

Trente ans d'observations solaires à la station scientifique internationale du Jungfraujoch (Suisse)

Marcel Migeotte

Citer ce document / Cite this document :

Migeotte Marcel. Trente ans d'observations solaires à la station scientifique internationale du Jungfraujoch (Suisse). In: Bulletin de la Classe des sciences, tome 67, 1981. pp. 986-1014;

doi : <https://doi.org/10.3406/barb.1981.57179>

https://www.persee.fr/doc/barb_0001-4141_1981_num_67_1_57179

Fichier pdf généré le 05/06/2020

DISCOURS

Trente ans d'observations solaires à la Station Scientifique Internationale du Jungfrauoch (Suisse)

par MARCEL MIGEOTTE
Directeur de la Classe et Président de l'Académie

En 1933, à la fin de nos études en sciences physiques et mathématiques à l'Université de Liège, le professeur P. SWINGS attira notre attention sur l'intérêt de l'étude du spectre solaire et sur l'importance qu'il y aurait à observer, avec un pouvoir de résolution élevé, ce spectre dans l'infrarouge aux longueurs d'onde supérieures à la limite de sensibilité des émulsions photographiques (1,3 micromètres).

Suivant ses conseils, nous avons tout d'abord obtenu le diplôme d'ingénieur opticien à l'Institut d'Optique de Paris (1933-1934), puis nous nous sommes spécialisé en spectroscopie infrarouge, en travaillant pendant dix mois (1934-1935) à l'Université de Michigan (E.-U.) dans les laboratoires des professeurs H.M. RANDALL et E.F. BAKER.

Rentrés en Belgique, nous avons établi les plans et fait construire par la firme Kipp en Zonen de Delft (Hollande), un spectrographe prisme-réseau, auto-enregistreur, en vue d'observer le spectre solaire entre 1 et 25 μm .

Cet appareil fut installé à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège en 1942, où nous l'avons utilisé, pour observer le soleil, de juillet 1942 à janvier 1944.

La fig. 1 reproduit une photographie de l'instrument, datant de cette époque. Celui-ci comprenait essentiellement un monochromateur à prisme suivi d'un spectrographe à réseau, pour lequel nous avons choisi un dispositif optique de Pfund, les deux miroirs paraboliques (vus de dos sur la photo) ayant 24 cm de diamètre et 1 mètre de distance focale.

Une description détaillée de l'instrument, son étude, ainsi que les résultats obtenus entre 1,34 et 1,52 μm ont fait l'objet de notre thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur, parue en 1945 [1].

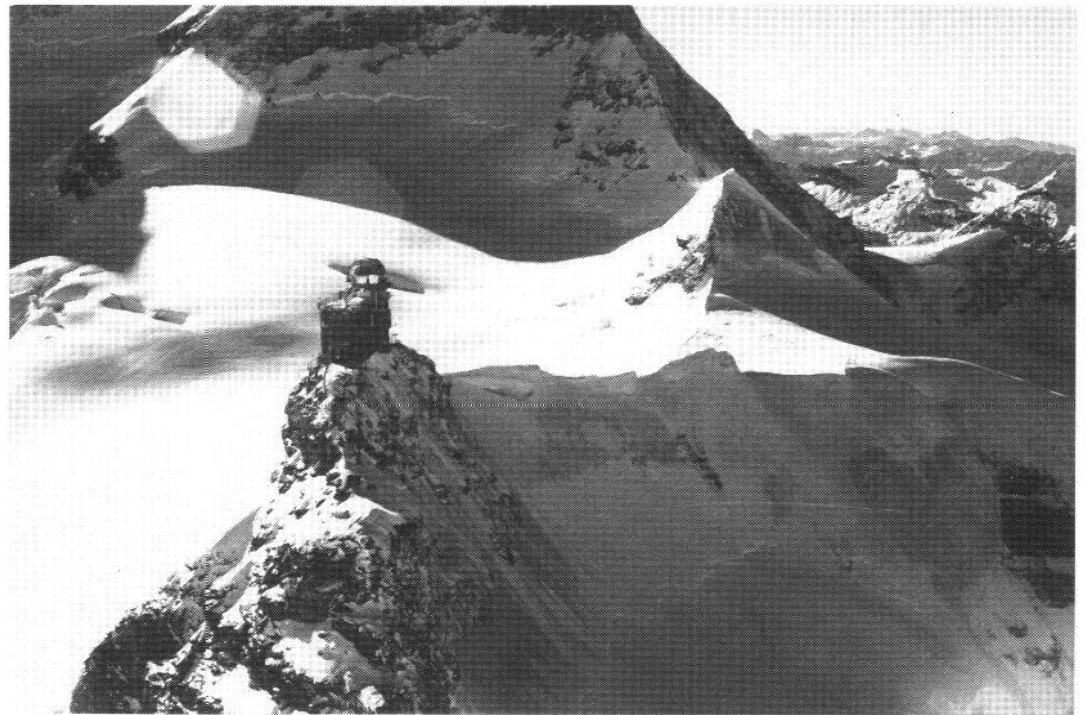
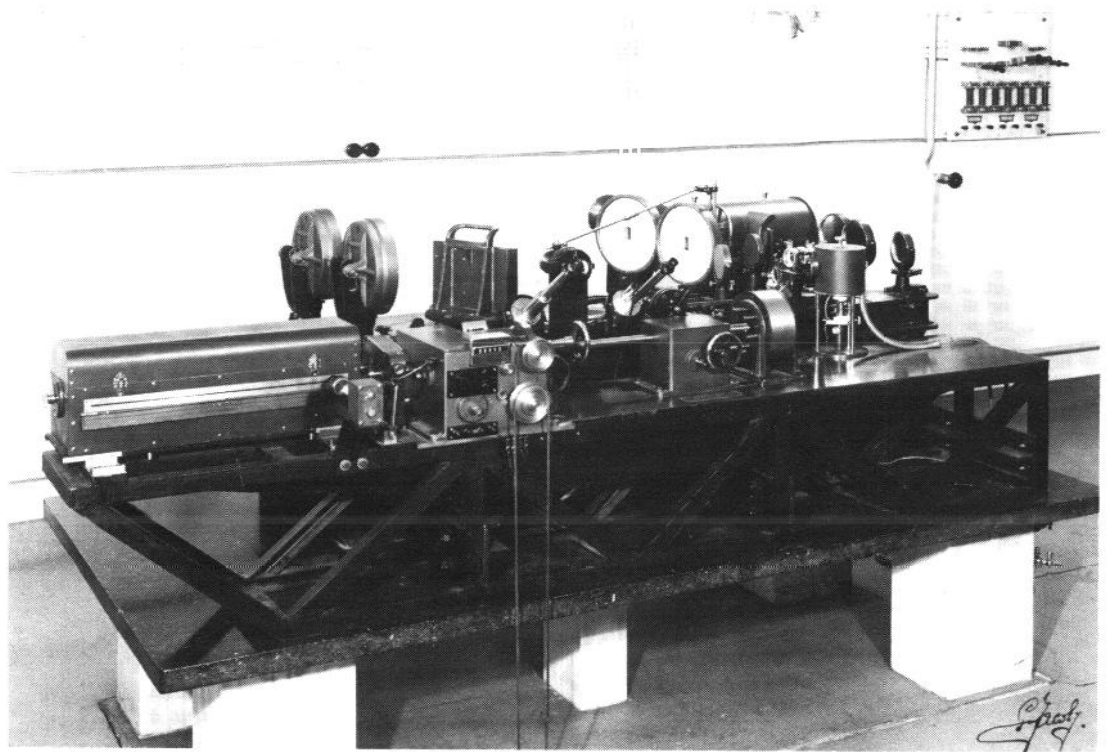


FIG. 1. — Le spectromètre prisme-réseau utilisé au Jungfrauoch en 1950 et 1951.

FIG. 2. — L'Observatoire du Sphinx (altitude : 3580 mètres).

En 1947-1948, un séjour de 14 mois à l'Université de l'État d'Ohio (Columbus, Ohio, U.S.A.), dans le département du professeur H. H. NIELSEN, nous permit de nous mettre au courant des progrès réalisés aux États-Unis pendant la guerre 1940-1945 dans la détection du rayonnement infrarouge.

Rentré en Belgique, à la fin de 1948, nous avons remplacé, dans l'installation de Liège, le galvanomètre et l'enregistrement sur papier photographique par un dispositif plus moderne permettant d'éliminer la légère dérive du spot galvanométrique. Le système consistait à interrompre le faisceau lumineux entrant dans le spectrographe, à une fréquence choisie (au début 5 cycles par sec, ensuite 13 cycles par sec) et à relier le détecteur à un enregistreur à plume, par l'intermédiaire d'un amplificateur accordable.

L'instrument ainsi amélioré fut expédié de Liège en décembre 1949 pour être installé en Suisse, à l'Observatoire du Sphinx (fig. 2). Celui-ci est situé à 3580 m d'altitude, dans l'Oberland bernois. C'est une dépendance de la Station Scientifique Internationale du Jungfrauoch, à laquelle il est relié par un ascenseur et un tunnel.

C'est encore P. Swings qui, le premier, nous conseilla de placer au Sphinx le spectrographe de Liège. Nous y avons aussi été très encouragé par D. CHALONGE, astronome à l'Observatoire de Paris et un des fondateurs, en 1936, de l'Institut d'Astrophysique de Paris. Ayant installé, dès 1928, un petit télescope sur la terrasse d'un hôtel existant alors au Jungfrauoch, D. Chalonge se rendit compte des qualités exceptionnelles de cet endroit, pour des observations astronomiques. Il fut le pionnier des observations en haute montagne et en particulier au Sphinx, où il effectua de très nombreuses missions scientifiques, à partir de 1935, pendant une quarantaine d'années, avec plusieurs observateurs de l'Institut d'Astrophysique de Paris.

La cordialité et l'enthousiasme de D. Chalonge furent particulièrement précieux lors de nos séjours au Jungfrauoch en 1950 et 1951.

Le transfert du spectrographe infrarouge de Liège ainsi que les observations envisagées ont pu s'effectuer grâce à un premier crédit de 75.000 F, accordé par J. WILLEMS, alors président du F.N.R.S. et Membre du Conseil de Fondation de la Station Scientifique Internationale du Jungfrauoch, depuis 1931, ce Conseil ayant été fondé en 1930.

L'observation à haute altitude du soleil entre 1 et 25 μm se justifie par la présence dans cette région spectrale de nombreuses bandes d'absorption, dues à des molécules présentes dans l'atmosphère terrestre. Heureusement, l'abondance de ces molécules (excepté pour O_3) diminue rapidement avec l'altitude. L'absorption par la vapeur d'eau étant la plus gênante, il est intéressant de noter les renseignements suivants, publiés en 1981, par L. DELBOUILLE⁽¹⁾ et G. ROLAND⁽²⁾, dans une brochure [2] éditée à l'occasion du 50^e anniversaire de la fondation de la Station du Jungfraujoch :

« En moyenne, par temps clair, sans nuage, la quantité d'eau présente sous forme de vapeur au-dessus d'un observateur placé au niveau de la mer dans une région tempérée, fournirait, ramenée à l'état liquide, une couche d'environ 5 cm d'épaisseur. Cette « quantité d'eau précipitable » diminue rapidement lorsqu'on s'élève. Elle n'est plus, par exemple, que de l'ordre de 1 cm à 2000 mètres d'altitude, pour descendre à quelques millimètres, en moyenne, vers 3500 mètres... L'atmosphère au-dessus du Jungfraujoch est, en fait, nettement plus sèche que ce que l'on pouvait prévoir en tenant compte de l'altitude seulement. Cela doit s'expliquer par la présence, juste au sud de la Station, d'une grande région couverte en permanence par des glaciers. Récemment, par certaines journées exceptionnelles, très froides, on a pu mesurer des quantités d'eau précipitable aussi faibles que 0,25 mm ».

Le spectrographe de Liège fut installé et réglé au Sphinx en janvier 1950, en collaboration avec L. NEVEN, astronome à l'Observatoire Royal de Belgique, et avec l'aide de F. DENOZ, technicien à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège. Nos observations avec L. Neven se sont poursuivies pendant quatorze mois en 1950 et en 1951. Dès le début de notre séjour, nous avons eu la satisfaction de réobserver, dans de meilleures conditions atmosphériques, des bandes de CO et de CH_4 [3-4], découvertes par l'un d'entre nous lors d'un séjour à Columbus (U.S.A.) en 1948 [5-6].

Nous avons pu aussi nous rendre compte, directement sur les spectres, de la très grande diminution de l'intensité des bandes d'absorption de la plupart des molécules telluriques, en particulier de

(1) Professeur associé à l'Université de Liège.

(2) Maître de conférences à l'Université de Liège.

H₂O. Cette diminution a été constatée, non seulement par rapport à des observations effectuées à Columbus situé à basse altitude [7-8], mais aussi par rapport à des spectres enregistrés au Mt Wilson (E.-U.), situé à une altitude de 1740 m [9]. En fait, le professeur O. MOHLER nous a signalé que l'intensité des raies de vapeur d'eau, observées au Jungfraujoch pendant les journées les plus humides, ne se retrouvait que quelques jours par an, au Mt Wilson, pendant les journées les plus sèches.

Notons qu'un atlas du spectre solaire, observé à grande dispersion entre 8645 Å et 25242 Å, avait été publié par différents chercheurs américains en 1950 [10]. De 2,52 µm à 2,80 µm, le rayonnement solaire est totalement absorbé, même au Jungfraujoch, par la vapeur d'eau. Il en est de même, à partir de 23,7 µm, vers les grandes longueurs d'onde. Ceci justifie le fait que nos observations en 1950 et 1951 ont été effectuées entre 2,8 et 23,7 µm.

Nos meilleurs spectres ont été publiés sous forme d'un atlas [11] sorti de presse en 1956. Son édition a été, en partie, réalisée grâce à un crédit de l'« European Office of Aerospace Research and Development — United States Air Force ». Il nous a donné aussi la possibilité d'engager un scientifique américain, J. SWENSSON, ancien élève de P. Swings, qui nous a, tout d'abord, facilité l'édition de l'atlas en question. De plus, son aide nous a été particulièrement précieuse pour la mesure des longueurs d'onde des 3624 raies observées, ainsi que pour leur identification, travail auquel a aussi collaboré W.S. BENEDICT (Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, U.S.A.). Les résultats ont paru en 1957 [12]. L'analyse rotationnelle de la bande d'ozone tellurique, centrée à 9,6 microns, a été effectuée par L.D. KAPLAN, chercheur à « The Institute for Advanced Study, Princeton, N.J., (U.S.A.) » [13].

D'autres collègues américains ont participé à nos travaux, lors de séjours d'un an à Liège : en 1951-1952, A.H. NIELSEN, professeur à l'Université du Tennessee, Knoxville (Tenn.), qui a observé au Jungfraujoch ; en 1952-1953, W. BENESCH, chercheur à l'Université Johns Hopkins.

En plus de la publication déjà signalée avec A.H. Nielsen [9], nous mentionnerons, avec le même auteur, la détermination de l'abondance et de la distribution verticale du méthane tellurique au-dessus du Jungfraujoch [14].

Avec W. Benesh, des résultats ont été publiés sur le CO et le N₂O telluriques [15-16-17].

Notons aussi une collaboration avec C. de JAGER, de l'Observatoire d'Utrecht (Hollande), sur le profil de la raie Brackett Alpha de l'hydrogène (4 μm), observée dans le spectre solaire [18].

En vue de l'identification des nombreuses raies telluriques observées pour la première fois, nous avons été amenés à enregistrer en laboratoire, avec le même spectrographe, la structure fine de plusieurs bandes de CH₄, de N₂O et de O₃.

La préparation d'ozone sous forme de vapeur étant très dangereuse, D. Chalonge nous a conseillé de faire appel à la grande expérience acquise à ce sujet par E. VIGROUX de l'Institut d'Astrophysique de Paris. Celui-ci ayant accepté de se rendre au Jungfraujoch, il en est résulté une efficace collaboration qui a conduit à observer, pour la première fois, la structure fine de plusieurs bandes d'ozone.

Nos résultats concernant N₂O, CH₄ et O₃ ont fait l'objet de plusieurs publications, en particulier d'un atlas photométrique des spectres et d'un volume consacré aux mesures des longueurs d'onde des raies, parus respectivement en 1957 [19] et 1958 [20].

Le spectrographe que nous avons installé au Sphinx a été réexpédié à Liège en 1953.

Espérant que d'importants crédits seraient attribués en prévision de la participation de la Belgique à l'Année Géophysique Internationale (AGI) de 1958, nous avons envisagé, dès 1954, de faire construire un nouveau spectrographe, en vue d'observations au Sphinx à des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm, étant donné que des raies de H₂O sont présentes dans le spectre solaire entre 0,5 et 2,5 μm et que des observations au-dessus de 1740 m n'avaient jamais été effectuées dans cette région spectrale.

La conception de la nouvelle installation fut heureusement influencée par une visite à l'Observatoire McMath (Michigan, U.S.A.) où nous avons été reçu par le professeur O. MOHLER, ainsi que par une visite des laboratoires de l'Université Johns Hopkins (Baltimore, Maryland, U.S.A.) où nous avons eu d'utiles discussions avec le professeur J. STRONG ainsi qu'avec W.G. FASTIE.

Notons que, dans un spectromètre, le réseau tourne habituellement suivant un axe vertical et que cette rotation doit s'effectuer très facilement et très régulièrement à différentes vitesses. Pour atteindre ce but,

J. Strong nous conseilla de prévoir, dans le dispositif de support du réseau, deux roulements à billes de précision d'assez grandes dimensions (par ex. 20 et 10 cm de diamètre) distants l'un de l'autre d'environ 50 cm, le roulement supérieur ayant le plus grand diamètre, ces roulements travaillant sous une contrainte constante. Nous avons suivi ce conseil, qui s'est avéré très judicieux. Sans aucune difficulté, des spectres ont été enregistrés en balayage très lent ou très rapide, celui-ci étant utilisé dans la technique moderne d'observation. Nous reviendrons plus loin sur cette question.

Le premier spectrographe occupait environ la moitié de l'unique laboratoire du Sphinx (dimensions : 11 m × 3 m). Ayant eu l'audace de prévoir que la nouvelle installation occuperait tout le laboratoire, nous avons averti le professeur de MURALT, Directeur de la Station Scientifique et Président du Conseil de Fondation. Prévoyant l'avenir, celui-ci fit admettre par ce Conseil la construction d'un deuxième étage au Sphinx, qui fut réalisée en 1956.

La même année, pendant les travaux au Sphinx, un nouveau coelostat offert par le F.N.R.S. belge à la Station Scientifique fut placé sur une plateforme d'un bâtiment de cette Station, en vue d'observations solaires dans la région submillimétrique. Il s'agit d'un instrument semblable à celui que nous avons utilisé en 1950 et 1951. Le nouvel appareil a été construit par la firme MERCANTIL d'Anvers. Nous l'avons installé et mis au point, avec l'aide de L. Delbouille, alors assistant à l'Université de Liège et de F. Denooz. Il a été immédiatement utilisé par un chercheur écossais, H.A. GEBBIE, pour envoyer un faisceau de rayons solaires dans un interféromètre, qui nous avait été prêté par le professeur J. Strong. Grâce à cet équipement, H.A. Gebbie parvint à observer, pour la première fois, en février et mars 1957, le spectre solaire entre 0,3 et 1 mm, avec un pouvoir de résolution de $0,2 \text{ cm}^{-1}$. Ce résultat révéla que, par temps très sec, des radiations solaires atteignent le Jungfraujoch dans cette région spectrale. Les raies d'absorption observées pourraient être dues à H_2O et à O_3 [21].

Le Comité belge de l'AGI nous ayant accordé en 1956 un crédit de 1.750.000 F, la construction du nouveau spectrographe précédé d'un grand télescope fut confiée à la firme GARDIER de Sclessin (env. de Liège), qui nous donna entière satisfaction.

En juin 1957, L. Delbouille et F. Denooz installèrent le coelostat sur la plateforme surmontant le deuxième étage du Sphinx, une « cheminée » située sous l'appareil ayant été construite pour permettre d'observer le soleil, dans les laboratoires du premier et du deuxième étages.

Le Conseil de Fondation de la Station ayant permis à l'équipe belge d'occuper tout le premier étage à partir de septembre 1957, cette heureuse décision fut alors mise à profit par L. Delbouille et F. Denooz pour y placer le grand télescope horizontal dont il sera question plus loin.

L. Delbouille profita aussi de ce séjour pour installer le dispositif électronique automatique du coelostat qu'il avait conçu et mis au point à Liège. Ce perfectionnement assure, à moins de 0,1 mm, une stabilité de l'image solaire qui a 11,5 cm de diamètre.

C'est en février 1958 que le grand spectromètre fut installé au Sphinx par L. Delbouille, aidé très efficacement par P. CREMERS et F. DENOZ, tous deux techniciens à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, ainsi que par H. WIEDERKEHR, technicien et gardien de la Station Scientifique.

De septembre 1958 à septembre 1959, L. Delbouille et G. Roland, alors assistante à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, ont effectué pendant 7 mois des observations avec la nouvelle installation, ce qui leur a donné la possibilité de couvrir le domaine spectral compris entre 7500 Å (0,75 µm) et 12000 Å (1,2 µm). Nous avons alors participé pendant deux mois à ces observations, ce qui nous a permis de nous rendre compte que nos espoirs étaient pleinement justifiés [22].

La même région spectrale a ensuite été réenregistrée plusieurs fois en 1960 et 1961, par L. Delbouille et G. Roland. Les meilleurs spectres ont été publiés en 1963, sous forme d'un atlas (album 30 × 60 cm de 110 pages), le texte introductif décrivant en détail l'installation utilisée [23].

Notons qu'entre 7498 Å et 12016 Å, les enregistrements obtenus au Sphinx ont révélé l'existence de 10450 raies d'absorption solaires et telluriques, alors que les tables de H.D. BABCOCK et C.E. MOORE, publiées en 1947, n'en mentionnent que 4675.

En 1962, en utilisant un instrument spécialement conçu à cet usage, D. LABS et H. NECKEL du « Landessternwarte » de Heidelberg, ont

aussi profité de l'excellente transparence de l'atmosphère au-dessus du Jungfraujoch pour mesurer avec soin, d'une façon absolue, la quantité d'énergie que le soleil émet dans de nombreuses régions spectrales du domaine visible.

Dans une communication à la Classe des Sciences de notre Académie, nous avons signalé, en 1964, certains résultats obtenus au Jungfraujoch, entre autres l'étude de variations de profils centre-bord de certaines raies infrarouges [24], en particulier du multiplet C I à 10700 Å [25], l'estimation de l'abondance du plomb dans le soleil [26], la détermination du profil de He I à 10830 Å observé dans les facules solaires [27]. Ce dernier travail a été effectué par O. NAMBA, chercheur japonais engagé à l'Observatoire d'Utrecht (Hollande). C. de Jager et L. Neven ont également observé les variations centre-bord de 50 raies entre 6561 Å et 10965 Å [28].

Pour déterminer les longueurs d'onde des nombreuses raies observées entre 7498 Å et 12016 Å et pour en identifier le plus possible, L. Delbouille et G. Roland ont bénéficié de l'aide particulièrement précieuse de J. Swensson, de W. Benedict et de O. Mohler, Directeur de l'Observatoire McMath de l'Université de Michigan (U.S.A.). O. Mohler a séjourné à Liège pendant un an en 1960-1961 et a mis à notre disposition les spectres solaires observés, entre 7500 et 12000 Å, avec le grand spectrographe à réseau (distance focale : 15 m) de l'Observatoire McMath. Celui-ci étant situé à basse altitude, près du lac Michigan, la comparaison avec les résultats obtenus au Jungfraujoch a facilité la détection des raies telluriques. Le long travail de mesure et d'identification a conduit, en 1970, à la publication d'un volume, *in quarto*, de 459 pages [29].

En ce qui concerne les raies dues à la photosphère solaire, environ 2100 ont été attribuées à des atomes, environ 1900 uniquement à la molécule CN, tandis que celle-ci contribue partiellement à 1200 autres raies.

Plus de 4000 raies sont dues aux molécules telluriques H₂O, O₂ et CO₂.

Les spectres observés ont donc permis de compléter nos connaissances au sujet des atomes et des molécules concernés.

Comme l'instrumentation de base, installée au Sphinx en 1958, est encore utilisée actuellement, nous allons rappeler brièvement son schéma optique, ce qui nous permettra de préciser les améliorations qui lui ont été apportées à partir de 1963.

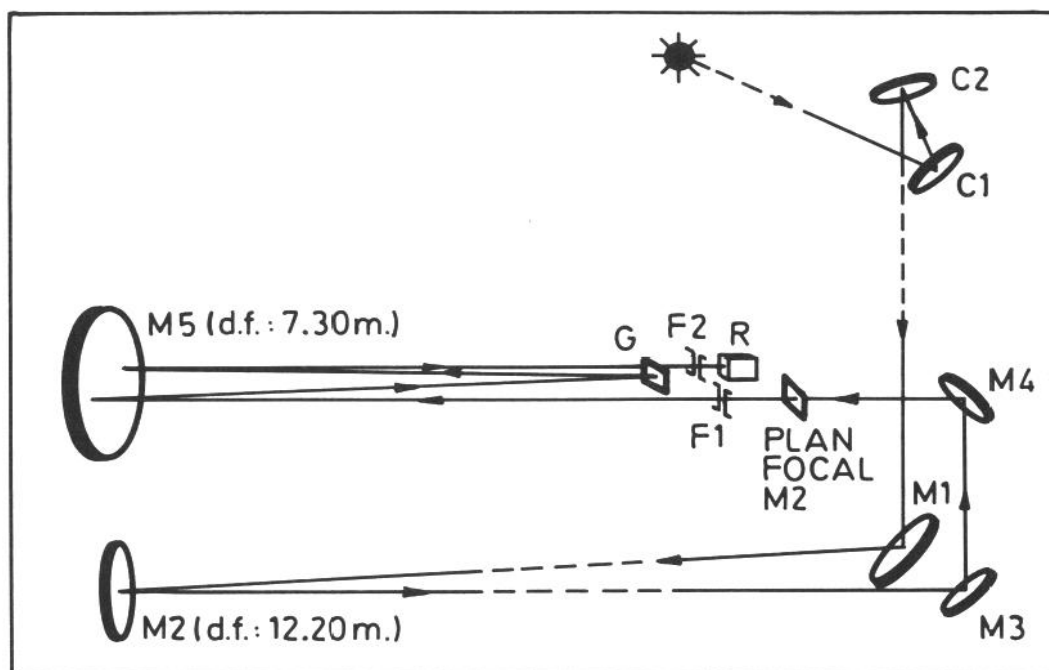


FIG. 3. — Schéma optique général.

Le coelostat, équipé de deux miroirs plans C_1 et C_2 (fig. 3), envoie un faisceau de radiations solaires verticalement, vers le bas, dans le laboratoire du premier étage de l'Observatoire du Sphinx.

Après réflexion sur un miroir plan M_1 , les radiations sont dirigées vers un miroir sphérique M_2 (distance focale : 12,20 m, diamètre : 50 cm). Après réflexion sur deux miroirs plans M_3 et M_4 , une image du soleil de 11,5 cm de diamètre se forme dans le plan focal de M_2 , qui contient la fente d'entrée d'un monochromateur à prisme (non représenté). Celui-ci forme un spectre dans le plan de la fente d'entrée F_1 du spectrographe à réseau. Nous avons choisi un montage Ebert-Fastie, qui permet aisément le double passage sur le réseau. Les radiations traversant F_1 tombent sur un miroir sphérique M_5 (distance focale : 7,30 m, diamètre : 70 cm). F_1 étant dans le plan focal de M_5 , un faisceau de radiations quasi-parallèles atteint le réseau optique G , qui le diffracte. Le réseau étant orienté dans une direction déterminée, une partie des radiations diffractées atteignent M_5 qui, focalisées par celui-ci, forment un spectre dans le plan de la fente de sortie F_2 . Celle-ci est, comme F_1 , placée dans le plan focal de M_5 .

Le montage est symétrique par rapport à l'axe optique qui passe par le centre du miroir M_5 , F_1 et F_2 étant distantes de 32 cm.

Les radiations sortant par F_2 sont recueillies par un détecteur, relié à un enregistreur à plume par l'intermédiaire d'un amplificateur. Les dispositifs électroniques utilisés à cet effet ont été décrits dans l'atlas déjà cité [23].

Le spectromètre à réseau est enfermé dans une cuve étanche en acier, à parois épaisses, permettant de faire fonctionner l'optique dans le vide, afin d'éviter les perturbations qui pourraient être dues à la stratification ou au mouvement de l'air dans le trajet optique.

En 1963, L. Delbouille et G. Roland installèrent le dispositif de double passage sur le réseau, ce qui permet théoriquement de doubler le pouvoir de résolution.

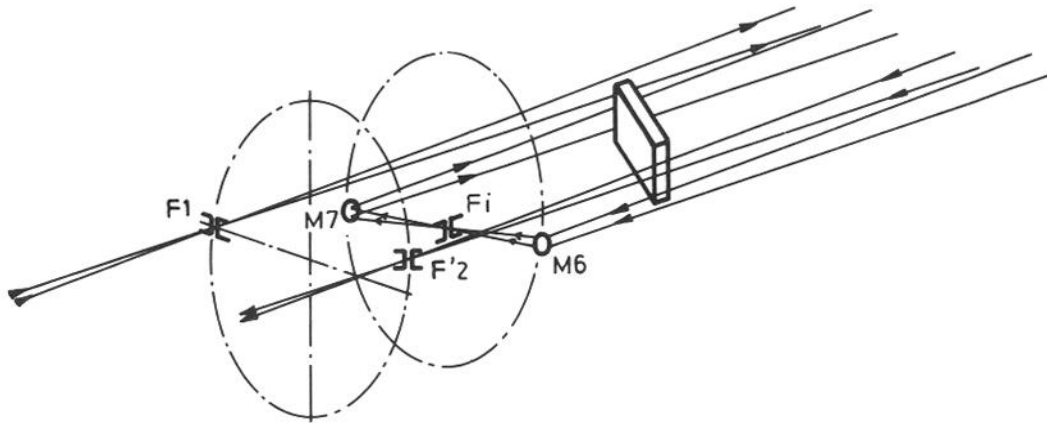


FIG. 4. — Double passage sur le réseau.

En vue d'utiliser le réseau deux fois, un miroir plan M_6 (fig. 4) est placé dans le faisceau qui se dirige vers F_2 (fig. 3), afin que le spectre se forme dans le plan de la fente F_i . Les radiations traversant F_i sont réfléchies par un miroir plan M_7 , placé sous le faisceau initial entrant par F_1 (fig. 3). M_7 (fig. 4) est orienté pour que le faisceau se dirige vers M_5 (fig. 3), qui envoie une deuxième fois les radiations sur le réseau G. Après diffraction, les radiations atteignant M_5 sont focalisées par celui-ci et forment un spectre dans le plan de la fente F'_2 . Les radiations sortant par cette fente sont alors recueillies par le détecteur.

L. Delbouille eut la très heureuse idée de placer, dans le spectre intermédiaire se formant dans le plan de F_i , une fente réglable non prévue dans la construction initiale. La largeur de cette fente est choisie de façon à ne pas permettre aux « ghosts » de Rowland, qui se trouvent dans le spectre intermédiaire, de traverser F_i . Cette fente

donne aussi la possibilité d'éviter les effets d'autres défauts qui pourraient provenir du réseau. Le profil instrumental est donc nettement amélioré par rapport au simple passage. Notons aussi que l'intensité des « ghosts » de Rowland est proportionnelle au carré de l'ordre spectral utilisé. Le fait d'éviter ces « ghosts » a permis d'employer un des réseaux du 9^e au 14^e ordre tout en assurant une excellente qualité des spectres.

En simple passage, un écran opaque était placé devant la fente F_1 (fig. 3) pour enregistrer la position « zéro » de la plume de l'enregistreur. On a pu ainsi constater, lors de l'enregistrement des raies d'absorption très intenses, que la partie la plus absorbée n'atteignait pas la position « zéro », l'effet de la lumière diffusée dans le spectrographe étant de l'ordre de 2 à 3 %.

En double passage, en plaçant l'écran derrière la fente F_i (fig. 4), l'effet de la lumière diffusée a été pratiquement supprimé.

Le fonctionnement sous vide de l'optique du spectrographe à réseau ne fut pas jugé nécessaire lors de l'utilisation en simple passage. En double passage, le trajet optique dans le spectromètre est d'environ 57 mètres. Dans ces conditions, les spectres ont été améliorés en évacuant l'air contenu dans la cuve, de façon à maintenir une pression de l'ordre de 1 mm de Hg.

Les premiers résultats obtenus pour $\lambda > 7000 \text{ \AA}$, avec le double passage, furent publiés en 1963 [30]. Vu leur qualité exceptionnelle, L. Delbouille, G. Roland et L. Neven décidèrent alors de réenregistrer le spectre solaire de 3000 \AA à 10.000 \AA .

Notons qu'en utilisant un réseau Bausch and Lomb (300 traits par mm, surface gravée : 256 × 128 mm) dans le douzième ordre la demi-largeur du profil instrumental, mesurée en employant comme source un laser à argon ionisé, monomode, émettant à 4880 \AA , est de 4,1 milliångströms, ce qui correspond à un pouvoir de résolution de 1,2 million.

En 1964, la région $\lambda\lambda$ 3874-3875 \AA du spectre solaire fut enregistrée au Sphinx par L. Delbouille et G. Roland en vue de détecter les raies P(57) et P(58) de la bande (O-O) du système ultraviolet de la molécule isotopique $C^{13}N$. Ces observations les amenèrent à collaborer avec L. HERZBERG d'Ottawa (Canada). Alors qu'une excellente coïncidence existe en longueur d'onde, pour P(58) avec une raie solaire, la raie P(57) qui devrait aussi être observée, est absente. Ces chercheurs

conclurent que la coïncidence pour P(58) est fortuite et que le rapport C^{12}/C^{13} dans la photosphère solaire est supérieur à 40 alors que, sur terre, il est égal à 90 [31].

La turbulence de l'atmosphère terrestre affecte de façon aléatoire l'énergie reçue en provenance d'objets célestes.

L'analyse de Fourier de ce « bruit atmosphérique » montre qu'il est maximum aux très basses fréquences et qu'il diminue rapidement lorsque la fréquence augmente. Dans ces conditions, pour un temps total d'observation constant, les spectres observés sont nettement améliorés en faisant la somme d'un grand nombre d'observations faites aussi rapidement que possible. Pour ce faire, un système de balayage rapide fut installé en relation avec le dispositif de rotation du réseau.

Ainsi que l'ont rappelé L. Delbouille et G. Roland [2], « dans un premier temps, les mesures étaient enregistrées sur des rubans de papier perforés et les moyennes effectuées au Centre de Calcul de l'Université de Liège. Il apparut très vite que l'appareil ainsi modernisé restait capable de rivaliser avec les meilleurs instruments étrangers qui entraient alors en service, tout en gardant l'avantage de la situation du Jungfraujoch, mais que cette méthode d'enregistrement ne pouvait être conservée. Il fallait absolument, pour bénéficier pleinement des qualités de l'installation, lui adjoindre un ordinateur, capable à la fois de contrôler la bonne marche de toutes les opérations, d'enregistrer rapidement sur une mémoire à disques les données d'observation, d'effectuer les calculs nécessaires et de « sortir » le spectre final sur bande magnétique ». C'est en été 1966 que le spectromètre fut connecté à un ordinateur Honeywell DDP-224.

Rappelons que le but poursuivi était de réenregistrer le spectre solaire de 3000 à 10.000 Å. Les observations entre 4300 et 6200 Å, jugées définitives, ont été publiées en 1973, chaque planche (50 × 15 cm) couvrant 10 Å avec un recouvrement d'un angström [32].

La reliure à anneaux utilisée donne la possibilité d'ajouter facilement de nouvelles sections. Actuellement, cet atlas couvre la région comprise entre 3600 et 8000 Å. Les observations entre 8000 Å et 10.000 Å sont terminées et seront publiées prochainement.

Pour effectuer les enregistrements, chaque région de 10 Å est balayée en 40 sec, des mesures d'intensité étant effectuées tous les 2 milliångströms. Chaque observation résulte de la moyenne de 50 balayages successifs.

Le rapport signal/bruit étant de l'ordre de 1000, l'échelle des intensités peut être agrandie 10 fois sans qu'un bruit trop gênant apparaisse, ce qui permet de déceler des raies très faibles. D'ailleurs, sur certaines planches, deux courbes sont reproduites, une de celles-ci correspond à une échelle d'intensité de 0 à 100, l'autre à une échelle de 80 à 100.

Le texte introductif de l'atlas en question donne des détails sur les améliorations que nous avons signalées, ainsi que sur l'acquisition et le traitement des données.

Cent cinquante exemplaires de cet atlas sont envoyés au « Air Force Cambridge Research Center » (U.S.A.). De plus, deux cent cinquante exemplaires sont vendus dans 35 pays. Quarante cinq copies sont expédiées sur bandes magnétiques.

À titre d'exemple, la figure 5 reproduit le spectre solaire aux environs de 6300 Å. Le pouvoir de résolution très élevé (de l'ordre de 1 million) permet de distinguer facilement 4 raies plus fines que les autres. Elles sont dues à la molécule O₂ de l'atmosphère terrestre. Les raies plus larges proviennent d'éléments contenus dans la photosphère solaire. La notation [O I] signifie qu'il s'agit d'une raie « interdite » de l'oxygène neutre.

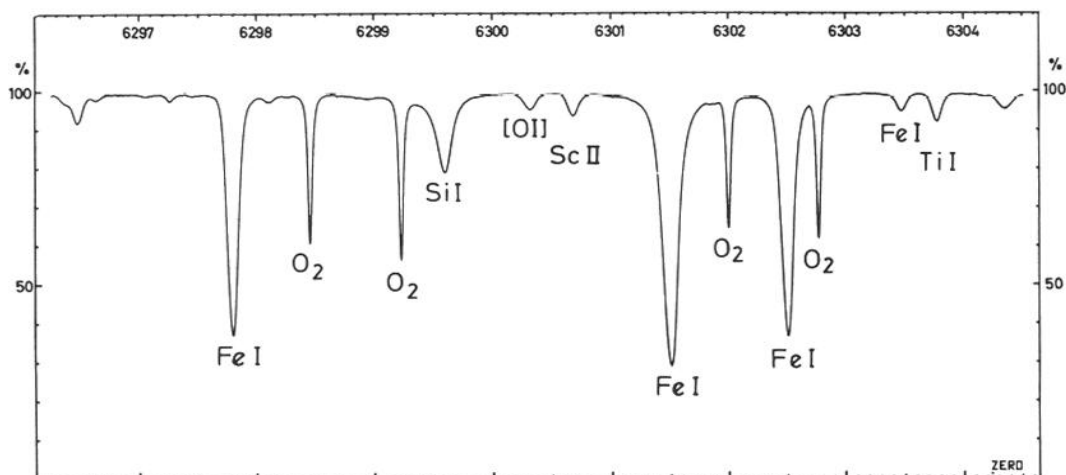


FIG. 5. — Spectre solaire dans la région de 6300 Å.

La figure 6 donne le profil de la raie H_α observée dans le spectre solaire. Une des courbes correspond à l'échelle d'intensité 0 à 100, tandis que pour l'autre cette échelle s'étend de 80 à 100.

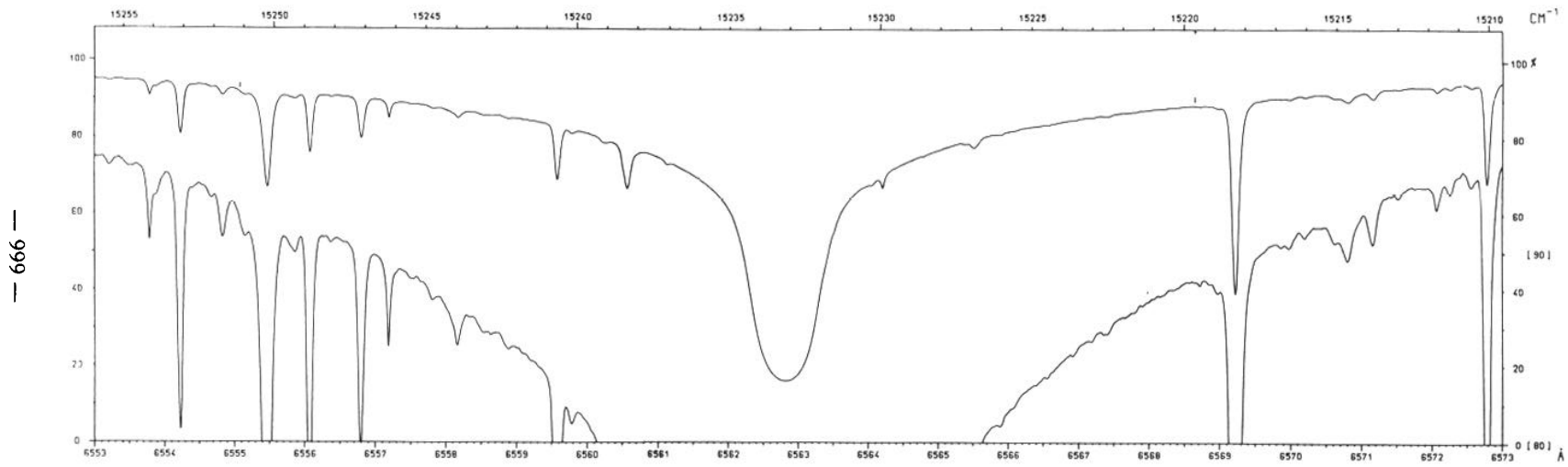


FIG. 6. — Profil de la raie H α , observé dans le spectre solaire.

Dès 1965, N. GREVESSE, alors assistant et actuellement chef de travaux dans notre service, s'intéressa aux spectres solaires enregistrés au Sphinx, en vue de déterminer les abondances d'éléments photosphériques.

La détermination de l'abondance des éléments dans les atmosphères stellaires et, en particulier, dans la photosphère solaire, est importante pour plusieurs raisons rappelées dans un article de E. Biémont et N. Grevesse [41].

- a) La construction de modèles pour les atmosphères et les intérieurs des étoiles nécessitent la connaissance des abondances des éléments prépondérants.
- b) La comparaison de la composition chimique du soleil avec celle de la terre, de la lune, des planètes et spécialement des météorites peut contribuer aux théories de la formation et de l'évolution du système solaire. Rappelons que les météorites du type « chondrites carbonées » sont considérées comme des « témoins » de la formation du système solaire, il y a $4,6 \cdot 10^9$ années, alors que la terre et la lune ont subi des « transformations » chimiques depuis leur formation.
- c) La variation de l'abondance de certains éléments dans différents types d'étoiles et le soleil peut donner des informations sur l'origine et l'évolution des étoiles et des systèmes stellaires.
- d) Dans beaucoup de cas, les abondances stellaires sont déterminées par rapport à celles du soleil.
- e) La connaissance des abondances des éléments chimiques dans les étoiles est nécessaire pour tester les théories de nucléosynthèse, qui essaient de répondre à la question « où, quand et comment les éléments se sont-ils formés ? ».

Afin de mettre à profit l'excellente qualité des spectres mis à sa disposition, N. Grevesse utilise une méthode de détermination d'abondances basée sur la « construction » de spectres synthétiques. Les profils calculés sont comparés aux profils observés ce qui permet non seulement de tenir compte de ces derniers, mais aussi des déformations éventuelles par des raies voisines. De plus, il est intéressant de se rendre compte de l'influence de la structure hyperfine d'une raie sur le profil observé.

N. Grevesse appliqua cette méthode à la détermination de l'abondance photosphérique de nombreux éléments. Ses résultats, obtenus

jusque fin 1969, ont fait l'objet de plusieurs publications et, en particulier, d'une thèse de doctorat [33] et d'un mémoire (in-8°) de la Classe des Sciences de notre Académie, paru en 1970 [34].

À la même époque, J.P. SWINGS⁽¹⁾, le fils de notre confrère Pol Swings, s'intéressa aussi à la détermination d'abondances d'éléments dans la photosphère solaire, en se basant sur des spectres enregistrés au Sphinx et au Kitt Peak National Observatory (KPNO) (Tucson, Arizona, U.S.A.). Il s'intéressa spécialement à l'étude des raies interdites de O I, N I, C I, Fe II, Ni II, Si I, S I et Ca II. Ses résultats firent aussi l'objet de plusieurs publications et, en particulier, d'une thèse de doctorat [35] et d'un mémoire (in-8°) de la Classe des Sciences de notre Académie, paru en 1969 [36].

À la fin de cette publication, J.P. Swings cite, entre autres, les résultats obtenus sur Fe II en collaboration avec N. Grevesse [37]. Ces auteurs constatèrent que l'abondance du fer, déduite de l'étude des raies interdites de Fe II, est la même dans la photosphère, dans la couronne solaire et dans les météorites (chondrites carbonées), alors qu'avant eux l'abondance photosphérique du fer, déduite des raies permises de Fe I et Fe II, était considérée comme étant 10 fois inférieure à celle déterminée dans les deux autres cas, ce qui avait suscité d'ailleurs différentes interprétations théoriques, à vrai dire peu convaincantes. Le désaccord fut expliqué en 1969, des travaux en laboratoire ayant prouvé que les probabilités de transition relatives aux raies permises de Fe I et Fe II étaient erronées (facteur 10).

N. Grevesse et J.P. Swings publièrent aussi en collaboration, entre 1968 et 1972, leurs résultats relatifs à l'étude des raies interdites de Ca II, Ni II, Fe I et Si I.

A.J. SAUVAL, de l'Observatoire Royal de Belgique, s'est spécialement intéressé à l'étude des raies dues aux molécules photosphériques, travail qui a conduit à sa thèse de doctorat défendue en 1972 [38]. N. Grevesse et A.J. Sauval ont publié un article de synthèse sur ce sujet en 1973 [39].

De 1972 à 1980, un contrat avec le Fonds de la Recherche Fondamentale Collective nous permit de bénéficier de l'aide particulièrement efficace de E. BIEMONT. Fort heureusement, en 1980, celui-ci a

(¹) Alors assistant, actuellement agrégé de Faculté à l'Université de Liège.

obtenu un mandat de « chercheur qualifié » au F.N.R.S., ce qui lui a donné la possibilité de continuer à travailler dans notre service.

Rappelons que la détermination des abondances nécessite la connaissance des « forces d'oscillateurs » (*f*-values). En collaborant avec N. Grevesse dès 1972 ou en travaillant indépendamment, E. Biémont a largement contribué à la détermination de nombreuses « forces d'oscillateurs » en utilisant des méthodes théoriques adéquates. Ses résultats ont fait l'objet d'une thèse de doctorat défendue en 1977 [40]. Les travaux de N. Grevesse et E. Biémont ont conduit en particulier à l'identification de nombreuses raies solaires dans les spectres pris au Sphinx, ainsi qu'à la détermination des abondances de nombreux éléments photosphériques en se basant sur ces spectres.

Parmi les nombreux travaux qu'ils ont publiés sur ces questions, nous mentionnerons seulement un article de synthèse paru en 1977 [41].

Il nous paraît intéressant de signaler que leurs résultats théoriques les ont amenés à collaborer avec des groupes d'expérimentateurs de sept pays, en particulier avec le groupe de Liège spécialisé dans la spectroscopie « faisceau-lame » (beam-foil spectroscopy).

Dans un numéro récent de « Ciel et Terre » (1981) consacré au soleil [42], N. Grevesse a publié, en particulier, une table rassemblant les valeurs actuelles des abondances (en nombre d'atomes) des 81 éléments identifiés jusqu'à présent dans le soleil. Cette table donne aussi les abondances des éléments dans les météorites. Ainsi que le signale N. Grevesse, « l'accord soleil-météorite est généralement excellent. Les abondances du lithium et du béryllium sont cependant nettement plus faibles dans le soleil, ces éléments assez fragiles étant détruits (en partie) aux températures régnant à la base de la zone convective. Les désaccords subsistant pour certains autres éléments seront certainement expliqués dans un proche avenir lorsque les données atomiques précises seront disponibles ».

Plusieurs autres chercheurs ont utilisé les spectres enregistrés au Jungfraujoch, en particulier pour des travaux sur le soleil et sur d'autres étoiles. Notons, en outre, que, lors d'un colloque organisé à Paris en avril 1981 et réunissant des académiciens français et belges, notre confrère J.Cl. PECKER, professeur au Collège de France, a signalé que, vu l'excellente qualité de l'atlas solaire de Liège, 3000-

10.000 Å [32], il espère améliorer la précision de la mesure du champ magnétique stochastique dans la photosphère [43].

Bien que l'atmosphère au-dessus du Jungfraujoch soit très sèche, l'influence sur le spectre solaire de l'absorption par la vapeur d'eau est encore importante. Ce fait nous a conduit naturellement à la construction d'une « nacelle stratosphérique » permettant d'observer le spectre solaire à des altitudes de 30 à 40 km.

L'équipement de cette nacelle a été, en grande partie, construit à Liège. Il comprend un télescope du type Cassegrain (optique Ritchey-Chrétien) (diamètre du miroir principal : 38 cm) permettant de former une image solaire de 56 mm de diamètre. Il est couplé optiquement à un spectromètre du type Ebert-Fastie (distance focale : 2,5 m), utilisé en double passage [44].

Depuis 1969, 17 vols ont eu lieu, sous la direction de R. ZANDER, chef de travaux dans notre service, à partir de la base de Palestine (Texas, USA). L. Delbouille, G. Roland et plusieurs techniciens de Liège y ont participé. Ces vols ont permis d'observer le spectre solaire dans différentes régions comprises entre 1,75 et 8,1 μm , avec une limite de résolution de 0,04 cm^{-1} et à partir d'altitudes variant entre 27 et 38 km. Ils ont permis de recueillir des résultats très intéressants, améliorant nos connaissances des atmosphères solaire et terrestre.

Nous noterons en particulier que, lors d'un vol effectué le 30 septembre 1974, le spectre solaire enregistré entre 2,47 et 2,53 μm , a permis à R. Zander de détecter, pour la première fois, la présence de HF dans l'atmosphère terrestre, la raie 4038,97 cm^{-1} ayant été attribuée à cette molécule [45].

Ce résultat est particulièrement important parce que HF provient essentiellement de la dissociation, par les rayons ultraviolets solaires, des chlorofluorométhanes, principalement des fréons 11 (CFC_1_3) et 12 (CF_2Cl_2). Ces gaz sont utilisés dans l'industrie et servent surtout de « propulseurs » dans les « bombes aérosols ». On estime à un million de tonnes par an la quantité de ces produits libérés dans l'atmosphère terrestre. Inoffensives dans les basses couches de l'atmosphère, ces molécules diffusent à des altitudes plus grandes où elles sont décomposées et les produits chlorés qui en résultent « attaquent » l'ozone atmosphérique, la molécule qui protège la vie sur terre en absorbant le rayonnement ultraviolet solaire inférieur à 3000 Å. La molécule HF est un « traceur » permettant d'évaluer les quantités de « fréons » décomposés.

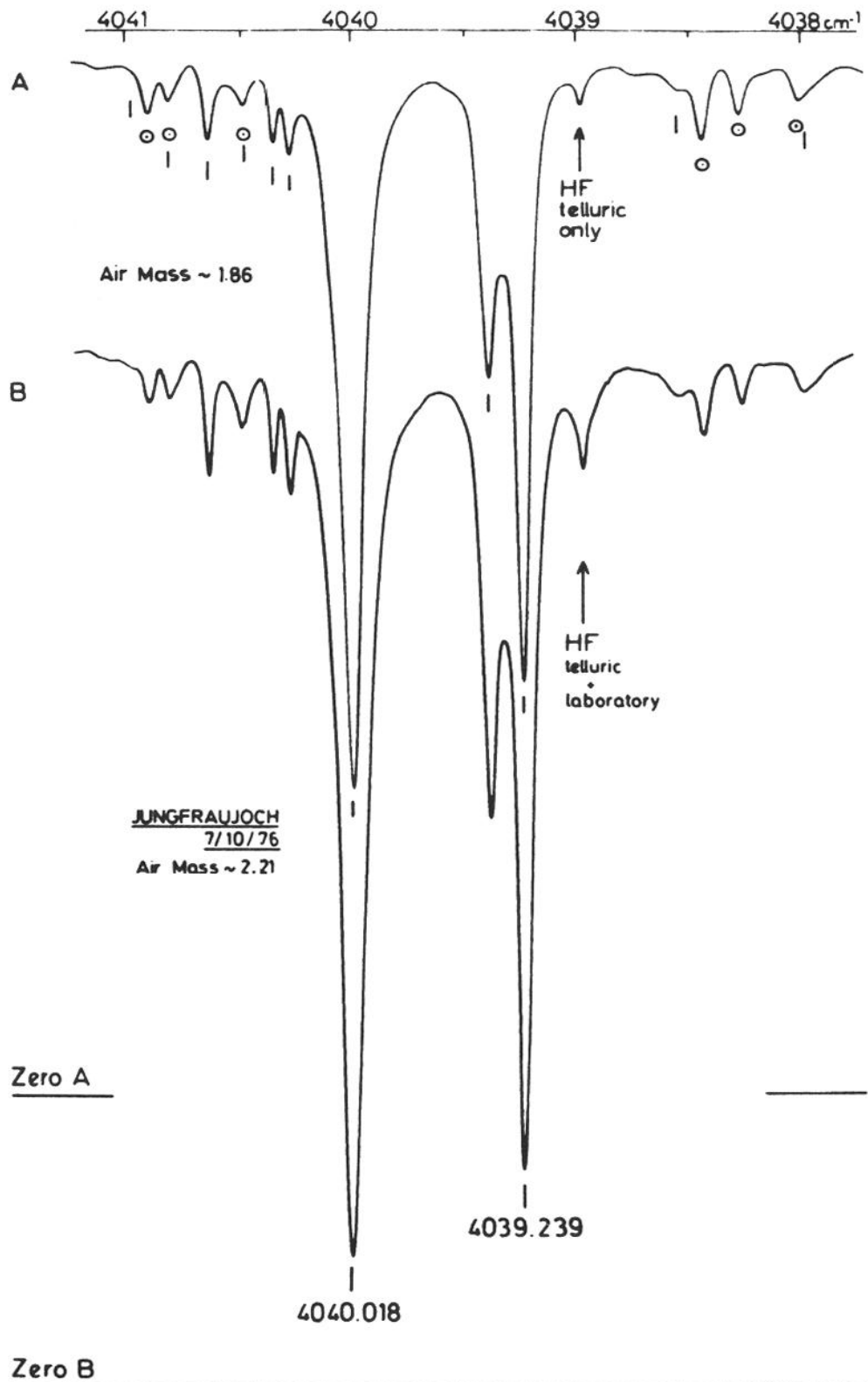


FIG. 7. — Spectre solaire observé au Jungfraujoch - Identification d'une raie de HF tellurique.

La raie due à HF a aussi été observée sur des spectres enregistrés au Sphinx. La figure 7 reproduite dans ce texte a été publiée en 1977 [46-47]. La courbe A donne le spectre solaire pris au Sphinx, entre 4041 et 4038 cm^{-1} . La raie HF y est repérée, ainsi que des raies solaires et des raies dues à la vapeur d'eau (notées par un trait). Le spectre B fut obtenu en interposant dans le faisceau solaire, avant son entrée dans le spectromètre, un tube d'absorption contenant du HF. L'augmentation d'intensité de la raie HF ainsi observée confirmait bien l'identification précédente.

La raie HF étant faible et très proche de deux raies intenses dues à la vapeur d'eau, il faut pour l'observer enregistrer le spectre solaire avec un pouvoir de résolution élevé et à partir d'une station au-dessus de laquelle la quantité de vapeur d'eau est faible.

Des mesures de l'abondance de HF effectuées à partir du Sphinx, entre 1976 et 1980, semblent indiquer une augmentation de celle-ci. Ces mesures doivent être poursuivies. Notons aussi que des raies de H^{35}Cl et de H^{37}Cl ont été identifiées sur des spectres solaires observés au Sphinx, ce qui va permettre de suivre la variation de l'abondance de ces molécules à partir du sol. Elles aussi sont formées partiellement à partir des produits de décomposition des fréons.

Nous avons signalé précédemment l'utilisation d'un interféromètre au Jungfraujoch en 1957, par H.A. Gebbie [21]. Ce fut le début d'une collaboration avec L. Delbouille et G. Roland qui leur permit de se familiariser avec la « méthode de spectroscopie par transformée de Fourier ». En 1965, G. Roland présenta, à l'Université de Liège, une thèse de doctorat consacrée à ce sujet [48]. Depuis lors, cette méthode a continué à se développer au point d'atteindre des pouvoirs de résolution surpassant ceux des meilleurs spectromètres infrarouges à réseau, tout en permettant d'augmenter la précision des mesures de longueurs d'onde.

Engagé en 1968 comme assistant dans notre service, R. MALBROUCK fut chargé de la construction d'un interféromètre permettant d'obtenir au Sphinx des spectres infrarouges solaires, à partir de $1\ \mu\text{m}$. Il fut d'abord initié au travail proposé par L. Delbouille et G. Roland. Il fit ensuite différents séjours au laboratoire Aimé Cotton à Orsay (France) où, grâce à l'amabilité de P. et J. CONNES, J. PINARD et J.P. MAILLARD, il put se mettre au courant des méthodes et des excellents interféromètres du type Michelson développés et utilisés dans ce laboratoire.

Rentré en Belgique, R. Malbrouck fit construire, à l'Institut d'Astrophysique de Liège, un interféromètre du type « Connes de la deuxième génération » utilisant la méthode « pas à pas », c'est-à-dire que la différence de marche dans l'interféromètre varie d'une façon discontinue. À chaque différence de marche, un point de l'interférogramme est enregistré. Tout en adoptant le schéma optique de l'interféromètre de J. Pinard [49-50], R. Malbrouck améliora la fiabilité de l'instrument, ainsi que les contrôles de la bonne marche de l'appareil. De plus, en utilisant une électronique adéquate et en introduisant certains asservissements, il parvint à augmenter la cadence d'enregistrement d'un interférogramme, jusqu'à 350 points par sec, au lieu des 5 points par sec de l'interféromètre de J. Pinard.

L'instrument ainsi perfectionné fut installé au Sphinx en juin 1974, au foyer coudé du télescope équipé d'un miroir de 76 cm de diamètre, installé en 1966-1967 et offert par les FNRS belge et suisse, la Belgique, la France et la Suisse ayant fourni les crédits nécessaires à la construction de la coupole.

Notons que l'interféromètre de R. Malbrouck permet d'atteindre une différence de marche d'un mètre, soit théoriquement une limite de résolution de $0,005 \text{ cm}^{-1}$. Différentes missions d'observations au Sphinx permirent à R. Malbrouck d'obtenir des enregistrements du spectre solaire dans les régions suivantes : $4050\text{-}5300 \text{ cm}^{-1}$, $5820\text{-}6600 \text{ cm}^{-1}$ et $7600\text{-}8600 \text{ cm}^{-1}$, avec une limite de résolution meilleure que $0,02 \text{ cm}^{-1}$. Cette limite n'avait jamais été atteinte dans des spectres solaires observés dans ces régions spectrales. Notons, en particulier, la publication en 1974 d'un atlas solaire de D. HALL [51], obtenu en utilisant un excellent spectromètre à réseau au KPNO.

Dans les régions spectrales observées par R. Malbrouck, la limite de résolution de l'Atlas de D. Hall varie de 0,1 à $0,66 \text{ cm}^{-1}$.

Les résultats de R. Malbrouck ont fait l'objet de sa thèse de doctorat, présentée à l'Université de Liège en 1977 [52]. Elle apporte une réelle contribution à l'étude des spectres solaire et terrestre. Notons, en particulier, qu'à partir de l'observation de la bande $2\nu_3$ de CH_4 à $1,66 \mu\text{m}$, R. Malbrouck a déterminé l'abondance du méthane au-dessus du Jungfraujoch. Pour un trajet vertical, il a trouvé $0,781 \pm 0,079 \text{ cm-atm STP}$ (observation du 27-02-75) et $0,762 \pm 0,026 \text{ cm-atm STP}$ (observation du 21-05-75) [53]. À partir d'observations de la même bande effectuées au Sphinx en 1951, nous avons trouvé, en collaboration avec A.H. Nielsen,

une abondance verticale de CH_4 de 0,777 cm-atm STP [14]. Aux erreurs de mesure près, R. Malbrouck a donc confirmé ce résultat.

La méthode utilisée par R. Malbrouck permettait d'atteindre, en deux heures environ d'observation, un rapport signal/bruit de l'ordre de 200.

D'autre part, après plusieurs années d'efforts tenaces, J. BRAULT de l'observatoire national de Kitt Peak (Tucson, Arizona, USA), a mis au point une méthode d'enregistrement rapide des interférogrammes, utilisant un déplacement continu, à vitesse constante, du miroir mobile. Il a révélé, en 1979, les performances atteintes par son interféromètre, qui permet aussi une différence de marche d'un mètre [54]. Dans cet instrument, l'interférogramme est obtenu à la cadence de 2500 points par sec.

Sur la figure 8, la courbe notée Jungfraujoch 1951 reproduit un spectre solaire enregistré dans la région de $3,4 \mu\text{m}$ et publié dans l'Atlas Migeotte-Neven-Swensson [12], tandis que la courbe notée KPNO 1977 donne le spectre solaire obtenu à l'Observatoire Kitt Peak, dans la même région spectrale, en utilisant l'interféromètre de J. Brault. Dans cette région, on trouve surtout des raies de CH_4 et quelques raies de H_2O .

Une collaboration de L. Delbouille et G. Roland avec J. Brault et L. TESTERMAN a permis la publication préliminaire, en octobre 1981, d'un atlas solaire couvrant la région de $5,48 \mu\text{m}$ (1850 cm^{-1}) à $1 \mu\text{m}$ (10.000 cm^{-1}) avec une limite de résolution de $0,01 \text{ cm}^{-1}$ et un rapport signal/bruit variant de 3000 à 5000 [55]. La courbe supérieure de la fig. 8 est reproduite dans cet atlas. Notons que la méthode de spectroscopie par transformée de Fourier permet d'atteindre une précision de mesure en nombres d'onde de $0,0001 \text{ cm}^{-1}$.

Afin de profiter de l'atmosphère exceptionnellement sèche au-dessus du Jungfraujoch, il importe de réenregistrer le spectre solaire dans l'infrarouge avec un instrument aussi performant que celui du Kitt Peak. Depuis octobre 1978, Ph. DEMOULIN, remplaçant R. Malbrouck, a été chargé d'atteindre ce but en modifiant le premier interféromètre installé au Sphinx, conseillé par L. Delbouille et G. Roland et aidé par L. DEGÉE, technicien. Les progrès accomplis durant ces 3 dernières années sont encourageants. Ils permettent d'espérer de nouvelles observations du spectre solaire, dans quelques mois.

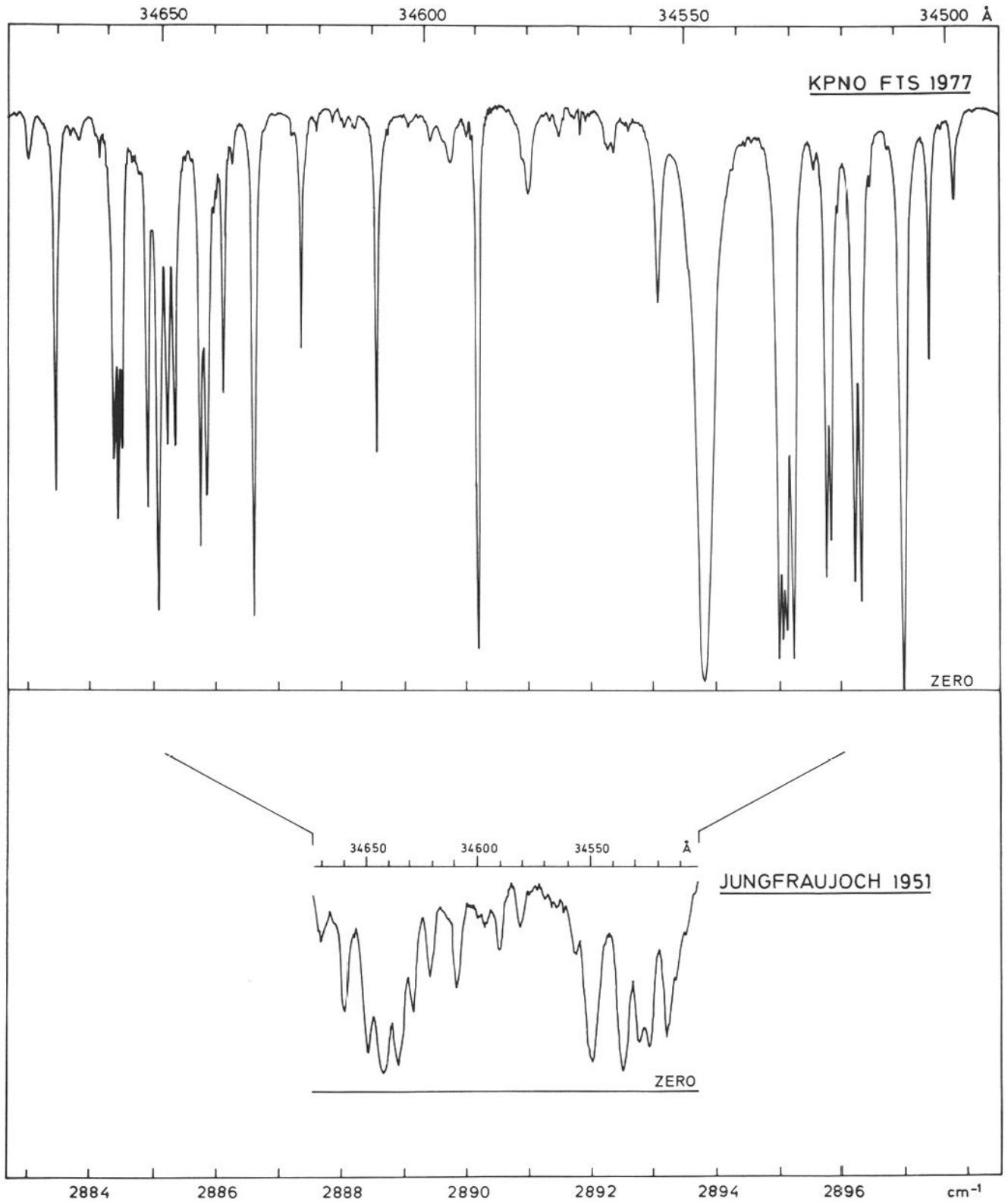


FIG. 8. — Spectres solaires dans la région de 3.4 μm .

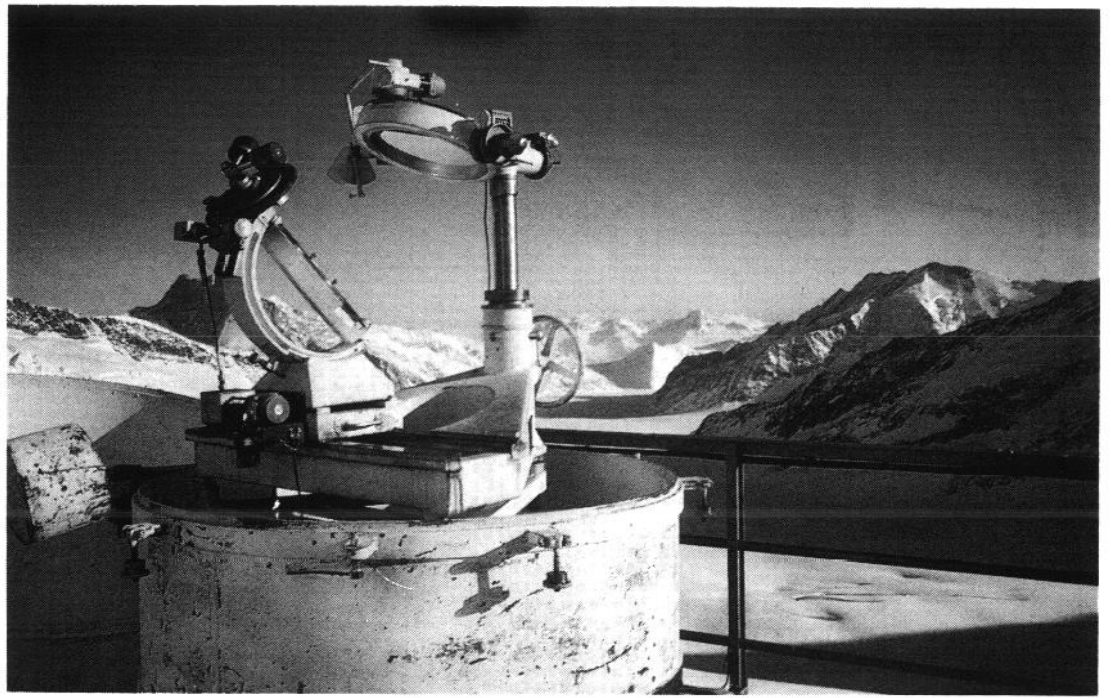


FIG. 9. — Le coelostat.

FIG. 10. — Le spectromètre solaire installé depuis 1958.

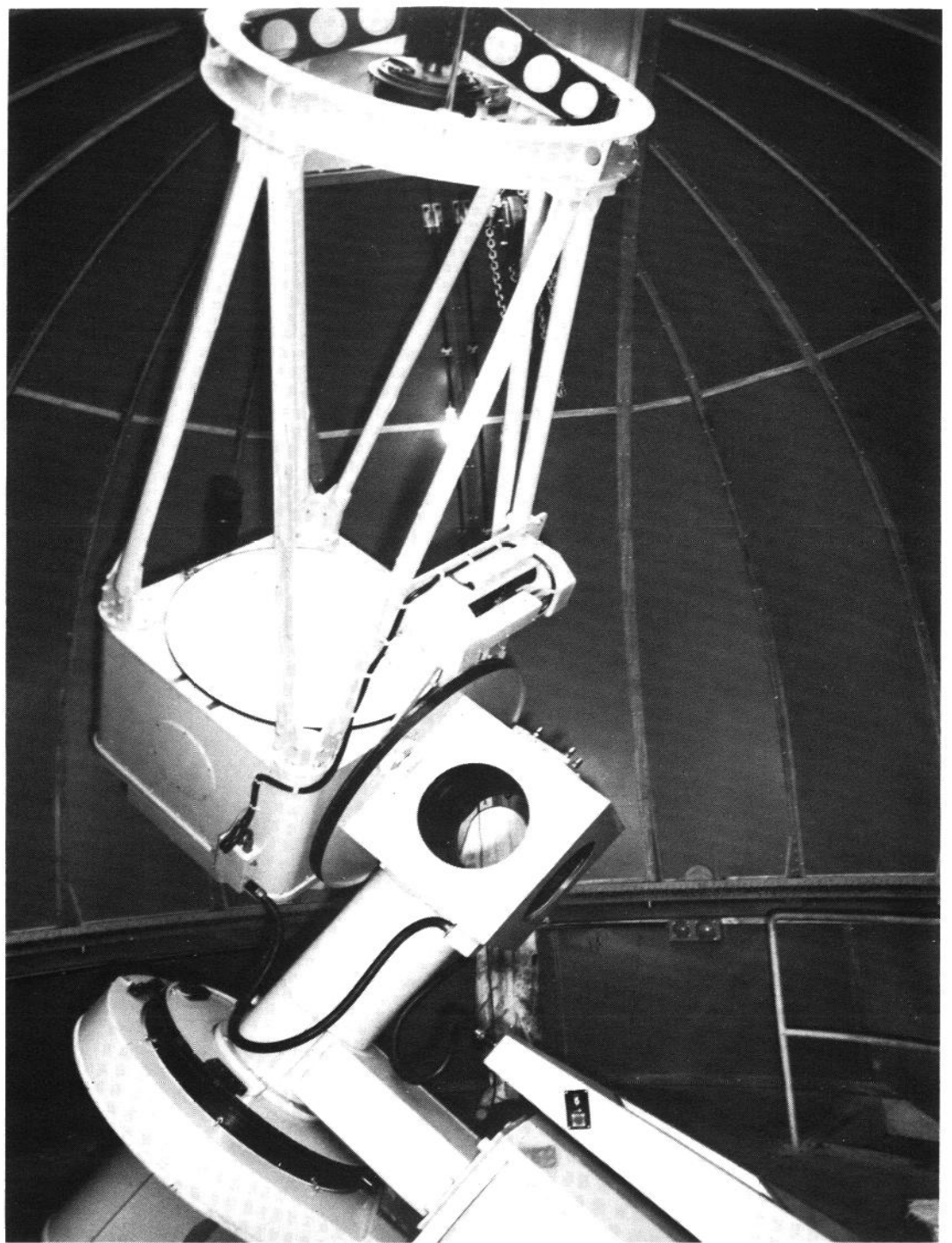


FIG. 11. — Le télescope, installé au Sphinx en 1967
(diamètre du miroir principal : 76 cm).

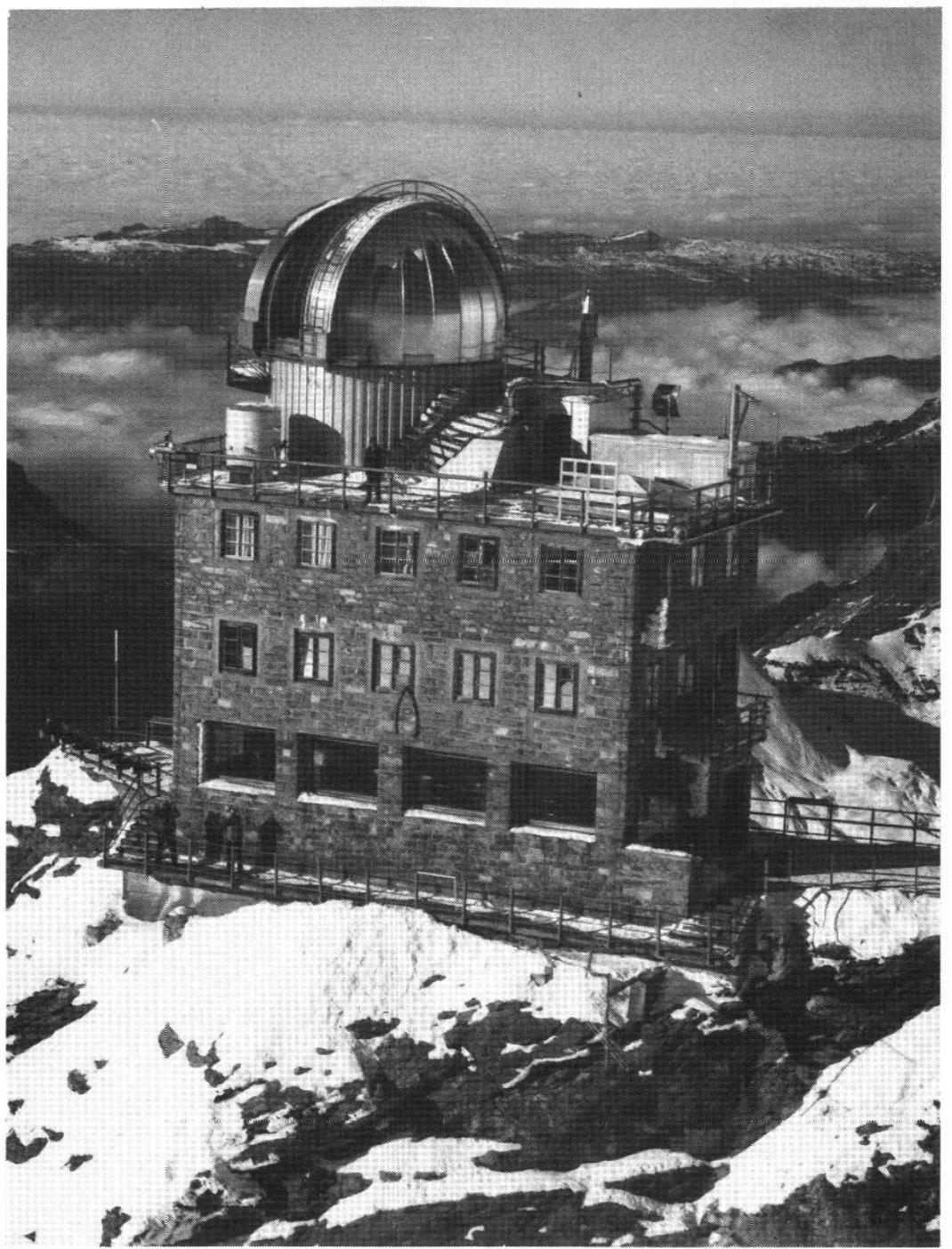


FIG. 12. — L'Observatoire du Sphinx - Photo aérienne prise en 1980.

La figure 9 reproduit une photo du coelostat et la figure 10, celle de l'intérieur du laboratoire où se trouve le grand spectromètre. Une photo du télescope de 76 cm est donnée figure 11, tandis qu'une vue de l'Observatoire du Sphinx est reproduite figure 12. Le rez-de-chaussée est réservé aux touristes. Au premier étage se trouve l'équipement décrit précédemment (schéma optique fig. 3). L'ordinateur occupe une partie du deuxième étage. Sur la terrasse, le cylindre à gauche abrite le coelostat. Dans la coupole se trouve le télescope de 76 cm et, dans le laboratoire situé en dessous de celui-ci, est installé l'interféromètre couplé à un miniordinateur.

Jusqu'à présent, les observations effectuées au Jungfraujoch ont permis d'améliorer les connaissances de la photosphère solaire et de l'atmosphère terrestre. Elles ont aussi fourni des données importantes concernant les atomes et les molécules responsables des milliers de raies d'absorption observées.

Sans aucun doute, les travaux qui seront effectués dans l'avenir continueront à augmenter nos connaissances dans les domaines mentionnés, d'autant plus que l'application de la spectroscopie par transformée de Fourier révèle des détails dans les spectres que les techniques classiques ne pouvaient pas déceler.

Notons aussi que l'étude du spectre solaire permet de repérer les « fenêtres de transmission » qui donnent la possibilité d'utiliser des satellites de télédétection des ressources terrestres et de réaliser les télécommunications par lasers entre les satellites et le sol.

* * *

Nous avons l'honneur et le plaisir de rappeler que S.M. le Roi OLAF de Norvège et S.M. le Roi BAUDOUIN ont visité la Station Scientifique du Jungfraujoch et en particulier l'Observatoire du Sphinx, respectivement en 1970 et 1971.

Les membres du groupe belge qui ont participé à ces visites en gardent un souvenir inoubliable.

* * *

Les observations au Jungfraujoch et les développements que nous avons mentionnés ont été effectués grâce à des crédits de l'Université de Liège, du Gouvernement belge (en particulier, du Ministère de

l'Éducation Nationale), des Services de Programmation de la Politique Scientifique, du Comité belge de l'Année Géophysique Internationale (devenu ensuite Comité National Belge de la Coopération Géophysique Internationale), de l'« European Office of Aerospace Research-Department of the U.S. Air Force ».

Nous remercions vivement les dirigeants de ces institutions pour leur aide précieuse. Cependant, la plupart de ces sources de financement ne nous ont accordé des subsides que pendant des périodes de temps limitées ou pour des achats particuliers.

C'est essentiellement grâce aux crédits que le Fonds National de la Recherche Scientifique nous accorde annuellement depuis de nombreuses années, soit directement soit par des contrats du Fonds de la Recherche Fondamentale Collective, que l'activité du Laboratoire du Jungfraujoch a pu se poursuivre et fournir les résultats mentionnés.

Rappelons que le FNRS est membre du Conseil de Fondation de la Station du Jungfraujoch depuis 1931. Nous rendons hommage à la mémoire de son Directeur, J. WILLEMS, qui nous a accordé, en 1950 et 1951, les crédits nécessaires à l'installation au Sphinx du premier spectromètre ainsi qu'à son utilisation. Il continua à nous aider très efficacement pour nous permettre de réaliser nos projets. Ses successeurs ont eux aussi été particulièrement attentifs à l'activité des chercheurs belges au Jungfraujoch. Nous les assurons de toute notre gratitude.

Bien entendu, aucun de nos projets n'aurait pu se réaliser sans l'accueil cordial, l'aide et l'esprit de coopération du Professeur A. de MURALT, président de la Fondation et de la Commission suisse du Jungfraujoch de 1937 à 1973, qui a dirigé la Station Scientifique de 1937 à 1969. À sa demande, il a été remplacé par le Professeur H. DEBRUNNER, qui lui aussi a toujours témoigné beaucoup d'attention et de sympathie à tous les membres du groupe belge. Nous exprimons à tous deux notre profonde reconnaissance.

* * *

C'est grâce à l'amabilité de H. Debrunner que nous avons pu nous procurer les clichés des photographies (excepté fig. 2) reproduites dans cet article. Elles ont paru dans une brochure éditée par la « Kantonalbank von Bern » à l'occasion du cinquantième anniversaire de la Station du Jungfraujoch, qui a été célébré en octobre 1981. Cette

brochure est mentionnée dans la réf. 2 de notre bibliographie. Nous remercions la Banque Cantonale de Berne d'avoir mis ces clichés à notre disposition.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MIGEOTTE, M., 1945. Sur la construction d'un spectrographe infrarouge auto-enregistreur et sur son application à l'étude du spectre du soleil et de la vapeur d'eau dans la région comprise entre 13440 Å et 15293 Å. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège*, coll. in-4°, 1^{re} série, tome 1, fasc. 3.
- [2] DELBOUILLE, L. et ROLAND, G., 1981. Spectroscopie solaire depuis la Station Scientifique du Jungfrauoch. Publié dans « 50 Jahre Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch », édité par la « Kantonalbank von Bern », *Bull.* 23, 58-68.
- [3] MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1950. Détection de monoxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre à 3580 m d'altitude. *Physica* 16, 423.
- [4] MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1951. Nouvelles raies de méthane tellurique. *Annales Astrophys.* 14, 315.
- [5] MIGEOTTE, M., 1949. The Fundamental Band of Carbon Monoxide at 4.7 μ in the Solar Spectrum. *Phys. Rev.* 75, 1108.
- [6] MIGEOTTE, M., 1948 :
 - Spectroscopic Evidence of Methane in the Earth's Atmosphere. *Phys. Rev.* 73, 519 ;
 - Methane in the Earth's Atmosphere. *Ap. J.* 107, 400 ;
 - Lines of Methanes at 7.7 μ in the Solar Spectrum. *Phys. Rev.* 74, 112.
- [7] MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1951. *L'activité de la mission scientifique belge à la Station du Jungfrauoch en 1950 et 1951*. Extrait de « Zwanzig Jahre Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch ».
- [8] MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1952. Récents progrès dans l'observation du spectre infrarouge du soleil à la Station Scientifique du Jungfrauoch (Suisse). *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège* 12, 165.
- [9] MIGEOTTE, M. et NIELSEN, A.H., 1952. Comparaison de spectres solaires enregistrés au Mont Wilson (États-Unis) et au Jungfrauoch (Suisse). *Bull. Cl. Sci. Acad. r. Belg.* 38, 366.
- [10] MOHLER, O.C., PIERCE, A.K., McMATH, R.R. and GOLDBERG, L., 1950. Photometric Atlas of the Near Infrared Solar Spectrum, λ 8465 to λ 25242. Ann Arbor, University of Michigan Press.
- [11] MIGEOTTE, M., NEVEN, L. et SWENSSON, J., 1956. The Solar Spectrum from 2.8 to 23.7 Microns. — Part I. Photometric Atlas. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège*, Special Vol. N° 1.
- [12] MIGEOTTE, M., NEVEN, L. et SWENSSON, J., 1957. The Solar Spectrum from 2.8 to 23.7 Microns. — Part II. Measures and Identifications, with « Comments on the spectra of telluric H₂O and CO₂ as observed in the solar spectrum. 2.8 to 23.7 microns » by W.S. BENEDICT. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège*, Special Vol. N° 2.

- [13] KAPLAN, L.D., MIGEOTTE, M. and NEVEN, L., 1956. 9.6 Microns Band of Telluric Ozone and Its Rotational Analysis. *J. of Chem. Phys.* **24**, 1183.
- [14] NIELSEN, A.H. and MIGEOTTE, M., 1952. Abundance and Vertical Distribution of Telluric Methane from Measurements at 3580 Meters Elevation. *Ann. Astrophys.* **15**, 134.
- [15] BENESCH, W., MIGEOTTE, M. and NEVEN, L., 1953. Investigations of Atmospheric CO at the Jungfrauoch. *J.O.S.A.* **43**, 1119.
- [16] BENESCH, W., MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1954. Sur l'abondance du monoxyde de carbone tellurique au Jungfrauoch (Suisse). *J. Phys.* **15**, 213.
- [17] BENESCH, W., MIGEOTTE, M. et NEVEN, L., 1953. *Note sur les déterminations d'abondances du CO et du N₂O telluriques.* Actes du Congrès de Luxembourg - Association Française pour l'Avancement des Sciences.
- [18] de JAGER, C., MIGEOTTE, M. and NEVEN, L., 1956. The Profile of the Brackett Alpha Line in the Solar Spectrum. *Ann. Astrophys.* **19**, 9.
- [19] *An atlas of nitrous oxide, methane and ozone infrared absorption bands.* — Part I. *The photometric records :*
 - MIGEOTTE, M., NEVEN, L. and SWENSSON, J. *Nitrous oxide and methane bands from 2.8 to 8.9 microns.*
 - VIGROUX, E., MIGEOTTE, M., NEVEN, L. and SWENSSON, J. *Ozone bands from 3.2 to 10.2 microns.**Special Vol. edited by the Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, 1957.*
- [20] VIGROUX, E., MIGEOTTE, M., NEVEN, L. and SWENSSON, J., 1958. An atlas of nitrous oxide, methane and ozone infrared absorption bands. — Part II. Measures and Identifications. *Special Vol. Institut d'Astrophysique — Université de Liège.*
- [21] GEBBIE, H.A., 1957. Detection of Submillimeter Solar Radiation. *Phys. Rev.* **107**, 1194.
- [22] DELBOUILLE, L. et MIGEOTTE, M., 1960. Infrared Solar Spectroscopy at the Jungfrauoch (Switzerland). *J.O.S.A.* **50**, 1305.
- [23] DELBOUILLE, L. et ROLAND, G., 1963. Atlas photométrique du spectre solaire de λ 7498 et λ 12016. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège*, vol. hors série n° 4.
- [24] DELBOUILLE, L., de JAGER, C. and NEVEN, L., 1960. Observations of Infrared Solar Line Profiles. *Ann. Astrophys.* **23**, 949.
- [25] de JAGER, C. et NEVEN, L., 1964. The C-multiplet near 10700 Å in the solar spectrum. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège* **9**, 215.
- [26] de JAGER, C. et NEVEN, L., 1962. The abundance of lead in the sun. *B.A.N.* **16**, 307.
- [37] NAMBA, O., 1963. The profile of the infrared He I line in solar faculae. *B.A.N.* **17**, 93.
- [28] de JAGER, C. et NEVEN, L., 1967. Observation of solar line profiles. I. The centre-to-limb variation of profiles of fifty lines in the near infrared solar spectrum. *B.A.N. Suppl. Ser. 1*, 325.

- [29] SWENSSON, J.W., BENEDICT, W.S., DELBOUILLE, L. et ROLAND, G., 1970. The Solar Spectrum from λ 7498 to λ 12016. - A Table of Measures and Identifications. *Mém. Soc. Roy. Sc. de Liège*, Special Vol. N° 5.
- [30] DELBOUILLE, L., NEVEN, L. et ROLAND, G., 1963. First results obtained with the double pass solar spectrograph at the Jungfraujoch (Switzerland). *J. quant. Spectrosc. radiat. Transfer* **3**, 189.
- [31] HERZBERG, L., DELBOUILLE, L. and ROLAND, G., 1967. A new determination of the C^{12}/C^{13} isotopic abundance ratio in the solar photosphere. *Ap. J.* **147**, 697.
- [32] DELBOUILLE, L., ROLAND, G. et NEVEN, L., 1973. *Atlas photométrique du spectre solaire de λ 3000 à λ 10.000*. Vol. spéc. édité par l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, B-4200 Cointe-Ougrée.
- [33] GREVESSE, N., 1969. *Contribution à l'étude de l'abondance des éléments dans le soleil*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [34] GREVESSE, N., 1970. Recherche sur les abondances des éléments dans l'atmosphère d'une étoile G2 V de la séquence principale : le soleil. *Mém. (in-8°) Cl. Sci. Acad. r. Belg.* **39**, fasc. 3.
- [35] SWINGS, J.P., 1969. *Recherches sur les transitions interdites présentes en absorption ou en émission dans les spectres du soleil et de certaines étoiles anormales*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [36] SWINGS, J.P., 1969. Raies interdites en absorption solaire. *Mém. (in-8°) Cl. Sci. Acad. r. Belg.* **38**, fasc. 3.
- [37] GREVESSE, N. et SWINGS, J.P., 1969. Forbidden Lines in Fe II in the Solar Photospheric Spectrum. *Astron. and Astrophys.* **2**, 28.
- [38] SAUVAL, A.J., 1972. *Contribution à l'étude des molécules dans le soleil*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [39] GREVESSE, N. et SAUVAL, A.J., 1973. A Study of Molecular Lines in the Solar Photospheric Spectrum. *Astron. and Astrophys.* **27**, 29.
- [40] BIEMONT, E., 1977. *Contribution à l'étude de probabilités de transition dipolaire électrique dans les atomes. Application à l'analyse de spectres photosphériques solaires : identifications de raies et déterminations d'abondances*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [41] BIEMONT, E. et GREVESSE, N., 1977. f-Values and Abundances of the Elements in the Sun and Stars. *Physica Scripta* **16**, 39.
- [42] GREVESSE, N., 1981. La composition chimique du Soleil. *Ciel et Terre* **97**, 193-202.
- [43] PECKER, J. Cl., 1981. *Champs de vitesses et champs magnétiques à petite échelle dans l'atmosphère solaire*. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences (Institut de France) - Deuxième semestre, p. 15.
- [44] ZANDER, R., 1970. Observations, par ballon stratosphérique, du spectre solaire à 1,85 microns avec un pouvoir de résolution de 135.000. *Bull. Cl. Sci. Acad. r. Belg.* **56**, 729.
- [45] ZANDER, R., 1975. Présence de HF dans la stratosphère supérieure. *C.R. Acad. Sci. Paris*, série B, **281**, 213.
- [46] ZANDER, R., ROLAND, G. et DELBOUILLE, L., 1977. La présence d'acide

- fluorhydrique dans la stratosphère confirmée par des observations à partir du sol. *C.R. Acad. Sci. Paris, série B*, **284**, 111.
- [47] ZANDER, R., ROLAND, G. et DELBOUILLE, L., 1977. Confirming the Presence of Hydrofluoric Acid in the Upper Atmosphere. *Geophys. Res. Letters* **4**, 117.
- [48] ROLAND, G., 1965. *Spectroscopie par transformation de Fourier*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [49] PINARD, J., 1967. Spectromètre de Fourier à très haute résolution. *Journ. Phys.* **28**, C2, 136.
- [50] PINARD, J., 1969. Réalisation d'un spectromètre par transformée de Fourier, à très haut pouvoir de résolution. *Ann. Phys.* **4**, 147.
- [51] HALL, D.N.B., 1974. *An Atlas of Infrared Spectra of the Solar Photosphere and of Sunspot Umbra, in the Spectral Intervals 4040-5095, 5550-6700, 7400-8790 cm⁻¹*. Kitt Peak National Observatory, Tucson, Arizona.
- [52] MALBROUCK, R., 1977. *Spectroscopie à très haute résolution par transformation de Fourier - Application à l'étude du spectre solaire*. Thèse de doctorat. Université de Liège.
- [53] MALBROUCK, R., 1977. Abondance du méthane tellurique déterminée à partir de l'analyse de la bande $2\nu_3$. *Bull. Cl. Sci. Acad. r. Belg.* **LXIII**, 773.
- [54] BRAULT, J.W., 1979. Solar Fourier Transform Spectroscopy. Proceedings of the JOSO Workshop Nov. 7-10, 1978. *Osservazioni e memorie dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri* **106**, 33.
- [55] DELBOUILLE, L., ROLAND, G., BRAULT, J. and TESTERMAN, L., 1981. *Photometric Atlas of the Solar Spectrum from 1,850 to 10,000 cm⁻¹*. Kitt Peak National Observatory, Tucson, Arizona.