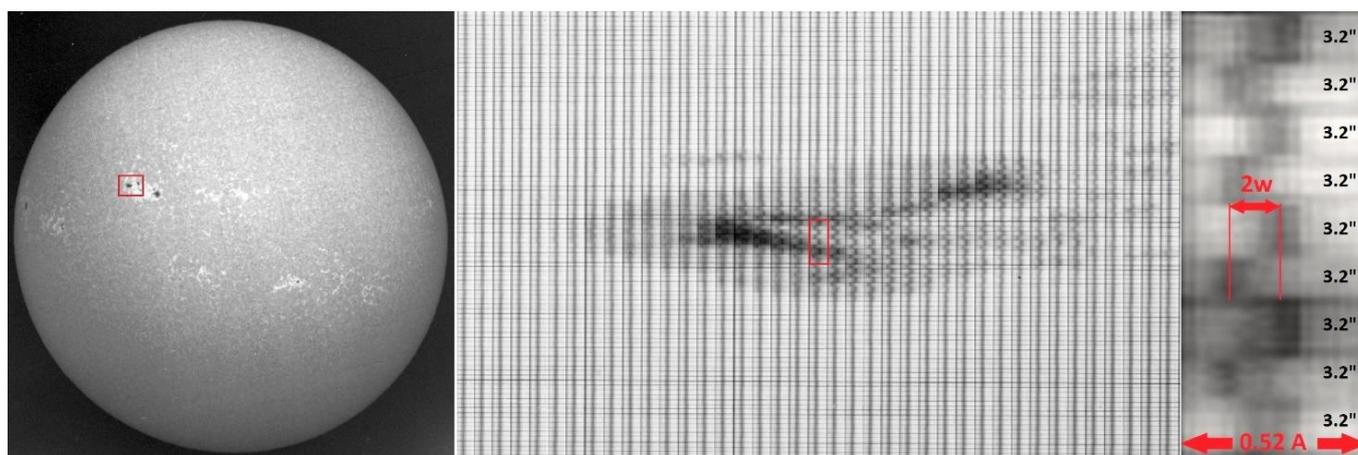


Figure 40. Champs magnétiques étudiés avec le spectrographe de 7.0 m de d'Azambuja. A gauche : spectrohéliogramme Call K1v du 10 juin 1963 ; le carré rouge correspond au champ de vision de la plaque de champ magnétique (PCM). Au centre : PCM, observation de FeI 6302.5 Å dans une tache solaire avec la grille de Hale-Nicholson, par pas de 2.45" dans la direction Est/Ouest. Des bandes horizontales de 3.2" de hauteur fournissent alternativement des signaux $\sigma+$ et $\sigma-$ le long de la fente orientée Nord/Sud. Le rectangle rouge encadre un détail agrandi. A droite : le champ magnétique (projeté sur la ligne de visée) est proportionnel à l'écartement Zeeman ($2w$) entre $\sigma+$ et $\sigma-$. Sur cet exemple, il indique un champ magnétique de 0.14 Tesla. Crédit observatoire de Paris.

8 - EVENEMENTS RARES DE L'ACTIVITE SOLAIRE OBSERVES AVEC LES SPECTROHELIOGRAPHES

La source d'activité solaire est située dans la photosphère et dans la chromosphère. De nombreux événements spectaculaires, comme les instabilités des protubérances de la Figure 41, ont souvent été observés dans le passé par les spectrohéliographes, à la fois en Call K3 et H α . Ils ont montré que de violentes éjections (des dizaines de km/s) peuvent souvent se produire lors de phénomènes actifs. D'Azambuja & Grenat (1926) ont analysé l'éruption solaire du 13 octobre 1926 où des vitesses de 130 km/s ont été mesurées en H α , et même 150 km/s dans la raie jaune de l'Hélium HeI D3 (5876 Å), avec les spectrohéliographes de recherche. Le lendemain, une forte tempête géomagnétique fut détectée (il s'agit d'une perturbation du champ magnétique terrestre due aux particules énergétiques solaires, transportées par le vent à 1500 km/s, et impactant par exemple les télécommunications ou le transport d'électricité aux hautes latitudes). Une aurore polaire (émission de lumière liée à l'interaction entre les particules solaires et l'atmosphère terrestre) fut également aperçue à l'observatoire de Meudon.

Avant les années cinquante, les lunettes à haute cadence utilisant des filtres étroits n'existaient pas, et les spectrohéliographes constituaient l'unique outil disponible, bien qu'incapables de maintenir la cadence d'observation nécessaire pour suivre en détail l'évolution des éruptions. Beaucoup d'instruments rapides furent développés pour et après IGY 1957 avec les filtres de Lyot et de Fabry-Perrot, principalement en H α . Meudon a utilisé le premier filtre de Lyot en 1954 avec une cadence de 60 s. Aujourd'hui, alors que les instruments au sol détectent la naissance et le développement des événements dans la chromosphère (8000 K), les télescopes embarqués à bord des satellites,

tels que SDO/NASA, observent les éjections au-dessus de la chromosphère, dans la basse couronne, et dans la plage de température 10^5 - 10^7 K à partir des raies de l'extrême ultraviolet (visibles uniquement depuis l'espace). Les coronographes à lumière blanche, comme ceux à bord de SOHO/ESA/NASA ou de STEREO/NASA, permettent même de suivre la propagation des éjections de masse à grande distance, jusqu'à 30 rayons solaires.

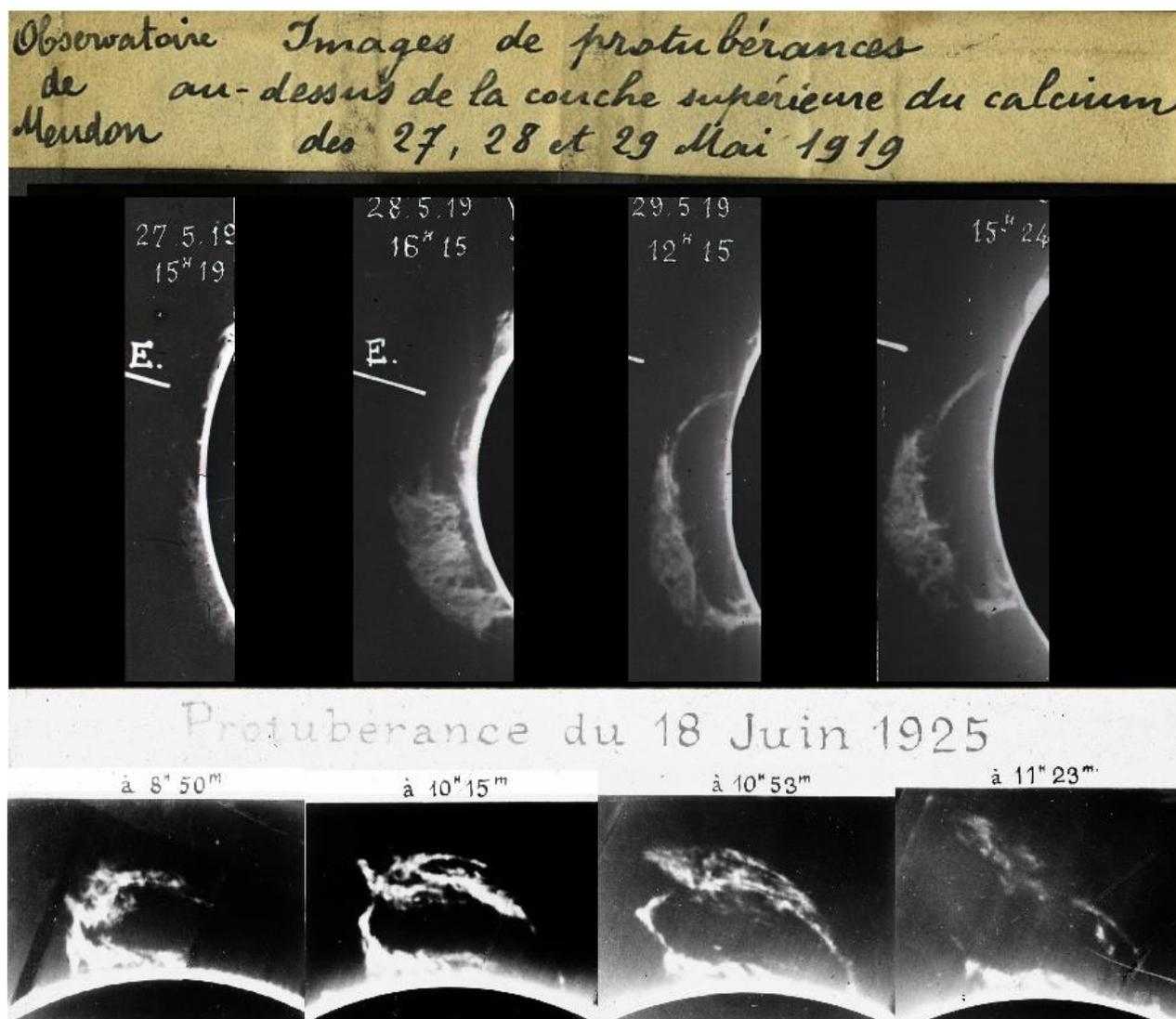


Figure 41. Protubérances éruptives au limbe observées en Call K3 les 27, 28 et 29 mai 1919 (en haut) et le 18 juin 1925 (en bas) avec les spectrohéliographes. Les heures TU sont indiquées sur les photos. Crédit observatoire de Paris.

La collection centenaire de spectrohéliogrammes Call K1v de Meudon contient de nombreuses informations sur l'aire couverte par les taches solaires. En particulier, le groupe de taches d'Avril 1947 (Figure 42) est probablement le plus important jamais vu (6.1% du disque solaire), suivi par d'autres groupes du même cycle (le numéro 18), notamment les groupes de Février 1946, Mai 1951, Juillet 1946 et Mars 1947 (respectivement 5.2%, 4.9%, 4.7% et 4.6% du disque). Le groupe de Juillet 1946 (Figure 42) a produit la forte éruption solaire de la Figure 43 et une puissante tempête géomagnétique. Cet événement éruptif est l'un des plus énergiques jamais observés. A. Danjon, directeur des observatoires de Paris-Meudon, était présent lors de cet événement. Olivieri (1993) rapporte dans ses mémoires que « les ordres qu'il donnait ne contribuaient pas à faire conserver leur sang-froid aux observateurs » ! L'origine de l'énergie stockée, puis libérée, dans les régions actives est magnétique. Cette énergie est proportionnelle à la surface couverte par le champ magnétique et au carré de son intensité. Les configurations instables se manifestent souvent près du maximum solaire et déclenchent d'énormes éruptions. L'évènement rare de 1946 illustre l'importance des données historiques. Il a permis à Aulanier et al. (2013) de prédire l'énergie maximale d'une éruption solaire, environ $5 \cdot 10^{26}$ Joule (soit 10 fois celle jamais mesurée par les satellites de l'ère moderne, le 4 novembre 2003). L'énergie moyenne des éruptions solaires se situe autour de 10^{25} Joule ; c'est plus que celle consommée par l'humanité pendant des années ! Mais elle reste plus petite que les énergies des super-éruptions (10^{27} - 10^{29} Joule) découvertes par le satellite Kepler dans certaines étoiles de type solaire, soupçonnées présenter des taches beaucoup plus vastes que notre Soleil (Schmieder, 2018).

La [Figure 42](#) dévoile des filaments d'une longueur rare (plus d'un rayon solaire soit 700000 km). Ils délimitent des cellules géantes de polarités magnétiques opposées. La figure montre aussi les régions brillantes (les zones faculaires) qui ont été employées par [Chatzistergos et al. \(2020\)](#) comme « proxy » pour reconstruire les champs magnétiques solaires sur l'ensemble du XX^{ème} siècle, en particulier avant les mesures directes faites par les magnétographes (utilisant l'effet Zeeman), qui ne sont apparus que dans les années soixante-dix. Ce « proxy » permet également à [Chatzistergos et al. \(2021\)](#) de développer une méthode de détermination à long terme de l'irradiance totale (TSI ou flux solaire en Watt/m² au niveau de l'orbite terrestre) ; il s'agit d'un outil prometteur pour reconstruire la TSI depuis 1900 ou avant, ce qui présente un grand intérêt pour évaluer l'influence du Soleil sur le climat terrestre, lorsque les mesures directes des satellites n'existaient pas (c'est-à-dire avant les années quatre-vingt). De plus, [Chatzistergos et al. \(2022\)](#) ont établi, à l'aide des collections historiques de spectrohéliogrammes, une relation entre les taches et les aires des plages, ce qui améliorera considérablement la reconstruction de la TSI depuis le minimum de Maunder (1650-1710, la plus longue période documentée de très faible activité solaire). En effet, aucune donnée concernant les plages n'est disponible avant l'ère photographique (c'est-à-dire avant 1900), contrairement aux taches solaires qui ont été dessinées depuis le XVII^{ème} siècle.

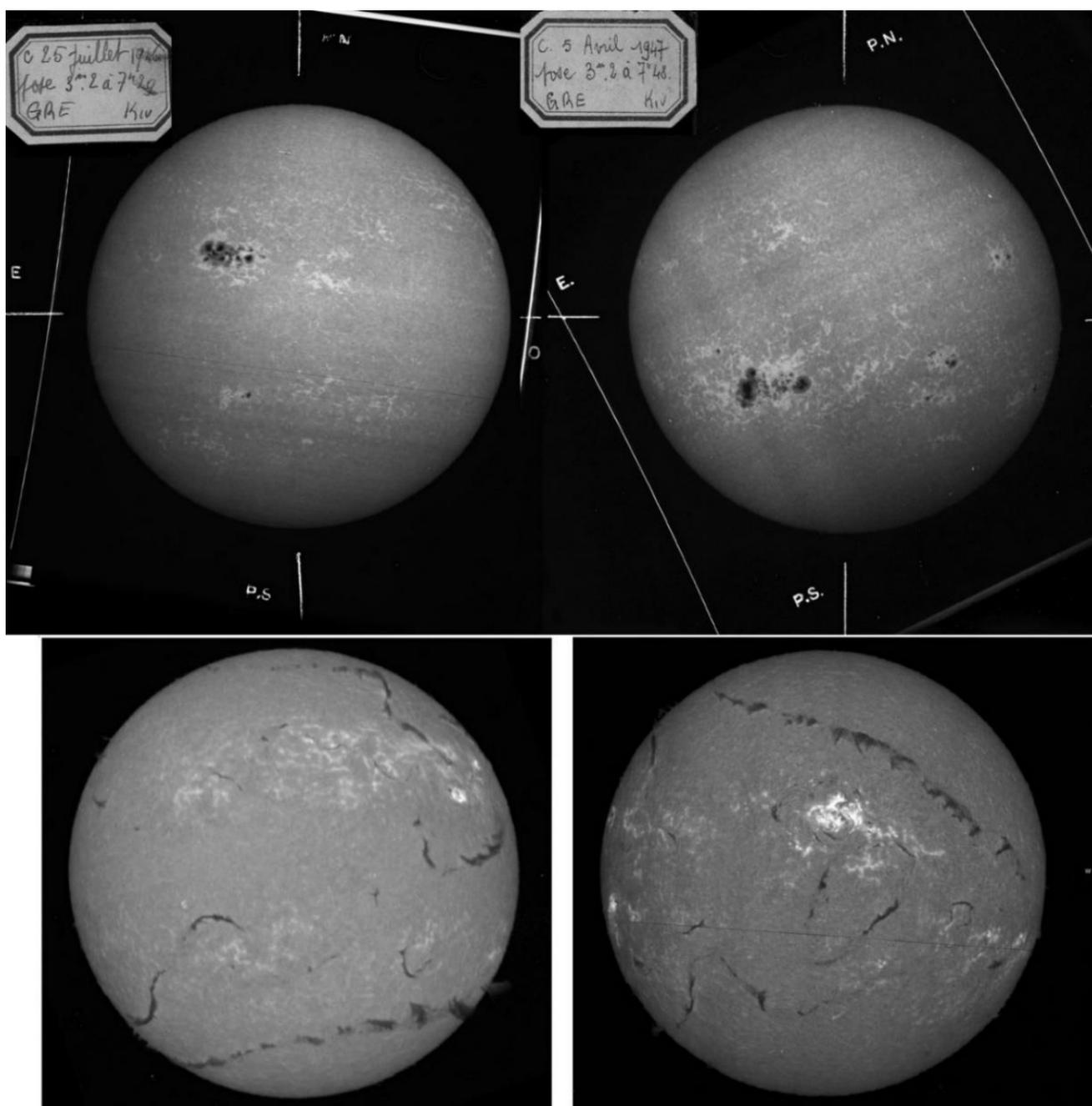


Figure 42. Évènements rares observés avec le spectrohéliographe. D'énormes groupes de taches solaires (en haut, 25 juillet 1946 et 5 avril 1947, observés en Call K1v) et des filaments solaires exceptionnellement longs (en bas, 30 janvier 1999 et 16 juillet 2002, observés en H α). Crédit observatoire de Paris.

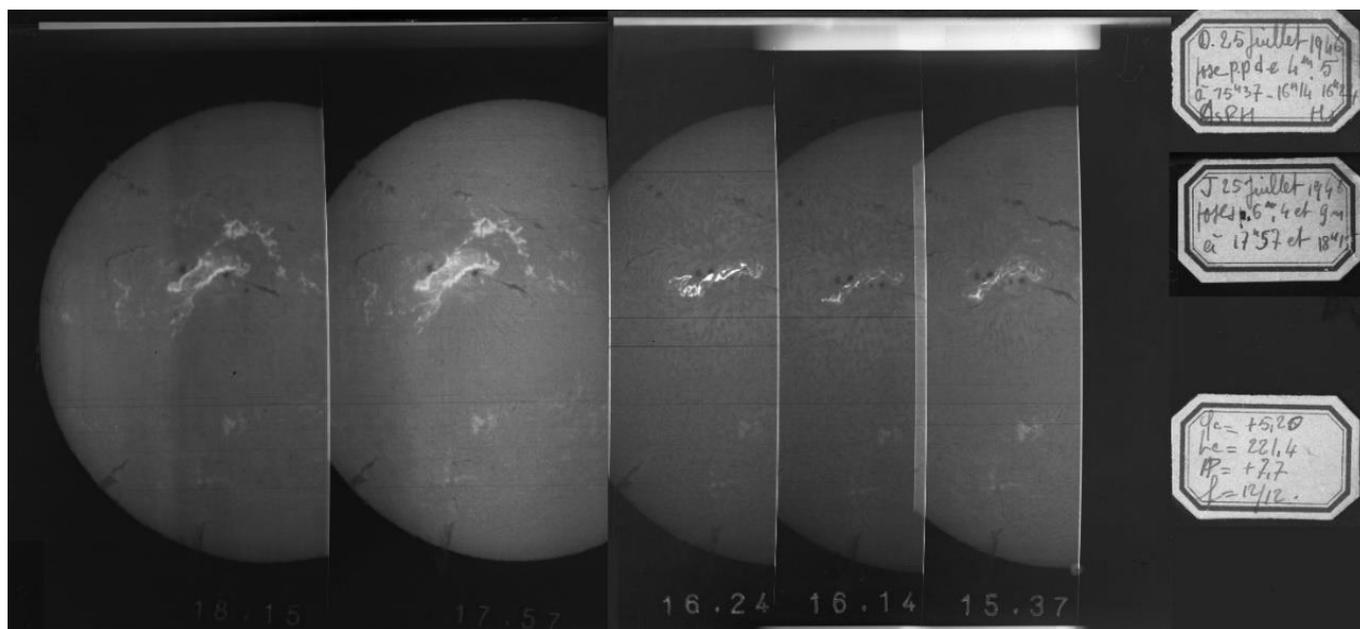


Figure 43. L'éruption solaire en « double filet » du 25 juillet 1946 observée en H α avec le spectrohéliographe (les heures sont, de droite à gauche, 15:37, 16:14, 16:24, 17:57, 18:15 UT). La phase « impulsive » de courte durée (minutes) se produit à 16:14. Deux rubans brillants parallèles (17:57, 18:15) se forment durant la phase « graduelle » de longue durée (heures) et correspondent à l'impact des particules énergétiques sur la chromosphère. Crédit observatoire de Paris.

9 - LE SPECTROHELIOGRAPHE MODERNE (1989 - AUJOURD'HUI)

En 1980, la collection d'observations systématiques était riche de plus de 65000 spectrohéliogrammes, et les deux instruments dédiés (Call K et H α) étaient ceux de 1909, sans modification majeure. Il a été décidé de remplacer progressivement toutes les parties optiques et mécaniques de l'objectif d'imagerie et du spectrographe, qui avaient 70 ans, par des éléments neufs, sous la responsabilité de G. Olivieri. Ce fut une tâche longue et compliquée, car les observations quotidiennes devaient impérativement se poursuivre en même temps. Les principales caractéristiques optiques (comme le diamètre de l'image solaire et les bandes passantes en longueur d'onde) ont été préservées pour assurer la compatibilité avec la collection photographique existante. Les nouvelles caractéristiques sont résumées dans le [Tableau 5](#).

Dans la version de 1989 ([Olivieri, 1989](#)), les trois prismes pour Call K et le réseau plan pour H α ont été remplacés par un seul réseau « blazé » plus dispersif (angle de « blaze » de 17°26', 300 traits/mm), fournissant la raie Call K dans l'ordre d'interférence 5 et la raie H α dans l'ordre 3. L'ancienne chambre (A2), précédemment dédiée à Call K ([Figure 38](#)) n'a été maintenue en activité qu'à des fins de recherche pure. L'autre chambre (A1) fut réservée aux observations systématiques. Les plaques de verre photographiques furent abandonnées au profit de plans films de 13 x 18 cm², au foyer de 3.0 m de la chambre. La bande passante des images resta de 0.15 Å et 0.25 Å, respectivement pour Call K et H α . Les films ont été systématiquement numérisés avec un scanner 12 bits à partir de 1995. À cette date, les spectrohéliogrammes sont devenus librement et immédiatement disponibles pour la communauté solaire internationale et le public grâce au développement (par l'auteur de cet article) de la base de données solaires BASS2000 (<https://bass2000.obspm.fr>). La version de 1989 était prête pour la mise en œuvre d'un capteur digital, un réseau linéaire Reticon de 2048 éléments, mais ce dispositif n'a jamais été installé, car les matrices rectangulaires CCD étaient déjà plus séduisantes.

En 2002, la collection de Meudon contenait au moins 85000 spectrohéliogrammes sous forme de plaques de verre et de films. L'apparition de la version électronique ([Figure 44](#)) a constitué une étape majeure : la deuxième fente (dans le spectre), les plaques photographiques et leur support motorisé, ont disparu, de sorte que l'utilisation des deux chambres (A1) et (A2) fut abandonnée. Elles n'ont été conservées que pour des raisons historiques. Un détecteur CCD (une matrice rétro-éclairée de 1340 x 100 pixels de Princeton Instruments, numérisation 14 bits, pixels carrés de 20 microns, fonctionnant à 1 MHz) a été introduit à l'intérieur du spectrographe, car la distance focale fut réduite de 3.0 m à 0.90 m (le grandissement optique diminuant de 2.31 à 0.69 en raison de la faible taille des pixels du capteur électronique). Il n'y a pas eu de changement concernant le pixel spectral (0.15 Å et 0.25 Å, respectivement pour Call K et H α), mais cinq points ont été enregistrés simultanément dans le cœur des deux raies, et un seul dans l'aile violette de la raie du Calcium. Comme le détecteur n'était pas assez rapide pour enregistrer les

profils complets des raies, les observations du cœur de Call K (K2v, K3, K2r) et de l'aile violette (K1v) n'étaient pas simultanées, mais séquentielles.

La version 2018 (Figure 44) offre des performances exceptionnelles, à la pointe de la technologie (Malherbe et al., 2022), avec des pixels spectraux réduits à 0.093 Å et 0.155 Å, respectivement pour Call K et H α ; les profils complets des raies sont maintenant enregistrés (Figure 45). Le détecteur est une matrice « sCMOS » rapide et à faible bruit de 2048 x 2028 pixels (Fairchild CIS2020 avec pixels carrés de 6.5 microns, numérisation 16 bits, fonctionnant à 100 MHz). La distance focale de la chambre est réduite à 0.40 m (grandissement de 0.31). Comme les deux raies violettes Call H (3968 Å) et Call K (3934 Å) se forment ensemble sur le capteur, nous les enregistrons simultanément. Par conséquent, deux observations seulement sont requises quotidiennement, d'une part pour H α , et d'autre part, pour Call H & K. Une deuxième série est réalisée avec l'atténuateur de disque pour les protubérances avec temps d'exposition plus long.

Tableau 5. Caractéristiques des versions modernes du spectrohéliographe Meudon. BW = bande passante des images monochromatiques. La distance focale du collimateur est de 1.30 m. La colonne de droite indique le nombre de longueurs d'onde simultanées enregistrées le long des profils des raies (pour les détecteurs électroniques uniquement).

Date	Chambre	H α BW	Call K BW	Dispersion de H α	Dispersion Call K	Longueurs d'onde
	(m)	(Å)	(Å)	(Å/mm)	(Å/mm)	(pixels)
1989	3.0	0.25	0.15	3.2	1.9	1
	fente 75 μ m, FILM					
2002	0.9	0.25	0.15	12.5	7.5	5
	CCD 20 μ m					
2018	0.4	0.155	0.093	28.3	14.3	> 100
	sCMOS 6.5 μ m					

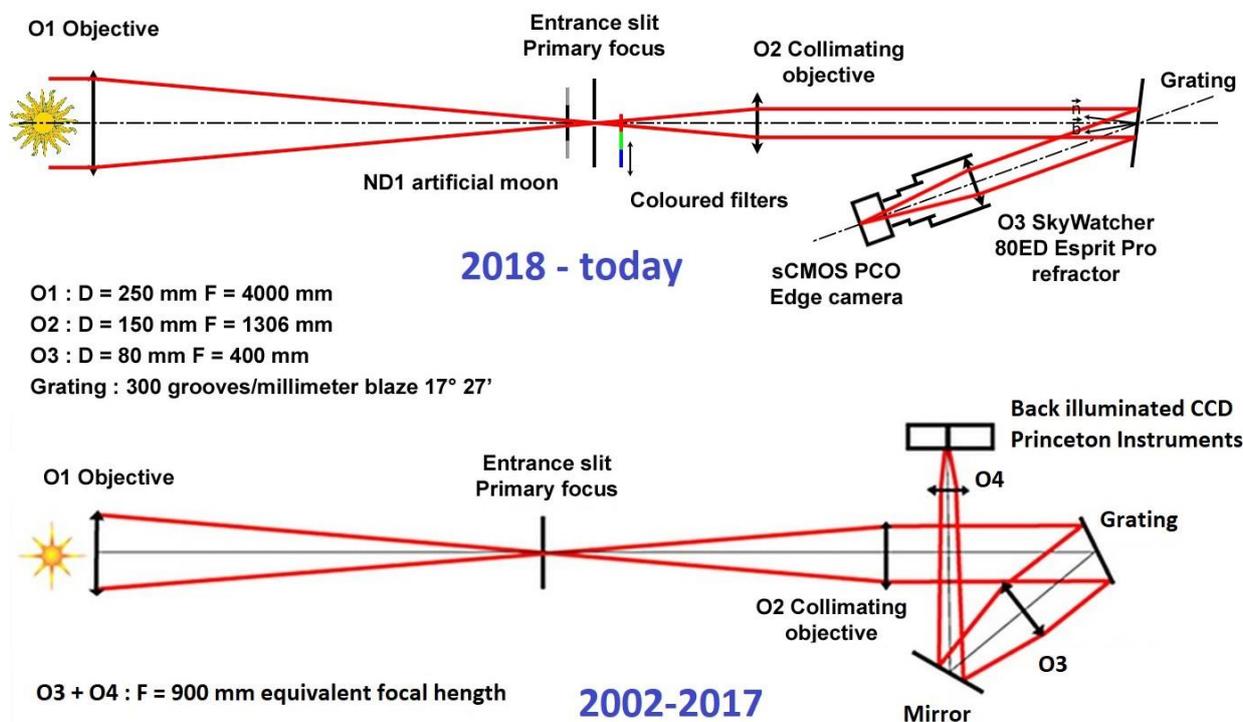


Figure 44. Schémas optiques du spectrohéliographe entre 2002 et 2017 (version CCD, en bas) et depuis 2018 (version sCMOS rapide, en haut). Crédit observatoire de Paris.

L'échantillonnage spectral des versions successives du spectrohéliographe est détaillé sur la [Figure 45](#) et montre combien la version 2018 est améliorée par rapport à l'instrument photographique, grâce au développement des technologies numériques. Nous produisons aujourd'hui des cubes de données avec deux coordonnées spatiales (x, y) sur le Soleil et une coordonnée spectrale (la longueur d'onde le long des profils des raies). Les observations standard génèrent des cubes de données FITS 3D, à partir desquels nous dérivons les images monochromatiques classiques, qui sont des tranches du cube pour une longueur d'onde donnée. Ces tranches assurent la compatibilité avec la collection photographique. Les cubes de données et les images monochromatiques sont disponibles librement en ligne sur la base de données BASS2000 (<https://bass2000.obspm.fr>), au format FITS pour un usage scientifique et au format JPEG pour un examen rapide, avec le Nord solaire vers le haut.

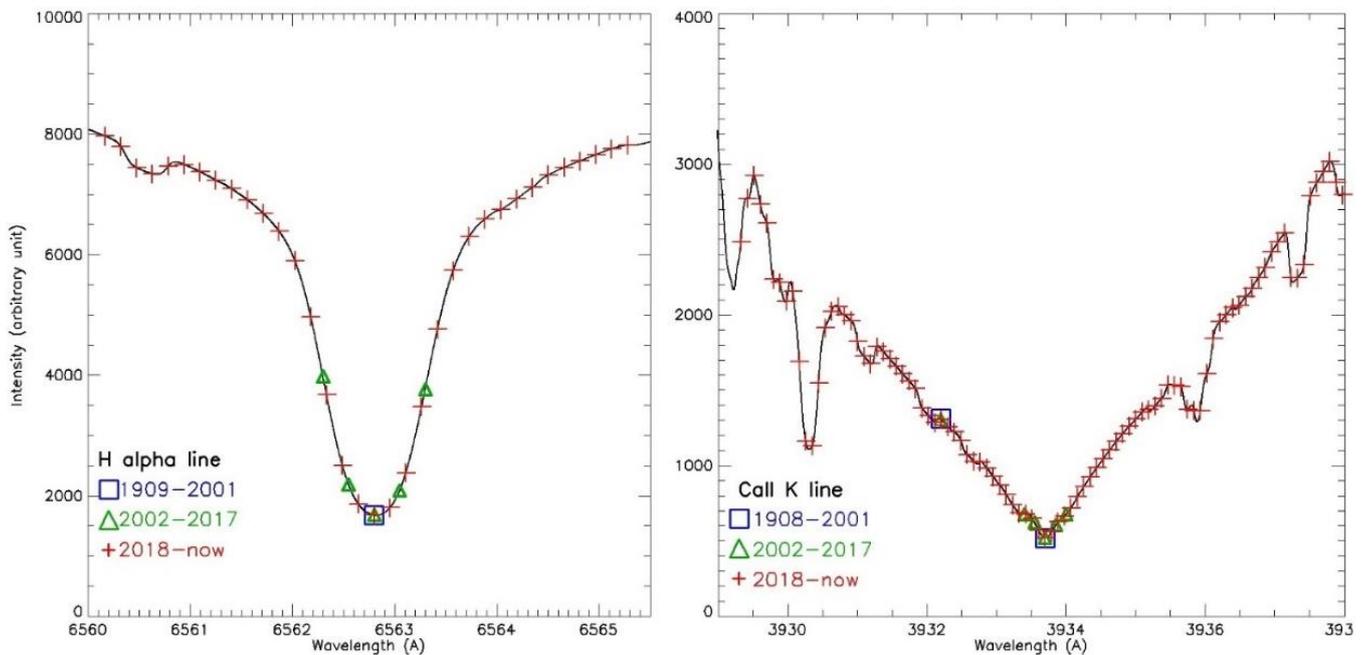


Figure 45. Échantillonnage spectral des versions successives du spectrohéliographe. Longueur d'onde (en Angström) en abscisse. Les profils des raies H α (à gauche) et Call K (à droite) sont affichés. Avant 2001, la plaque photographique ne fournissait que des images monochromatiques, les longueurs d'onde sélectionnées sont indiquées par les carrés **noirs** (cœur de H α et Call K3, plus aile bleue Call K1v). Entre 2002 et 2017, cinq points (triangles **verts**) ont été enregistrés au centre des raies H α et Call K. Depuis 2018, les profils complets sont observés (croix **rouges**) pour les deux raies, plus Call H (non représentée). Crédit observatoire de Paris.

En ce qui concerne la collection photographique depuis 1908, les plaques de verre et les films (au diamètre solaire de 86 mm), pris après 1980, sont disponibles en ligne sur BASS2000, en basse résolution (250 dpi, FITS 12 bits, JPEG 8 bits, 2.25"/pixel). Par contre, les images de la période 1908-1980 ne sont disponibles qu'en JPEG (<https://bass2000.obspm.fr/piwigo/index.php?/category/157>) sous forme de catalogues mensuels. Cependant, quelques observations sporadiques existent depuis 1893. Une deuxième numérisation des plaques est en cours, avec une bien meilleure résolution (600 dpi, FITS 16 bits et JPEG, 0.95"/pixel), mais c'est un processus long qui demande beaucoup de temps aux opérateurs, qui sont aussi les observateurs. Ce deuxième passage au scanner sera achevé dans quelques années (2026) et est optimisé pour la qualité moyenne des images à Meudon (2"). Nous avons également la possibilité, sur demande, d'utiliser un scanner prototype conçu pour les plaques du ciel nocturne (4000 dpi, FITS 16 bits, 0.14"/pixel) en cas de besoins très spécifiques.

CONCLUSION

Les grands télescopes solaires au sol (comme le télescope solaire Dunn, Sacramento Peak ; le télescope Mac Math, Kitt Peak ; la tour à vide, les télescopes GREGOR et THEMIS, îles Canaries ; le télescope géant DKIST, Mauna Loa, Hawaii) et le télescope spatial HINODE (JAXA/NASA) ont des spectrographes à balayage optimisés pour une résolution spatiale très élevée sur des petits champs de vision (1' x 1' typique).

Pour l'étude de l'activité du Soleil et ses applications à la météorologie spatiale, les observations du disque solaire entier (32'), à haute résolution temporelle (1 minute), sont nécessaires. Plusieurs réseaux au sol (comme les sept stations GONG) ont fait le choix de l'imagerie monochromatique avec filtres, sacrifiant l'information spectrale. Par conséquent, les spectrohéliographes ne sont plus très nombreux, en raison de leur cadence d'observation

modérée, malgré la possibilité d'enregistrer les profils complets des raies pour chaque pixel solaire. Cependant, un spectrohélographe compact dédié à la raie H α a été placé en orbite le 14 octobre 2021 par l'administration spatiale chinoise (Chinese H α Solar Explorer, CHASE, <https://ssdc.nju.edu.cn>). Il s'agit de la première mission solaire spatiale de la Chine (Li *et al.*, 2022) et le premier satellite observant le disque entier du Soleil en H α depuis l'orbite (habituellement, les satellites observent la couronne à deux millions de degrés dans les raies ultraviolettes). CHASE offre des performances exceptionnelles en termes de résolution spatiale et spectrale.

La collection Meudon, couvrant 10 cycles solaires, reste extraordinaire pour les reconstructions à long terme de la variabilité solaire et pour l'étude des événements rares. Cependant, l'avenir du spectrohélographe de Meudon est incertain après 2026, en raison des départs à la retraite d'observateurs qui ne seront probablement pas compensés. Et l'instrument est trop complexe pour être automatisé. Pour ces raisons, nous prévoyons d'inclure des amateurs expérimentés dans l'équipe technique. Par ailleurs, les amateurs peuvent désormais construire pour leurs propres besoins des spectrohélographes compacts, comme le SOL'EX (<http://www.astrosurf.com/solex/>), présentant des performances spectroscopiques proches des instruments historiques. Les détecteurs modernes les rendent de plus en plus rapides, annonçant un probable regain d'intérêt pour la spectroscopie dans le cadre de la surveillance solaire internationale, initiée par Hale aux États-Unis, Deslandres et d'Azambuja en France. Pour finir, citons Martres (1996) : « *Tous les astronomes solaires sont les héritiers de ces pionniers, qui ont organisé l'étude internationale de l'activité solaire... La plupart des développements et des résultats des dernières décennies sont basés sur les connaissances décrites par ces chercheurs* ».

MATERIEL EN LIGNE (FIGURES ORIGINALES, DOCUMENTS ET « CLIPS » VIDEO ADDITIONNELS)

Les figures en haute résolution de cet article sont disponibles sous ces deux liens, ainsi que certains documents originaux cités dans les références, et deux « clips » vidéo :

<https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/index.html>

https://drive.google.com/drive/folders/1JIsviojP1hfdIEDQWjjoFOeaECLSXMEv?usp=share_link

REMERCIEMENTS

Cet article est dédié à la mémoire de M.-J. Martres et G. Olivieri, qui ont travaillé respectivement pendant cinq et quinze ans avec M. et L. d'Azambuja, et nous ont transmis le savoir et l'expérience de ces pionniers. L'auteur remercie C. Calderari-Froidefond pour les images de la bibliothèque de l'observatoire de Paris, I. Bualé et F. Cornu pour les spectrohélogrammes et les archives de la collection solaire de Meudon.

NOTES

[1] L'atmosphère solaire. Elle est composée de trois couches : (1) la photosphère (la surface visible, température diminuant de 6000 K à 4500 K en 300 km) avec des taches sombres et des facules brillantes autour, (2) la chromosphère au-dessus (température augmentant de 4500 K à 8000 K en 2000 km) avec des filaments sombres et des plages brillantes (correspondant aux facules de la photosphère), (3) la couronne ionisée et chaude (2 millions de K). La couronne s'étend sur plusieurs millions de kilomètres et donne naissance au vent solaire (particules chargées), qui se propage dans le milieu interplanétaire. La chromosphère et la couronne nécessitent des moyens spectroscopiques pour dévoiler leurs structures, respectivement via des raies d'absorption du spectre visible ou des raies d'émission du spectre ultraviolet. L'atmosphère solaire suit un cycle d'activité de 11 ans et un cycle magnétique de 22 ans. Les éruptions et les éjections de masse coronale se produisent dans les régions actives quelques années autour du maximum solaire ; le maximum du cycle actuel (numéro 25) est prévu pour 2025. Le symbole K ci-dessus (Kelvin) est l'unité de température absolue, liée à la température Celsius par la relation $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$.

[2] La longueur d'onde. Les ondes électromagnétiques, comme la lumière visible, sont collectées par les télescopes. Elles forment un spectre continu (comme l'arc-en-ciel) avec des raies spectrales superposées, révélant la présence d'atomes, d'ions ou de molécules. Dans le spectre visible ou ultraviolet, les raies sont identifiées par leur longueur d'onde, mesurée en nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), mais les spectroscopistes préfèrent souvent l'Angström ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$). Le spectre solaire visible (4000-7000 Å) présente des milliers de raies d'absorption, tandis que les raies d'émission se produisent dans le spectre ultraviolet (longueur d'onde inférieure à 4000 Å) ou au limbe.

[3] Les structures solaires. Les taches sombres sont des régions de champs magnétiques intenses (0.1-0.3 T). Les facules ou les plages brillantes forment, avec les taches solaires, les régions actives et présentent des champs magnétiques modérés (0.01-0.05 T). Les filaments sombres, également appelés protubérances lorsqu'ils sont vus au limbe, sont des structures minces (5000 km) et hautes (50000 km) de matière dense (chromosphérique) suspendue dans la couronne par de faibles champs magnétiques (0.001 T). Le symbole T est l'unité de champ magnétique (Tesla) ; le Gauss (1 G = 10^{-4} T) est également utilisé. Les éruptions se produisent dans les zones de champs instables ; les reconnexion convertissent l'énergie magnétique en énergie cinétique (éjections), en rayonnement (rayons X, UV) et en chaleur (embrillancements).

[4] L'effet Doppler. Lorsqu'une source lumineuse se déplace dans la direction de l'observateur, les raies spectrales sont décalées vers des longueurs d'onde plus courtes (vers le bleu). Au contraire, si la source se déplace dans la direction opposée, les raies sont décalées vers des longueurs d'onde plus longues (vers le rouge). Le décalage Doppler en longueur d'onde $w(\text{Å})$ est proportionnel à la projection V du vecteur vitesse le long de la ligne de visée (on l'appelle aussi vitesse radiale, positive vers l'observateur en physique solaire). On montre que $w = -\lambda (V/C)$, où λ est la longueur d'onde de la raie (Å) et C est la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^5$ km/s).

[5] Capter la lumière solaire. Les astronomes solaires utilisent souvent des héliostats (systèmes optiques à miroirs plans) pour capter la lumière solaire et la réfléchir dans une direction fixe, ce qui permet l'utilisation de télescopes et de spectrographes situés à l'intérieur des laboratoires. Le sidérostol polaire a un seul miroir et réfléchit la lumière dans la direction de l'axe polaire. Le sidérostol de Foucault a aussi un seul miroir, mais sa mécanique est beaucoup plus complexe ; Il réfléchit la lumière solaire dans la direction horizontale. Les coélostats utilisent deux miroirs à mécanique simple. Le miroir primaire tourne autour de l'axe polaire pour suivre le Soleil ; Le miroir secondaire réfléchit la lumière du premier miroir dans une direction fixe (horizontale ou verticale).

[6] L'effet Zeeman. En présence de champs magnétiques, les raies spectrales se divisent en deux composantes (les signaux polarisés circulairement σ^+ et σ^-) par rapport à la position sans champ magnétique. L'écartement Zeeman est $w(\text{Å}) = \pm 4,67 \cdot 10^{-13} g \lambda^2 B$, où g est le facteur de Landé, λ la longueur d'onde de la raie (Å) et B (Gauss) la projection du vecteur champ magnétique le long de la ligne de visée. Cet effet a été découvert en laboratoire par P. Zeeman en 1896 et reconnu dans les taches solaires par G. Hale en 1908. g est un facteur de mécanique quantique. Les raies avec $g = 0$ sont insensibles au champ magnétique. De nombreuses raies du fer (g dans la gamme 2-3) permettent de mesurer le champ magnétique photosphérique, et certaines raies de Fraunhofer (comme le Calcium) fournissent le champ chromosphérique. Les champs coronaux sont 100 fois plus faibles que ceux des taches ou des facules, et difficiles à mesurer ; c'est l'un des défis du télescope géant DKIST à Hawaii (USA).

[7] L'effet Hanle. L'effet Zeeman est insensible aux champs magnétiques non résolus et turbulents. Cependant, un éclairage anisotrope des atomes crée, par diffusion, des faisceaux lumineux polarisés linéairement, et c'est le cas près du limbe solaire. En présence de faibles champs magnétiques turbulents, W. Hanle a découvert en 1924 qu'il existe une dépolarisation et une rotation de la direction de polarisation, en fonction de l'intensité du champ.

REFERENCES (ORDRE ALPHABETIQUE)

G. Aulanier, P. Démoulin, C.J. Schrijver, M. Janvier, E. Pariat and B. Schmieder, **2013**, "The standard flare model in three dimensions – II – Upper limit on solar flare energy", *Astrophysical Journal*, 549, A66.

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

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

L. d'Azambuja, **1921**, "Sur un mode de représentation graphique des filaments de la couche supérieure de la chromosphère solaire", *Compte Rendus Académie des Sciences*, 173, 1450-1452.

L. d'Azambuja and H. Grenat, **1926**, "Une grande éruption solaire suivie d'un orage magnétique et d'une aurore boréale", *L'Astronomie*, 40, 489-491.

- L. d'Azambuja, **1928**, "Cartes synoptiques de la chromosphère solaire et catalogues des filaments de la couche supérieure". *Annales de l'Observatoire de Paris, section de Meudon*, tome 6, fascicule 1, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6538205g>
- L. d'Azambuja, **1930**, "Recherches sur la structure de la chromosphère solaire", thèse de Doctorat ès Sciences, *Annales de l'Observatoire de Paris, section d'astrophysique, à Meudon*, volume 8, fascicule 2, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537953n>
- L. d'Azambuja and M. d'Azambuja, **1938**, "Images Nouvelles de la chromosphère solaire obtenues au spectrohéliographe avec la raie infrarouge de l'hélium 10830 et avec la raie H ϵ de l'hydrogène", *Bulletin Astronomique*, 11, 349-359.
- L. d'Azambuja, **1939**, "La coopération internationale pour l'observation continue du Soleil et ses premiers résultats", *L'Astronomie*, 53, 97-121.
- L. d'Azambuja, **1948**, "Henri deslandres (1853-1948)", *L'Astronomie*, 62, 179-184.
- L. d'Azambuja and M.d'Azambuja, **1948**, "Etude d'ensemble des protubérances solaires et de leur évolution, effectuée à l'aide des spectrohéliogrammes de Meudon et des cartes synoptiques publiées par l'établissement sous l'égide de l'UAI", *Annales de l'Observatoire de Paris, section d'astrophysique, à Meudon*, volume 6, fascicule 7, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65382116>
- L. d'Azambuja, **1949**, "Les informations rapides sur l'activité solaire par messages ursigrammes radiodiffusés", *L'Astronomie*, 63, 241-252.
- L. d'Azambuja, **1967**, "Letter to Raymond Michard", *Archives of the Meudon solar service*, on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Congres1907.pdf>
- M. d'Azambuja, **1980**, "Memoirs", *Archives of the Meudon solar service*, on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Dazambuja1980.pdf>
- T. Chatzistergos, I. Ermolli, N. A. Krivova, S. K. Solanki, D. Banerjee, T. Barata, M. Belik, R. Gafeira, A. Garcia, Y. Hanaoka, M. Hegde, J. Klimes, V. V. Korokhin, A. Lourenco, J.-M. Malherbe, G. P. Marchenko, N. Peixinho, T. Sakurai and A. G. Tlatov, **2020**, "Analysis of full-disc Ca II K spectroheliograms. III. Plage area composite series covering 1892-2019", *Astronomy Astrophysics*, 639, A88.
- T. Chatzistergos, N. A. Krivova, I. Ermolli, K. L. Yeo, S. Mandal, S. K. Solanki, G. Kopp and J.-M. Malherbe, **2021**, "Reconstructing solar irradiance from historical Ca II K observations. I. Method and its validation", *Astronomy Astrophysics*, 656, A104.
- T. Chatzistergos, I. Ermolli, N. A. Krivova, T. Barata, S. Carvalho and J.-M. Malherbe, **2022**, "Scrutinizing the relationship between plage areas and sunspot areas and numbers", *Astronomy Astrophysics*, in press and *ArXiv* 2209.07077.
- L. Delbouille, G. Roland and L. Neven, **1973**, "Atlas photométrique du spectre solaire de $[\lambda] 3000$ à $[\lambda] 10000$ ". *Université de Liège, Institut d'Astrophysique*. On-line at Observatoire de Paris.
https://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php
- H. Deslandres, **1894a**, "Appareils enregistreurs de l'atmosphère solaire", *L'Astronomie*, 13, 210-218.
- H. Deslandres, **1894b**, "Sur l'enregistrement de la chromosphère et de la photosphère du soleil par la méthode des sections successives", *Bulletin Astronomique*, 11, 425-426.
- H. Deslandres, **1905a**, "Recherches sur l'atmosphère solaire et appareils enregistreurs des couches de vapeurs superposées qui la composent", *Bulletin Astronomique*, 22, 305-334.
- H. Deslandres, **1905b**, "Recherches sur l'atmosphère solaire et appareils enregistreurs des couches de vapeurs superposées qui la composent", *Bulletin Astronomique*, 22, 337-376.

- H. Deslandres, **1907a**, "Enregistrement de la surface et de l'atmosphère solaire à l'observatoire de Meudon", *Bulletin Astronomique*, 24, 433-444.
- H. Deslandres, **1907b**, "Description of the new coelostat and laboratory of the quadruple spectroheliograph", *Archives of the Meudon solar service*, original notebook on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Deslandres1907.pdf>
- H. Deslandres, **1910**, "Recherches sur l'atmosphère solaire. Photographie des couches gazeuses supérieures. Etude simultanée des formes et des mouvements des vapeurs". *Annales de l'Observatoire d'Astronomie Physique de Paris, sis parc de Meudon*, tome 4, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65373577>
- H. Deslandres, **1924**, "Rapport sur l'observatoire d'astronomie physique de Meudon". On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6538734x>
- A. Dollfus, **2003a**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche. A l'observatoire de Paris 1891-1897", *L'Astronomie*, 117, 69.
- A. Dollfus, **2003b**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche. A l'observatoire de Paris (suite)", *L'Astronomie*, 117, 149.
- A. Dollfus, **2005**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche à l'observatoire de Meudon 1898-1908", *L'Astronomie*, vol 119, 150.
- I. Ermolli, T. Chatzistergos, N. A. Krivova and S. Solanki, **2018**, "The potential of Call K observations for solar activity and variability studies", *Proceedings of IAU Symposium 340*, 115-120.
- G. Hale, **1906a**, "Some tests of the Snow telescope", *Astrophysical Journal*, 23, 6-10.
- G. Hale, **1906b**, "The five-foot spectroheliograph of the solar observatory", *Astrophysical Journal*, 23, 54-63.
- G. Hale, **1908**, "On the probable existence of a magnetic field in sunspots", *Astrophysical Journal*, 28, 315-343.
- G. Hale and S. Nicholson, **1925**, "The law of sunspot polarity", *Astrophysical Journal*, 62, 270-300.
- G. Hale, **1929**, "The spectrohelioscope and its work. Part 1. History, instruments, adjustments, methods of observation", *Astrophysical Journal*, 70, 265-311.
- G. Hale, **1930**, "The spectrohelioscope and its work. Part 2. The motion of the hydrogen flocculi near sunspots", *Astrophysical Journal*, 71, 73-101.
- G. Hale, **1931a**, "The spectrohelioscope and its work. Part 3. Solar eruptions and their apparent terrestrial effects", *Astrophysical Journal*, 73, 379-412.
- G. Hale, **1931b**, "The spectrohelioscope and its work. Part 4. Methods of recording observations", *Astrophysical Journal*, 74, 214-222.
- E. Illarionov and R. Arlt, **2022**, "Reconstruction of the Solar Activity from the Catalogs of the Zürich Observatory", *Solar Physics*, 297, 79.
- J. Janssen, **1869a**, "Sur l'étude spectrale des protubérances solaires", *Comptes Rendus Académie des Sciences*, 68, 95.
- J. Janssen, **1869b**, "Sur la méthode qui permet de constater la matière protubérantielle sur tout le contour du disque solaire", *Comptes Rendus Académie des Sciences*, 68, 713.
- J. Janssen, **1969c**, "Méthode pour obtenir des images monochromatiques des corps lumineux", *British Association for the Advancement of Science*, 39, 23.
- J. Janssen, **1896**, *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, volume 1, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537478r>

- J. Janssen, **1903**, "Atlas de photographies solaires", special issue of *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Observatoire de Paris.
<https://bibnum.obspm.fr/ark:/11287/1MCjG>
- J. Janssen, **1906**, *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, volume 2 (1906), Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537575v>
- M. Laffineur and J. Houtgast, **1949**, "Observations du rayonnement solaire sur la longueur d'onde de 55 cm", *Annales d'Asprophysique*, 12, 137-147.
- R. Le Cocquen and F. Launay, **2005**, "La lunette de photographie solaire Janssen", *L'Astronomie*, 119, 75.
- J. Lequeux, **2022a**, "Henri Deslandres (1853-1948), from molecular to solar physics", *Journal of Astronomical History and Heritage*, 25, in press.
- J. Lequeux, **2022b**, "Life at Meudon Observatory, 1876-1963", *Journal of Astronomical History and Heritage*, 25, 171-186.
- C. Li, C. Fang, Z. Li and 32 co-authors, **2022**, "The Chinese HAlpha Solar Explorer (CHASE) mission: an overview", *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 65, 289602 and arXiv:2205.05962.
- B. Lyot, **1944**, "Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire", *Annales d'Astrophysique*, 7, 31.
- J.-M. Malherbe, **2022**, "Janssen, the birth of Solar Physics, the foundation of Meudon observatory and the Mont Blanc adventure (1875-1895)", *Journal of Astronomical History and Heritage*, 25, 187-207.
- J.-M. Malherbe, I. Bualé, F. Cornu, D. Crussaire and T. Corbard, **2022**, "The potential of Meudon spectroheliograph for investigation long term solar activity and variability", *Advances in Space Research*, in press, on-line at <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.058>
- M.-J. Martres, **1991**, "Marguerite d'Azambuja", *Archives of the Meudon solar service*, on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Martres1991.pdf>
- M.-J. Martres, **1996**, "Lucien d'Azambuja ou l'histoire des protubérances solaires à Meudon", *Archives of the Meudon solar service*, on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Martres1996.pdf>
- M.-J. Martres, **1998**, "Lucien d'Azambuja", *IAU Symposium 167, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 150, 2-10.
- R. R. McMath and R. M. Petrie, **1934**, "The spectroheliokinematograph", *Publications of Michigan Observatory*, 5, 103-117.
- R. Michard and J. Rayrole, J., **1965**, "Observations systématiques des champs magnétiques des centres d'activité à l'observatoire de Meudon", *IAU Symposium 22, North-Holland Pub. Co.*, 22, 169.
- G. Millochou and M. Stefanik, **1906**, "On a new form of spectroheliograph", *Astrophysical Journal*, 24, 42-45.
- G. Olivieri, **1989**, "Caractéristiques du nouveau spectrohélographe", *Archives of the Meudon solar service*. On-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Olivieri1989.pdf>
- G. Olivieri, **1993**, "L'Observatoire de Meudon après la guerre (1945-1950)", *Archives of the Meudon solar service*, on-line at <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/spectroheliograms/Olivieri1993.pdf>
- P. Ré, **2014**, "The Spectroheliograph and the Spectrohelioscope". *Astronomia de Amadores*, 46, 29-39

J. Rösch, **1970**, "Lucien d'Azambuja (1884-1970)", *Solar Physics*, 15, 261-264.

B. Schmieder, **2018**, "Extreme solar storms based on solar magnetic field", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, 180, 46-51.

L'AUTEUR



Jean-Marie Malherbe, né en 1956, est astronome à l'observatoire de Paris-Meudon. Il a obtenu les diplômes de « Docteur de 3^{ème} cycle en astrophysique » en 1983 et de « Docteur d'Etat ès Sciences » en 1987. Il a d'abord travaillé sur les filaments solaires et les protubérances en exploitant des observations multi-longueurs d'onde. Il a utilisé les spectrographes de la tour solaire de Meudon, de la coupole tourelle du Pic du Midi, du Vacuum Tower Telescope et de THEMIS (Tenerife), et a développé des polarimètres. Il a proposé des modèles et des simulations numériques MHD 2D pour la formation des protubérances, en incluant l'interaction entre le refroidissement radiatif et la reconnexion magnétique. Plus récemment, il a travaillé sur le Soleil calme, en utilisant des résultats de simulations MHD 3D et les instruments HINODE (JAXA), IRIS (NASA). Il est responsable scientifique du spectrohéliographe Meudon depuis 1996.