

7967 C.

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

FACULTÉ DES SCIENCES

SUR LA CONSTRUCTION

D'UN

SPECTROGRAPHE INFRA-ROUGE AUTO-ENREGISTREUR

A GRAND POUVOIR DE RÉOLUTION

ET SUR SON APPLICATION A L'ÉTUDE DU SPECTRE DU SOLEIL

ET DE LA VAPEUR D'EAU

DANS LA RÉGION COMPRISE ENTRE 13440 Å ET 15293 Å

THÈSE

POUR L'AGRÉGATION DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

PAR

M. MIGEOTTE

Assistant à l'Université de Liège

Associé du Fonds National Belge de la Recherche Scientifique

BRUXELLES

M. HAYEZ, IMPRIMEUR DE L'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE

112, rue de Louvain, 112

(Domicile légal: rue de la Chancellerie, 4)

1945





7967 C.

Le présent mémoire peut être livré à l'impression.

Liège, le 13 septembre 1945.

*Le Secrétaire de la Faculté,
Secrétaire du Jury,*

A. DE RASSENFOSSE.

*Le Doyen de la Faculté
des Sciences,
Président du Jury,*

J. PAUWEN.

Article 6 de l'arrêté royal du 10 mars 1931 appliquant la loi du 21 mai 1929 sur la collation des grades académiques et le programme des examens universitaires :

« En aucun cas, les opinions de l'auteur ne peuvent être considérées, par le fait de l'autorisation d'impression de la dissertation, comme étant celles du Jury ou de l'Université. »

SUR LA CONSTRUCTION
D'UN
SPECTROGRAPHE INFRA-ROUGE AUTO-ENREGISTREUR
A GRAND POUVOIR DE RÉOLUTION
ET SUR SON APPLICATION A L'ÉTUDE DU SPECTRE DU SOLEIL
ET DE LA VAPEUR D'EAU
DANS LA RÉGION COMPRISE ENTRE 13440 Å ET 15293 Å

THÈSE
POUR L'AGRÉGATION DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
PRÉSENTÉE
A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

PAR

M. MIGEOTTE

Assistant à l'Université de Liège
Associé du Fonds National Belge de la Recherche Scientifique

BRUXELLES

M. HAYEZ, IMPRIMEUR DE L'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE

112, rue de Louvain, 112

(Domicile légal: rue de la Chancellerie, 4)

—
1945



THÈSE
Extrait des *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*.
Collection in-4°, — Première série. — T. I, fasc. 3.

Je dédie ce mémoire

à Monsieur le Professeur M. DEHALU

et

à Monsieur le Professeur P. SWINGS,

pour tout l'intérêt qu'ils n'ont cessé de porter à mes recherches.

AVANT-PROPOS

Dès 1933, le Prof^r P. SWINGS attirait notre attention sur l'intérêt des recherches dans le domaine spectral infra-rouge. Il nous signalait en particulier l'importance d'une étude approfondie du spectre solaire, au delà de la limite de sensibilité des émulsions photographiques. Pour faire progresser les travaux entrepris à ce sujet, il s'agissait tout d'abord d'effectuer de nouvelles observations en utilisant un spectrographe ayant un pouvoir de résolution aussi élevé que possible.

La plus puissante des installations infra-rouges se trouvait alors à l'Université de Michigan (É.-U.). Elle avait été mise au point par J. D. HARDY, en 1931. Une bourse de voyage de la « Belgian American Education Foundation » nous permit, en 1934-1935, de poursuivre des recherches dans cette Université, sous la direction des Prof^{rs} H. M. RANDALL et E. F. BARKER. Pendant une grande partie de notre séjour, nous nous sommes servi du spectrographe de HARDY. Bien que cet appareil fût excellent au point de vue optique, le temps nécessaire à l'obtention d'un spectre était beaucoup trop long pour permettre l'étude du spectre solaire dans de bonnes conditions d'observation. Rentré en Belgique, nous avons alors élaboré les plans d'une installation spécialement destinée à cette recherche. Tout en conservant un pouvoir de résolution aussi élevé que celui de l'appareil de HARDY, nous nous sommes proposé de réduire considérablement le temps nécessaire aux observations, en rendant l'installation complètement automatique. Nous avons aussi prévu une meilleure stabilité et une plus grande facilité pour le réglage et la prise de spectres dans différents domaines. D'autre part, comme l'interprétation du spectre solaire conduit nécessairement à des recherches en laboratoire et comme de nombreux problèmes de physique et de physico-chimie peuvent être résolus par la méthode infra-rouge, nous avons adapté l'appareil à de telles études; en particulier, la construction est prévue pour que le système

optique puisse fonctionner de 1 à 25 μ , dans une atmosphère débarrassée de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique.

Nos plans furent terminés en décembre 1936. Conseillé par le Prof^r P. SWINGS, nous les avons soumis à M. O. A. ANKERSMIT, directeur commercial, et à M. ir. W. REICHERT, directeur technique de la firme Kipp en Zonen de Delft (Hollande). Ceux-ci acceptèrent immédiatement de réaliser nos projets. Les crédits nécessaires furent obtenus grâce à l'appui du Prof^r M. DEHALU, alors administrateur-inspecteur de l'Université de Liège.

L'installation du spectrographe nécessitait la construction spéciale d'un local à température constante. De plus un coelostat et une « cheminée solaire » étaient nécessaires pour entreprendre l'étude projetée. C'est aussi au Prof^r M. DEHALU ainsi qu'au Prof^r P. SWINGS que nous devons la réalisation de ces nouvelles constructions.

Au point de vue instrumental, nous avons été considérablement retardé par les événements internationaux. En avril 1940, nous étions attendu en Hollande pour effectuer le premier réglage du spectrographe. Nous n'avons pu nous y rendre qu'en février 1941. En septembre de la même année, l'appareil était installé à Liège, mais par suite des difficultés d'importation, les derniers accessoires ne nous sont parvenus qu'en juillet 1942. Le 31 du même mois, nous obtenions le premier enregistrement du spectre solaire dans la région comprise entre 14770 et 14900 Å. Celui-ci révélait 22 raies, alors que les dernières observations dans ce domaine, effectuées à l'Observatoire du Mont Wilson, en 1929, n'en signalaient que 7.

Certain de l'efficacité de notre installation, nous nous sommes alors efforcé d'améliorer la précision des mesures par une étude systématique de l'instrument.

Les meilleures observations du spectre solaire ont été obtenues entre février 1943 et janvier 1944. Durant cette période, nous avons mis à profit toutes les journées ensoleillées, malheureusement trop peu nombreuses en Belgique. Très souvent, nos séances d'observations furent interrompues par des nuages. Toutefois, les enregistrements pris jusqu'à présent s'étendent de 13440 à 15960 Å. Ils nous ont permis de découvrir 420 nouvelles raies.

En vue de leur identification, nous avons entrepris une nouvelle étude de la structure fine de la bande d'absorption de la vapeur d'eau, située à 1,38 μ . A notre connaissance (*) les dernières expériences à ce sujet ont été effectuées aux États-Unis en 1932, à l'aide d'un spectrographe à grand pouvoir séparateur. Elles révè-

(*) Cf. note (§) en bas de la page 91.

laient 45 raies entre 13440 et 14240 Å. Dans la même région, nous en observons 162. De plus, nous sommes parvenu à étendre le domaine d'expérimentation jusqu'à 15070 Å. L'installation utilisée nous a permis de découvrir entre 13440 et 15070 Å, 300 raies dues à la molécule H₂O. Dans le domaine spectral considéré, ces raies nous ont donné la possibilité d'identifier 80 % de celles qui ont été observées dans le spectre du soleil.

En janvier 1944, malgré l'article 56 de la Convention de La Haye, l'armée allemande réquisitionna l'Institut d'Astrophysique de Coïnte. Après de nombreuses discussions et sous menace de destruction de tous les instruments, nous avons été obligé de démonter complètement nos installations et de quitter l'Institut.

*
**

Comme nos résultats dépendent essentiellement de la construction du spectrographe, la première partie de cet exposé est principalement consacrée à la description, au réglage et à l'étude du nouvel instrument.

Dans la deuxième partie, nous nous occupons spécialement du spectre du soleil et de la vapeur d'eau dans le domaine spectral compris entre 13440 et 15293 Å. Les enregistrements obtenus dans cette région sont reproduits planches 11 à 25, tandis que les hologrammes de C. G. ABBOT et H. B. FREEMAN (Pl. 26) permettent de juger immédiatement du progrès réalisé dans l'étude du spectre solaire. La comparaison de la région 14, planche 24, et de la région 14, planche 26, est particulièrement suggestive.

Nous donnons les longueurs d'onde des nouvelles raies observées dans le tableau V, l'erreur quadratique moyenne étant de l'ordre de $\pm 0,7$ Å.

Par suite des événements internationaux, les relations scientifiques ont été interrompues avec l'Angleterre et les États-Unis depuis mai 1940. Elles n'étaient pas encore normalement rétablies lors de la rédaction de ce mémoire. Toutefois, nous nous sommes efforcé de nous tenir au courant des progrès réalisés.

*
**

Ainsi que nous l'avons signalé dans cet avant-propos, l'acquisition du spectrographe, du coelostat et des accessoires a pu s'effectuer grâce à l'appui des Prof^{rs} M. DEHALU et P. SWINGS. Nous leur en exprimons notre profonde gratitude.

Nous sommes aussi très reconnaissant au Prof^r J. L. PAUWEN, pour les facilités qu'il nous a accordées dans des circonstances particulièrement difficiles,

ainsi qu'aux Prof^{rs} H. M. RANDALL et E. F. BARKER de l'Université de Michigan (É.-U.), pour l'accueil cordial qui nous a été réservé dans leurs laboratoires, où, sous leur compétente direction, nous avons été initié à la technique de la spectroscopie infra-rouge, à grande dispersion.

Que M. ir. W. REICHERT, de la firme Kipp en Zonen, trouve ici nos remerciements pour ses judicieux conseils lors de la construction du spectrographe.

Nous prions le D^r B. ROSEN de croire à notre affectueuse gratitude. Son amical intérêt, ses critiques et ses conseils nous furent particulièrement précieux.

Pendant l'installation et le réglage du coelostat et du spectrographe, ainsi qu'au cours de nos observations, nous avons été efficacement assisté par M. DENOOZ, préparateur technicien. Nous tenons à signaler ici son dévouement et ses heureuses initiatives. Nous le remercions vivement pour les nombreux services qu'il nous a rendus.

Nous sommes en outre reconnaissant au Gouvernement belge, à la Belgian American Educational Foundation, au Fonds National Belge de la Recherche Scientifique ainsi qu'au Patrimoine de l'Université de Liège, pour les subsides et les bourses de voyage qui nous ont été accordés.

PREMIÈRE PARTIE

SUR LA CONSTRUCTION D'UN SPECTROGRAPHE INFRA-ROUGE

AUTO-ENREGISTREUR, A GRAND POUVOIR DE RÉOLUTION

CHAPITRE I

QUELQUES PARTICULARITÉS DE LA TECHNIQUE INFRA-ROUGE

Le spectre infra-rouge s'étend depuis le rouge extrême ($0,76\mu$) jusqu'aux ondes électriques proprement dites, ayant des longueurs d'onde de plusieurs centaines de microns. En général, ce vaste domaine spectral est divisé en trois parties : la région photographique ou infra-rouge très proche (depuis le visible jusqu'à $1,35\mu$); l'infra-rouge proche (de $1,35$ à 25μ environ) et l'infra-rouge lointain (de 25 à 300μ environ). Dans le présent travail nous nous occuperons spécialement de l'infra-rouge proche.

§ 1. Moyens de dispersion

Prismes et réseaux peuvent être utilisés pour disperser les radiations de 1 à 25μ .

Pour obtenir le pouvoir séparateur maximum, la matière servant à la fabrication des prismes doit être choisie suivant la région à étudier. Le verre (flint) est employé du visible à 2μ ; le quartz, du visible à 3μ ; le fluorure de lithium, de 1μ à 5μ ; la fluorine, de $2,5\mu$ à 9μ ; le sel gemme, de 8μ à 16μ ; la sylvine (KCl), de 15μ à 20μ et le bromure de potassium, de 19μ à 27μ . Notons toutefois que toutes ces substances sont transparentes à partir du visible. Elles peuvent donc être utilisées, vers les courtes longueurs d'onde, en dehors des limites qui viennent d'être mentionnées, lorsque le pouvoir séparateur maximum ne doit pas être atteint. Le cas se présente en particulier dans les monochromateurs qui précèdent les spectrographes à réseaux.

Durant ces dernières années, des recherches ont été effectuées en vue d'obtenir de gros cristaux synthétiques de KCl et de KBr, suffisamment clairs et homo-

gènes pour y tailler des prismes. D'excellents résultats ont été obtenus à ce sujet, principalement à l'Université de Göttingen (All.) (1, 2); au laboratoire Kodak (É.-U.) (3), ainsi qu'à l'Université de Michigan (É.-U.) (4) (*).

En général, le pouvoir de résolution des spectrographes infra-rouges à prismes est de l'ordre de la centaine. En d'autres termes, ces appareils ne permettent pas la séparation de raies distantes de moins de 10 cm^{-1} . Ils ne peuvent révéler la structure fine de la plupart des bandes d'absorption. Pour mettre cette structure en évidence, il faut recourir à l'utilisation de réseaux. Actuellement, les plus puissants spectrographes permettent de séparer, dans tout le domaine infra-rouge, des raies distantes de 1 à $0,5 \text{ cm}^{-1}$. Vers $1,5 \mu$, leur pouvoir de résolution pratique est de l'ordre de 10.000.

Par suite de la faible intensité du rayonnement dans l'infra-rouge, l'emploi de réseaux ordinaires se limite à environ 5μ . Pour étudier le domaine de plus grandes longueurs d'onde, R. W. Wood (5) proposa, dès 1910, l'utilisation de réseaux « à échelottes ». La figure 1 représente une coupe effectuée perpendiculairement aux traits d'un tel réseau.

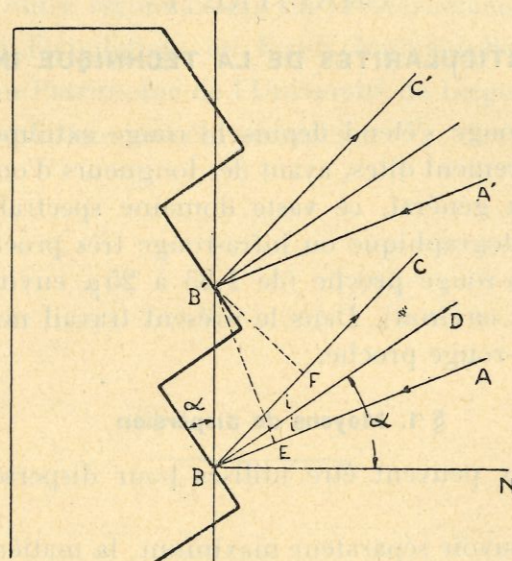


FIG. 1.

Le tracé « à échelottes » permet de concentrer dans un ordre déterminé une grande partie de l'énergie incidente. Ceci se comprend aisément.

Soient B et B' deux points correspondants successifs du réseau. Supposons qu'un faisceau de rayons parallèles tombe sur le réseau suivant la direction AB. La grande face d'une raie agissant seule réfléchit un maximum d'énergie dans la

(*) Note ajoutée au cours de l'impression : Actuellement, on peut se procurer commercialement, à la firme Harshaw [Cleveland. (E-U)], des prismes de 60° en LiF, NaCl ou KBr, les faces ayant une longueur de 150 mm et une hauteur de 100 mm.

direction BC, telle que l'angle de réflexion sur cette face égale l'angle d'incidence. En ce qui concerne les faisceaux de rayons diffractés, l'ordre spectral ayant BC comme direction moyenne sera donc plus intense que les autres. Dans le premier ordre, cette direction correspond à la longueur d'onde $\Lambda = EB + BF$, B'E et B'F étant les perpendiculaires abaissées de B' respectivement sur AB et BC. La valeur de Λ localise le « blaze » du réseau. Nous adopterons ce mot anglais dans la suite de notre exposé.

Comme la largeur des faces réfléchissantes est de l'ordre de grandeur de Λ , l'énergie est diffractée dans un grand angle. De ce fait, un réseau déterminé peut être utilisé dans un domaine spectral d'une certaine étendue de chaque côté de Λ . Dans le chapitre III, § 2d, nous mentionnons les régions spectrales que nous nous proposons d'étudier avec les différents réseaux prévus. Nous donnons, au chapitre III, § 7, la formule permettant de localiser le « blaze ».

Bien que les résultats obtenus en 1910 aient été fort encourageants (6), les premiers réseaux laissaient à désirer, la surface à graver n'étant pas suffisamment plane. Au cours de ces dernières années, le progrès le plus important de la technique infra-rouge à grande dispersion a précisément consisté dans la réalisation de réseaux à échelottes qui fussent en même temps de grandes dimensions et de bonne qualité optique. Ainsi que le signale H. M. RANDALL (7), ce progrès a été réalisé grâce à la persévérance et à l'habileté du Prof^r E. F. BARKER. Pendant plusieurs années, celui-ci utilisa une des machines originales de ROWLAND prêtée par l'Université Johns Hopkins (É.-U.). Une nouvelle machine à graver fut ensuite construite à l'Université de Michigan (É.-U.) par le capitaine A. DE KHOTINSKY. Elle permet de graver des réseaux de 1 à 567 traits par mm. (25 à 14.400 traits par pouce), la surface gravée pouvant atteindre $25 \times 50 \text{ cm}$. C'est la seule machine qui donne la possibilité d'obtenir d'aussi grands réseaux; ceux-ci sont réservés aux recherches dans l'infra-rouge lointain (8, 9). Grâce à l'obligeance du Prof^r RANDALL, nous avons pu obtenir des réseaux mesurant $17,5 \times 22,5 \text{ cm}$. (voir Pl. 4). A notre connaissance, ce sont les plus grands réseaux utilisés jusqu'à présent pour des recherches dans l'infra-rouge proche.

Habituellement, la machine de l'Université de Michigan est employée pour tailler de grands réseaux ayant au plus 188 traits par millimètre. Pour des réseaux à échelottes à plus de traits, mais de plus petites dimensions, R. W. Wood a obtenu d'excellents résultats à l'Université Johns Hopkins. L'Observatoire du Mont Wilson utilise actuellement un réseau de Wood à 600 traits par millimètre, ayant comme dimensions $10 \times 16 \text{ cm}$. et concentrant 85 % de l'énergie incidente dans un ordre déterminé. Dans une correspondance privée, le Prof^r R. W. Wood annonçait, dès 1938, qu'il était parvenu à concentrer 95 % de l'énergie incidente dans un ordre déterminé.

§ 2. Utilisation de miroirs métallisés

A cause de leur manque d'achromatisme et de l'opacité des substances habituellement employées à leur fabrication, on a dû renoncer complètement à l'usage

des lentilles dans les spectrographes destinés à étudier le domaine infra-rouge au delà de 2μ environ. Elles ont été remplacées par des miroirs métalliques ou métallisés. Ceux-ci présentent l'avantage d'être achromatiques et utilisables dans tout le domaine infra-rouge. De plus, certains métaux ont des pouvoirs réflecteurs qui dépassent 90 % à 1μ et qui tendent vers 100 % lorsque la longueur d'onde augmente. A titre d'exemple, signalons que d'après J. STRONG (10), pour huit réflexions normales sur de l'argent poli, la perte de lumière est de 8 % à 10μ et de 4 % à 20μ . Dans l'infra-rouge, l'aluminium a un pouvoir réflecteur presque aussi élevé que celui de l'argent et il présente le grand avantage de se ternir beaucoup moins vite. C'est ce qui justifie l'usage de plus en plus répandu de miroirs en verre recouverts d'aluminium ou d'un alliage de celui-ci avec d'autres métaux. Le dépôt s'effectue généralement par évaporation dans le vide.

§ 3. Moyens de détection

Différents moyens sont utilisés pour mettre le rayonnement infra-rouge en évidence. Alors que certaines cellules photoélectriques sont sensibles jusqu'à $1,3\mu$, la plaque photographique permet actuellement d'atteindre $1,35\mu$. La phosphorographie, qui utilise l'action antagoniste des radiations ultra-violettes et infra-rouges vis-à-vis de substances phosphorescentes, donne la possibilité d'avancer jusqu'à 2μ , mais le phénomène est très sélectif et d'application délicate. Plus récemment, grâce à l'évaporographie, M. CZERNY et P. MOLLET (11, 12) sont parvenus à détecter des radiations jusqu'à 10μ environ. Cette méthode permet la prise de spectres au delà de $1,35\mu$ avec une rapidité dépassant celle atteinte par tout autre procédé. Toutefois, l'évaporographie n'est pas encore suffisamment au point pour être utilisée couramment.

Habituellement, pour parcourir toute la gamme des ondes infra-rouges, on recourt au bolomètre, à la pile thermo-électrique, au radiomètre ou au radiomicro-mètre. Ces récepteurs permettent de mesurer directement l'intensité du rayonnement incident. Actuellement la pile thermo-électrique paraît de plus en plus utilisée dans les spectromètres infra-rouges, par suite des progrès réalisés dans sa construction ainsi que dans celle des galvanomètres et des systèmes amplificateurs.

§ 4. Principe technique des spectromètres infra-rouges

AVANTAGES DE L'ENREGISTREMENT AUTOMATIQUE

Habituellement, dans les spectromètres infra-rouges utilisés au delà de $1,35\mu$, le spectre défile sur un récepteur fixe. Un galvanomètre est placé dans le circuit de ce dernier et les déviations galvanométriques sont notées ou enregistrées.

Dans le procédé « point par point », on donne au prisme ou au réseau différentes positions régulièrement espacées et l'on mesure les déviations galvanométriques pour chacune de ces positions.

Dans le procédé « par enregistrement », le système dispersif est généralement animé d'une rotation continue. Cependant, certains auteurs (13, 14, 15, 16, 16_a) ont aussi utilisé dans ce cas une rotation discontinue. Cette dernière méthode élimine l'incertitude qui peut résulter d'une dérive du zéro, d'un changement d'intensité de la source, d'une variation de l'absorption provenant de la vapeur d'eau ou de l'anhydride carbonique de l'atmosphère. Toutefois, elle est beaucoup plus lente que l'enregistrement continu, ce qui limite son utilisation.

L'enregistrement continu et automatique fut utilisé, pour la première fois, par S. P. LANGLEY (17) dès la fin du XIX^e siècle. En principe, sa méthode subsiste toujours, car elle présente des avantages incontestables.

Étant plus rapide que le procédé « point par point », l'enregistrement continu permet la prise de spectres dans de meilleures conditions expérimentales. En un temps relativement court, la même région spectrale peut être enregistrée plusieurs fois, ce qui donne la possibilité d'augmenter la précision des mesures et d'éliminer facilement toute influence extérieure.

On obtient, d'autre part, des résultats objectifs; l'interprétation de l'expérimentateur ne peut intervenir comme dans le procédé « point par point ».

En général, l'obtention des conditions expérimentales optimales nécessite de longs tâtonnements. Par exemple, pour étudier les spectres d'absorption des gaz, il faut régler la pression dans le tube pour obtenir une absorption adéquate au but poursuivi. L'enregistrement automatique facilite beaucoup ces expériences préliminaires.

Enfin, pour certaines observations, telles que l'étude du spectre solaire, ce procédé est non seulement très utile, mais devient pratiquement nécessaire.

CHAPITRE II

CONSIDÉRATIONS HISTORIQUES ET CRITIQUES SUR LA CONSTRUCTION DES PRINCIPAUX SPECTROMÈTRES INFRA-ROUGES, A GRAND POUVOIR DE RÉOLUTION.

Ce fut F. PASCHEN (18, 19, 20) qui parvint le premier à utiliser les réseaux jusqu'à 5μ de manière à combiner le maximum de dispersion avec une grande exactitude de mesures. Dès 1908, en employant un réseau plan de ROWLAND ayant 569 traits par millimètre (14.450 traits par pouce) et une surface gravée de 48×35 mm., PASCHEN mesura la position de raies atomiques jusqu'à $2,7\mu$ avec une précision qui, pour les raies les plus fines, atteignait quelques dixièmes d'angström (18). H. M. RANDALL (21), alors élève de PASCHEN, parvint jusqu'à $3,1\mu$ avec le même réseau et une installation un peu transformée. PASCHEN (20) poursuivit ses recherches jusqu'à 5μ avec un réseau concave ayant un rayon de courbure de 162,5 cm. Ce réseau était taillé sur une longueur de 13 cm. et portait 142,1 traits par millimètre. Grâce à son utilisation, des longueurs d'onde furent mesurées de 3 à 5μ avec une précision variant de 3 à 20 Å, selon la qualité des

raies mesurées. Ces travaux, effectués de 1908 à 1910 à l'Université de Tübingen (All.), conduisirent à la découverte de nombreuses séries spectrales et à l'établissement du principe de combinaison de RITZ. Depuis lors, les progrès effectués dans la construction des spectromètres infra-rouges, à grand pouvoir séparateur, furent réalisés aux États-Unis.

Dans le premier chapitre, nous avons signalé que R. W. WOOD (5) grava ses premiers réseaux à échelottes en 1910. Ils furent tout d'abord utilisés dans l'installation de TROWBRIDGE (22, 6).

En 1918, W. W. SLEATOR (23) mit au point un spectromètre prisme-réseau, qui lui permit de déceler la structure compliquée des bandes d'absorption de la vapeur d'eau, situées à 1,3 μ ; 1,8 μ ; 2,6 μ et 6 μ . Des spectromètres furent ensuite construits en Angleterre, sur le même modèle, par C. P. SNOW et A. M. TAYLOR (24), puis par la firme Hilger de Londres (cf., par exemple, Catalogue D, 1936).

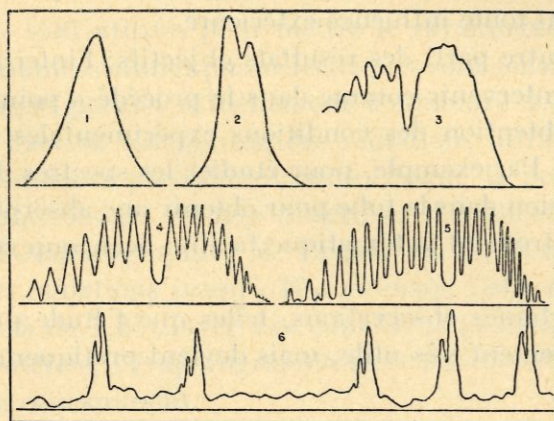


FIG. 2. — Bandes de HCl à 3,5 μ (*).

1. ANGSTRÖM et PALMAER (27), 1893.
Largeur de fente effective, 4.000 Å.
2. BURMEISTER (28), 1914. — Fente, 400 Å.
3. VON BAHR (29), 1914. — Fente, 100 Å.
4. BRINSMADE et KEMBLE (30), 1917. — Fente, 70 Å.
5. RANDALL et IMES (31, 32), 1919. — Fente, 39 Å.
6. MEYER et LEVIN (33), 1929. — Fente, 7,5 Å.

Les grands réseaux à échelottes réalisés par E. F. BARKER furent utilisés dans une nouvelle installation mise au point, en 1929, par C. F. MEYER (25, 26). Les dimensions des réseaux habituellement employés étaient alors de 18 x 12 cm. Le spectromètre de MEYER permit d'effectuer des recherches à grande dispersion dans la région spectrale comprise entre 8 et 15 μ . De plus, son pouvoir de résolution dépassait celui de toutes les installations précédentes. Les courbes reproduites figure 2 rendent compte des progrès réalisés jusqu'alors à ce sujet. Elles représentent le spectre d'absorption de la molécule HCl, étudié avec différents spectro-

(*) Ces courbes sont données par H. M. RANDALL (8).

graphes, dans la région 3,5 μ . Pour chaque courbe, les longueurs d'onde sont portées en abscisses et les pourcentages d'absorption, en ordonnées. Alors que les observations d'ANGSTRÖM et PALMAER ne révèlent qu'un seul maximum d'absorption, le spectre, obtenu par MEYER et LEVIN, permet de déceler, non seulement une structure fine, mais de plus, un dédoublement de chaque raie de cette structure. Ce dédoublement est dû aux isotopes du chlore Cl₃₅ et Cl₃₇. La différence entre les nombres d'onde des raies de chaque doublet est en moyenne de 2 cm⁻¹.

Les courbes de 1 à 4 ont été obtenues avec des spectromètres à prismes; les suivantes, avec des spectromètres à réseaux. La courbe 5 est due à l'installation de SLEATOR; la courbe 6, à celle de MEYER. Dans chaque cas, nous avons indiqué la largeur de fente effective, c'est-à-dire l'intervalle spectral compris dans la fente de sortie du spectromètre.

La figure 3 reproduit le schéma optique de l'installation de MEYER.

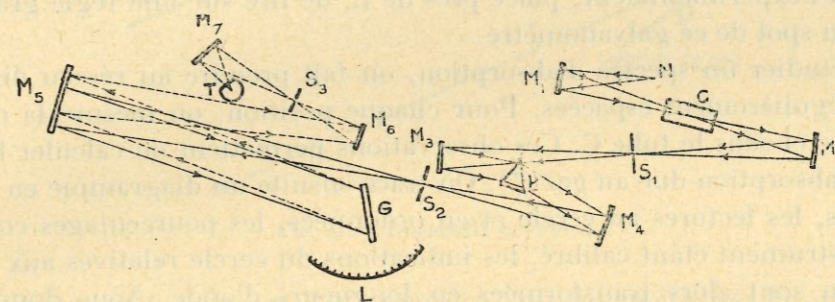


FIG. 3. — Schéma optique du spectromètre de MEYER.

Un miroir M₁ forme une image d'un filament de NERNST N, à l'intérieur d'un tube d'absorption C, qui contient le gaz à étudier. Le miroir M₂ concentre ensuite les radiations sur la fente S₁ d'un monochromateur constitué par le miroir M₃, le prisme P et le miroir M₄. Un spectre, à faible dispersion, se forme dans le plan de la fente S₂. Les radiations traversant cette fente tombent sur le miroir concave M₅, qui envoie, vers le réseau G, le faisceau rendu parallèle. Supposons que G soit orienté de manière qu'une partie du faisceau diffracté dans le premier ordre soit renvoyée sur M₅. Les rayons lumineux sont ensuite dirigés vers le miroir plan M₆ et un spectre, à grande dispersion, se forme dans le plan de la fente de sortie S₃. Les radiations traversant S₃ sont concentrées par le miroir M₇ sur une pile thermo-électrique T, reliée à un galvanomètre.

Le prisme et le réseau peuvent tourner autour d'axes verticaux. Un cercle gradué L permet de repérer la position du réseau. Le tube d'absorption peut être facilement retiré du faisceau et replacé dans sa position initiale. Une fenêtre mobile, placée devant S₁, donne la possibilité d'intercepter la lumière entrant dans le monochromateur. Toutes les autres parties de l'installation sont fixes. Lorsque le réseau tourne, le spectre défile sur le récepteur.

Le monochromateur a pour effet d'éliminer, autant que possible, les radiations qui pourraient perturber les résultats. Supposons, par exemple, qu'une étude

de la région 6μ soit envisagée. Si le monochromateur n'existait pas, au premier ordre de la région 6μ viendrait se superposer le deuxième ordre de 3μ et le troisième ordre de 2μ . Comme dans les sources habituellement employées, les intensités des radiations 3μ et 2μ sont beaucoup plus grandes que celle de 6μ , toute étude dans cette région serait rendue impossible. Dans le cas qui nous intéresse, l'utilisation du monochromateur permet l'admission, dans le spectromètre à réseau proprement dit, d'un domaine de longueurs d'onde comprenant 6μ , à l'exclusion des radiations 3μ et 2μ . La position du prisme ainsi que la largeur de la fente S_1 sont réglées suivant la région à étudier. Le monochromateur diminue aussi le danger de contamination du spectre qui pourrait résulter de radiations diffusées à la surface des miroirs M_5 et M_6 et à la surface du réseau.

Les déviations du galvanomètre, relié à la pile thermo-électrique, sont amplifiées optiquement. Le deuxième galvanomètre utilisé à cet effet est installé pour permettre à l'expérimentateur, placé près de L, de lire sur une règle graduée les positions du spot de ce galvanomètre.

Pour étudier un spectre d'absorption, on fait prendre au réseau différentes positions régulièrement espacées. Pour chaque position, on mesure la déviation du spot avec et sans le tube C. Ces observations permettent de calculer les pourcentages d'absorption due au gaz (*). On trace ensuite un diagramme en portant, en abscisses, les lectures au cercle et en ordonnées, les pourcentages correspondants. L'instrument étant calibré, les indications du cercle relatives aux maxima d'absorption sont alors transformées en longueurs d'onde. Nous donnons des détails à ce sujet au chapitre III, § 7.

A l'exception des spectromètres de PASCHEN et de TROWBRIDGE, tous les appareils mentionnés jusqu'ici utilisaient le schéma optique de MEYER, au moins en ce qui concerne la partie principale du montage, c'est-à-dire celle qui est comprise entre les fentes S_2 et S_3 . La même disposition des pièces optiques a encore été employée à partir de 1935 par A. H. NIELSEN, H. H. NIELSEN et W. B. STEWARD (34, 35) à l'Université d'Ohio (É.-U.). Toutefois, dès 1930, R. B. BARNES et A. H. PFUND (36) attirèrent l'attention sur l'importance des défauts d'astigmatisme et de coma introduits dans le spectre formé sur S_3 par l'utilisation du miroir M_5 en dehors de son axe optique. Ces défauts sont surtout préjudiciables lorsque l'ouverture du spectrographe atteint $f/4$.

Déjà en 1929, BARKER et MEYER (26) avaient signalé une amélioration possible du système optique en utilisant en M_5 un miroir parabolique, taillé « hors de son axe », mais la fabrication de tels miroirs est difficile à réaliser avec une précision suffisante.

En 1931, BARNES (37) construisit un nouveau spectromètre en s'inspirant du système optique adopté par PFUND (38), dans un spectromètre à prisme, de grande

(*) Il faut aussi tenir compte des pertes d'énergie dues aux fenêtres du tube d'absorption ou utiliser, lors de la prise du spectre, un tube rempli du gaz à étudier et un tube vide ayant des fenêtres analogues à celles du premier.

ouverture ($f/2$). Dans cet instrument, les miroirs paraboliques sont utilisés sur leur axe, grâce à l'emploi de miroirs plans auxiliaires (fig. 4).

La construction de BARNES se révéla excellente au point de vue optique, mais l'appareil ne pouvait utiliser que des réseaux de grandeur moyenne.

La même année, J. D. HARDY (39) réunit les qualités du schéma optique de BARNES et l'augmentation du pouvoir séparateur résultant de l'emploi de grands

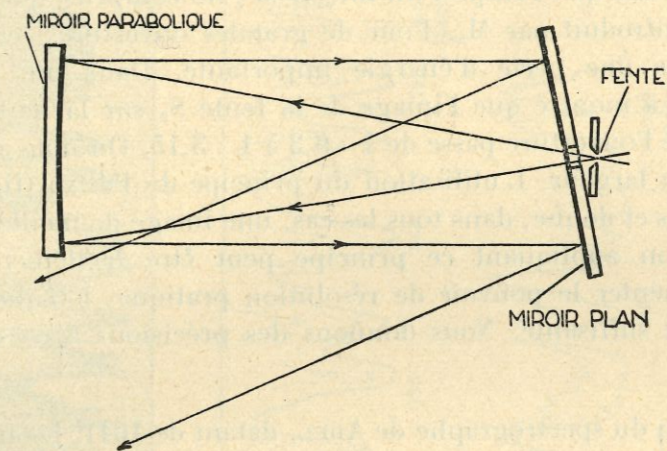


FIG. 4. — Dispositif de PFUND.

réseaux dans une installation, qui est restée une des meilleures jusqu'à présent. La même disposition des miroirs a ensuite été employée par G. B. B. M. SUTHERLAND (40) et ses élèves, à l'Université de Cambridge (Angl.) à partir de 1939, et par A. ADEL (41), à l'Observatoire Lowell [Flagstaff. Arizona (É.-U.)] à partir de 1941.

Nous avons aussi adopté le dispositif de PFUND dès 1936, lors de l'établissement des plans du spectrographe décrit dans ce mémoire.

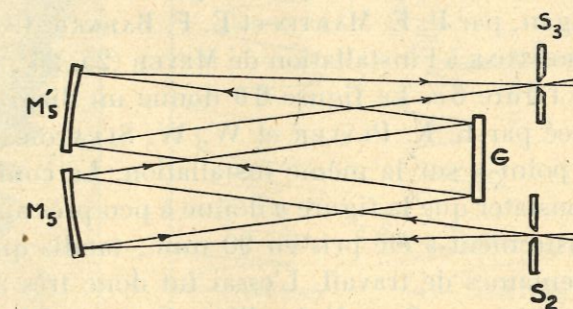


FIG. 5.

Au sujet de l'optique des spectromètres à miroirs, signalons encore deux publications importantes parues en 1930 et dues à M. CZERNY, A. F. TURNER et W. PLETTIG (42, 43). Ainsi que le font remarquer ces auteurs, l'astigmatisme introduit par le miroir M_5 (fig. 3) est doublé lorsque le faisceau diffracté est dirigé vers M_6 . L'optique peut être améliorée en utilisant le schéma de la figure 5.

Une telle disposition avait déjà été employée par PASCHEN (18) en 1908, ainsi que par TROWBRIDGE (22) en 1910. Nous la retrouvons dans un spectrographe décrit par BARNES (44) en 1930. A la suite des publications de CZERNY et de ses élèves, elle fut à nouveau utilisée, en Allemagne, par C. HETTNER et J. BÖHNE (45) en 1931 et en Angleterre, par A. B. D. CASSIE et C. R. BAILEY (46) en 1932 dans des spectromètres ayant des ouvertures de l'ordre de $f/6$.

Notons toutefois que l'emploi du miroir M'_5 ne compense pas complètement l'astigmatisme introduit par M_5 . Pour de grandes ouvertures, cet inconvénient peut occasionner une perte d'énergie importante. Dans une étude récente, M. DÜMHKE (47) a montré que l'image de la fente S_2 sur la fente S_3 double de longueur lorsque l'ouverture passe de $1 : 6,3$ à $1 : 3,15$. On note aussi une légère augmentation en largeur. L'utilisation du principe de PFUND (fig. 4) supprime ces inconvénients et donne, dans tous les cas, une image de meilleure qualité. De plus, l'installation appliquant ce principe peut être facilement modifiée de manière à augmenter le pouvoir de résolution pratique, lorsque l'intensité du rayonnement est suffisante. Nous donnons des précisions à ce sujet au chapitre III, § 2 a.

A l'exception du spectrographe de ADEL, datant de 1941, les installations que nous avons mentionnées n'utilisent pas l'enregistrement automatique. L'obtention d'un spectre constitue toujours un travail long et fastidieux. Cet inconvénient rend particulièrement difficile l'étude du spectre solaire dans un grand domaine de longueurs d'onde. A. ADEL (48) fit des essais à ce sujet, en 1935, avec le spectromètre de HARDY.

En 1936, lorsque nous avons envisagé la construction d'un spectrographe à grande dispersion et auto-enregistreur, la littérature scientifique ne mentionnait qu'un seul essai d'enregistrement automatique effectué avec un spectromètre à réseau. F. A. FIRESTONE (49) signale que l'expérience fut réalisée en 1932, à l'Université de Michigan, par P. E. MARTIN et E. F. BARKER. Ceux-ci appliquèrent l'amplificateur de FIRESTONE à l'installation de MEYER (25, 26). Le spectrogramme obtenu est reproduit figure 6 a. La figure 6 b donne un diagramme de la même région spectrale, tracé par E. K. PLYLER et W. W. SLEATOR (50) en utilisant le procédé « point par point » sur la même installation. La comparaison des deux courbes permet de constater que la figure a donne à peu près autant de détails que la figure b. L'enregistrement a été pris en 90 min., tandis que le diagramme a nécessité plusieurs semaines de travail. L'essai fut donc très satisfaisant. Toutefois, lors de notre séjour au États-Unis, l'installation réalisée par MARTIN et BARKER n'était plus utilisable. Le procédé « point par point » était à nouveau appliqué au spectromètre de MEYER, tandis que l'amplificateur de FIRESTONE était constamment employé sur un spectrographe muni d'un prisme en KBr (installation de STRONG) (51). Lorsque nous avons voulu aborder l'étude à grande dispersion du spectre solaire au delà de $1,35 \mu$, il n'existait donc aucun spectromètre à réseau qui fût à enregistrement automatique.

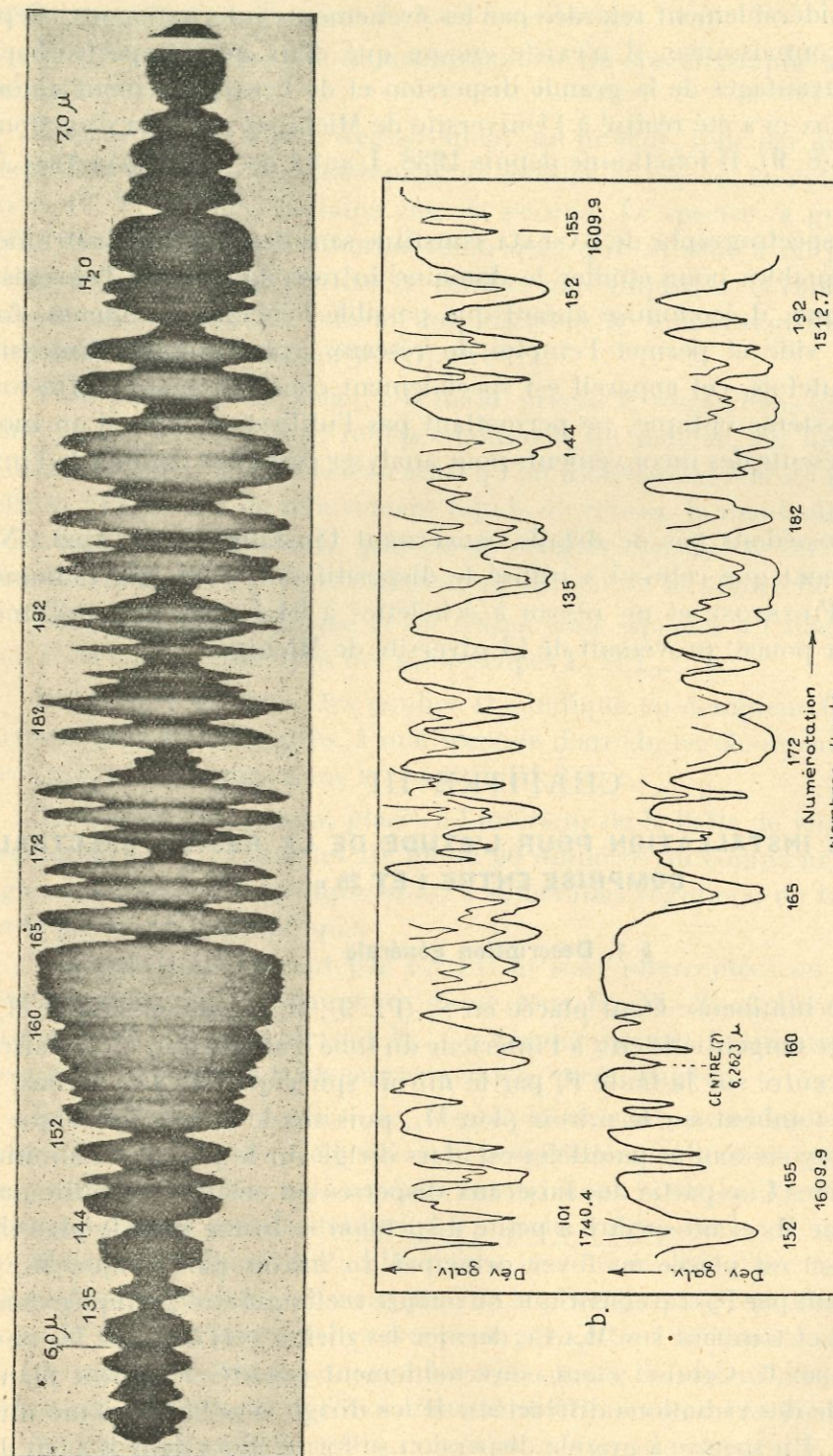


FIG. 6. — Spectre d'absorption de la vapeur d'eau dans la région $6,5 \mu$.
 a. Enregistrement de MARTIN et BARKER.
 b. Courbes de PLYLER et SLEATOR.

Ainsi que nous l'avons signalé dans l'avant-propos, la réalisation de nos projets fut considérablement retardée par les événements internationaux. Cependant, à notre connaissance, il n'existe encore que deux autres spectrographes combinant les avantages de la grande dispersion et de l'enregistrement automatique. Un de ceux-ci a été réalisé à l'Université de Michigan, sous la direction de H. M. RANDALL (8, 9). Il fonctionne depuis 1938. L'autre est utilisé par ADEL (41) depuis 1941.

Le dernier spectrographe de RANDALL constitue sans doute un des instruments les plus remarquables pour étudier le domaine infra-rouge. Outre l'enregistrement automatique, il économise autant que possible l'énergie lumineuse, fonctionne dans le vide et permet l'emploi de réseaux ayant comme dimensions 25×50 cm. Toutefois, cet appareil est spécialement construit pour l'infra-rouge lointain. Son système optique, ne permettant pas l'utilisation aisée d'un monochromateur, présente des inconvénients pour analyser certaines régions de l'infra-rouge proche.

Nous ne possédons pas de détails concernant l'installation de ADEL. Nous savons simplement que celui-ci a utilisé le dispositif de PFUND, un radiomètre périodique de FIRESTONE et un réseau à échelottes à 94,4 traits par millimètre (2.400 traits par pouce) provenant de l'Université de Michigan.

CHAPITRE III

LA NOUVELLE INSTALLATION POUR L'ÉTUDE DE LA RÉGION SPECTRALE COMPRISE ENTRE 1 ET 25 μ

§ 1. Description générale

Une source lumineuse étant placée en S_1 (Pl. 9), le miroir sphérique M_a en forme une image tangentielle en s à l'intérieur du tube d'absorption t_1 . Le faisceau est ensuite concentré sur la fente F_1 par le miroir sphérique M_b . Les rayons, qui entrent par F_1 , tombent sur le miroir plan M_1 , puis sur le miroir sphérique M_2 . Le faisceau de rayons rendus parallèles est alors dirigé sur le prisme P , aluminisé sur la face arrière. Une partie des faisceaux dispersés est ensuite recueillie par le miroir sphérique M_3 et un spectre à petite dispersion se forme dans le plan de la fente F_2 . Celle-ci est placée au foyer principal du miroir parabolique M_4 . Les radiations passant par F_2 traversent une ouverture rectangulaire pratiquée dans le miroir plan M_5 et tombent sur M_4 . Ce dernier les dirige vers M_5 , qui les envoie sur le réseau plan R . Celui-ci étant convenablement orienté, le miroir plan M_6 reçoit une partie des radiations diffractées. Il les dirige vers le deuxième miroir parabolique M_7 . Un spectre à grande dispersion se forme alors dans le plan de la fente de sortie F_3 , située à l'arrière de l'ouverture pratiquée au centre de M_6 . La fente F_3 se trouve au premier foyer du miroir elliptique M_8 et un des couples d'une

pile thermo-électrique compensée T est situé au deuxième foyer. La partie du spectre qui passe par F_3 vient donc se focaliser sur T .

Une paroi p_a sépare le monochromateur du spectrographe à réseaux proprement dit.

Lors de la prise d'un enregistrement, un moteur, relié par une courroie à une des poulies D , donne un mouvement de rotation au réseau, au cylindre C (à gauche sur la Pl. 9) et, dans certains cas, au prisme. Le spectre, à grande dispersion, défile donc sur le couple thermo-électrique, qui est relié à un premier galvanomètre G_1 (Pl. 8). Les déviations de celui-ci sont amplifiées et celles d'un deuxième galvanomètre G_2 (Pl. 8), relié à l'amplificateur A , sont enregistrées sur un papier photographique enroulé sur le cylindre C .

Pour permettre de placer, à la main, prisme et réseau dans une position déterminée, nous avons prévu, indépendamment du moteur, un mouvement rapide et un mouvement lent du réseau ainsi qu'un mouvement lent du prisme. La manivelle m_1 (Pl. 9) sert au mouvement rapide du réseau; la manivelle m_2 , au mouvement lent. Une manette K_1 permet de coupler chacun de ces mouvements. Le mouvement lent du prisme s'obtient au moyen de la manivelle m_3 .

Les positions du prisme et du réseau sont repérées à l'aide des cercles gradués C_1 et C_2 , lus au moyen des microscopes L_1 et L_2 .

Le nombre de tours des poulies D s'indique au compteur C_3 . Un tour de D correspond, à très peu près, à une seconde d'arc du cercle-réseau. Des précisions à ce sujet sont données dans le chapitre III, § 8, *c*.

Trois disques-contacts, placés à l'intérieur de la boîte de vitesse B_2 , allument une lampe l_2 (Pl. 8) tous les 10, 30 ou 90 numéros du compteur. Cette lampe est réglée pour permettre l'impression, à intervalles réguliers, de traits horizontaux sur le papier photographique.

Les radiations entrant par F_2 (Pl. 9) sont interceptées ou admises dans le spectrographe par la manœuvre d'une roue R_d (Pl. 2). Celle-ci fait tourner le disque d (Pl. 9) placé devant F_2 . Ce dernier permet l'utilisation d'une fenêtre opaque ou de fenêtres transparentes (mica, verre, papier).

Les différentes parties de l'instrument sont montées sur deux plateformes P_1 et P_2 (Pl. 9). Celles-ci ont été spécialement traitées pour éviter, autant que possible, les déformations dues aux tensions internes. En outre, le montage prévu assure une grande stabilité. La planche 1 donne une vue de la construction qui supporte P_2 . Quant à P_1 , elle repose par des roulettes sur deux rails dont les extrémités sont visibles à l'avant-plan de la photographie reproduite planche 3. Ce mode de construction a été prévu pour permettre l'utilisation du spectrographe dans le vide ou dans une atmosphère débarrassée de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique. Par suite des événements internationaux, la cuve cylindrique V (fig. 9), nécessaire à cette réalisation, n'est pas encore construite. Jusqu'à présent, l'optique du spectrographe à réseau est enfermée dans une enceinte métallique non étanche.

L'alignement des différentes parties des axes de commande, situées sur P_1 et P_2 , est assuré à l'aide d'un dispositif qui permet de donner à P_1 un mouvement de translation très lent par rapport à P_2 et de caler P_1 dans la position requise.

La plate-forme P_1 mesure $1,80 \times 0,84$ m. La longueur de P_2 est de $2,36$ m. et sa plus grande largeur, de 35 cm. Les miroirs paraboliques M_4 et M_7 ont 25 cm. de diamètre et 1 m. de distance focale. Celle des miroirs M_2 et M_3 est de 50 cm.

Pour étudier l'absorption d'un gaz « en lumière convergente », il suffit de mettre le gaz dans un tube t_1 , placé entre M_a et M_b , dans le trajet des rayons lumineux. Comme il est parfois nécessaire d'étudier la même région spectrale « avec gaz » et « sans gaz » dans le tube, nous avons prévu un support permettant d'amener successivement deux tubes t_1 et t_2 dans le faisceau lumineux. Cette manœuvre s'effectue à l'aide de la manette K_3 (Pl. 9 et 2). La planche 3 permet de se rendre compte de la position respective de t_1 et t_2 .

Employés « en lumière convergente », les tubes ne peuvent pas mesurer plus de 30 cm. sans intercepter une partie de la lumière tombant sur M_b (Pl. 9). Pour utiliser des tubes plus longs, sans diminuer l'ouverture du spectrographe, il convient de travailler « en lumière parallèle ». Dans ce cas, les tubes t_1 et t_2 ainsi qu'une partie de leur support sont retirés de l'installation. La source est placée, par exemple, en S_2 et des faisceaux de rayons parallèles sont envoyés dans le tube t_3 par le miroir sphérique M_c . Ces faisceaux tombent ensuite sur le miroir plan M_d qui les dirige sur un miroir sphérique M'_b remplaçant M_b et ayant une distance focale double de ce dernier. Une image de S_2 se forme ainsi sur F_1 .

L'absorption des liquides et des solides est habituellement étudiée « en lumière convergente ». La substance à analyser se place alors en s .

Dans le chapitre II de la deuxième partie de ce mémoire, nous décrivons le dispositif optique utilisé avant la fente F_1 , pour l'étude du spectre solaire.

La planche 1 donne une vue d'ensemble de l'instrument, tandis que la planche 2 met en évidence les dispositifs de commande.

Sur la planche 3, on remarque de gauche à droite le support du filament de NERNST (la boîte, qui le recouvre, a été retirée), le support des tubes d'absorption, une vue du monochromateur ainsi que la partie arrière du cylindre contenant le miroir elliptique et la pile thermo-électrique.

La planche 4 montre un des grands réseaux placé sur son support.

Pour prendre la vue reproduite planche 5, nous avons enlevé la partie supérieure et les faces avant et arrière du cylindre contenant le miroir elliptique et la pile thermo-électrique. Lors de la prise de ce cliché, la pile T n'était pas encore reliée au premier galvanomètre et les pompes à vide n'étaient pas installées.

§ 2. L'optique du spectrographe

a) LE SPECTROGRAPHE À RÉSEAU PROPREMENT DIT. — Le spectre, à grande dispersion, formé sur F_3 , doit être, autant que possible, exempt de défauts puisque sa netteté influence directement le pouvoir séparateur pratique de l'instrument. Pour satisfaire à cette condition, nous avons adopté le dispositif de PFUND, ainsi

que nous l'avons signalé au chapitre II. Grâce aux miroirs plans auxiliaires M_5 et M_6 (Pl. 9), les miroirs paraboliques M_4 et M_7 n'introduisent théoriquement aucun défaut dans l'imagerie du faisceau centré sur les axes. Pour toute la surface de la fente F_2 , l'astigmatisme et la coma sont réduits au minimum.

Le schéma optique utilisé permet aussi d'augmenter le pouvoir de résolution pratique lorsque l'intensité du rayonnement est suffisamment intense. L'expérience a été réalisée par J. D. HARDY (39). Celui-ci a remplacé le miroir parabolique M_7 , d'un mètre de distance focale, par un miroir sphérique (*) M'_7 (Pl. 8), de quatre mètres de distance focale, ce qui peut s'effectuer sans diminuer l'ouverture utile du spectrographe. Dans ce cas, la dispersion du spectre devient quatre fois plus grande. Une fente quatre fois plus large peut donc être utilisée sans diminuer le pouvoir séparateur pratique. Cependant, l'énergie qui tombe sur le couple est alors quatre fois plus faible. Dans son expérience, HARDY a pu employer une fente de sortie, qui était seulement trois fois plus large que celle utilisée lors du montage initial. Il en est donc résulté une augmentation sensible du pouvoir de résolution. Notons aussi que l'emploi d'une fente large réduit les pertes d'énergie lumineuse dues à la diffraction, aux imperfections de la fente et aux poussières se trouvant sur les lèvres de cette dernière.

L'isolation thermique aisée du miroir elliptique et de la pile thermo-électrique constitue un autre avantage du schéma adopté.

Le dispositif de PFUND nécessite l'emploi de miroirs troués; toutefois, en plaçant les fentes F_2 et F_3 aussi près que possible des surfaces optiques de M_5 et M_6 , la perte de lumière est relativement faible. Dans notre cas, en utilisant les grands réseaux, elle ne dépasse pas 4% . Avec le petit réseau (cf. chap. III, § 2, d), elle est nulle, la surface gravée (75×50 mm.) étant située entièrement en dehors de la plage non éclairée.

Une perte de lumière peut aussi résulter de la hauteur des fentes (dans notre cas, 25 mm.) par suite du long trajet des faisceaux lumineux. Pour l'éviter, il suffit de prévoir des miroirs ayant des diamètres plus grands que ceux donnés par un calcul basé uniquement sur la valeur de l'ouverture du spectrographe.

b) LE MIROIR ELLIPTIQUE ET LA PILE THERMO-ÉLECTRIQUE. — Le miroir elliptique M_8 a pour but de former une image aussi petite et aussi nette que possible de la fente F_3 sur la surface réceptrice de la pile T, de manière à obtenir le maximum de déviation du spot galvanométrique pour une quantité d'énergie donnée.

Le centre de la fente F_3 se trouve au premier foyer du miroir et celui de la surface réceptrice de la pile, au deuxième foyer. Le réservoir contenant la pile intercepte donc une partie des rayons; cependant, ce réservoir est de petites dimensions (cf. chap. III, § 4) et une partie de celui-ci se place dans l'espace sans lumière dû au trou dans le miroir M_5 . La perte d'énergie provenant de l'interposition de la pile ne dépasse pas 4% .

(*) Dans ce cas, l'utilisation d'un miroir parabolique n'est plus nécessaire. Cf., par exemple, DANJON et COUDER, *Lunettes et Télescope*, p. 136.

Le miroir étant elliptique, il y a correspondance stigmatique entre les foyers, mais l'image devient rapidement mauvaise pour les points s'éloignant de l'axe optique. Pour une faible ouverture de la fente F_3 , l'image en T a la forme d'un X, l'angle aigu de l'X étant complètement rempli de lumière. La largeur de cette image en dehors de son centre peut être calculée en utilisant les formules données par RANDALL et FIRESTONE (9). Dans notre cas, pour une hauteur de F_3 égale à 25 mm. et une largeur de 0,5 mm., l'image qu'en donne le miroir elliptique a une hauteur de 5 mm. et une largeur de 0,1 mm. en son milieu et de 0,5 mm. à ses extrémités. Comme dimensions des récepteurs de la pile, nous avons prévu $5 \times 0,5$ mm., la largeur de F_3 habituellement utilisée étant égale ou inférieure à 0,5 mm.

Malgré l'élargissement de l'image pour les points s'éloignant de l'axe, M. CZERNY et H. RÖDER (52) ont montré que l'utilisation d'un miroir elliptique est nettement préférable à celle d'un miroir sphérique ou parabolique.

c) LE MONOCHROMATEUR. — Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre II, le monochromateur sert principalement à disperser les radiations avant leur entrée dans le spectrographe à réseau, pour éviter la superposition des différents ordres spectraux.

De manière à faciliter l'expérimentation, la matière première du prisme doit convenir à l'étude du plus grand domaine spectral possible. Cependant, il faut éviter une trop grande absorption et obtenir une dispersion suffisante.

Pour étudier le spectre de 1 à 14μ , nous avons prévu un prisme en NaCl de 18° , la grande face mesurant 90×115 mm. De 14 à 25μ , nous emploierons un prisme en KBr de 10° (dimensions de la grande face : 70×100 mm.) (*).

L'utilisation du montage LITROW donne la possibilité de « court-circuiter le prisme », c'est-à-dire de lui substituer un miroir plan et de faire fonctionner l'installation sans modifier le réglage des autres parties du monochromateur. Le changement est intéressant lorsque l'emploi du prisme peut être remplacé par l'utilisation d'un filtre approprié, ayant une plus faible absorption. Par exemple, dans la région $1,5\mu$, nous avons constaté que le prisme en NaCl occasionnait une perte d'énergie d'environ 30 %. En court-circuitant le prisme et en utilisant un filtre de PFUND (cf. 2^e partie, chap. III, § 2) devant la première fente, la perte d'énergie a pu être réduite à 10 %, les radiations de longueurs d'onde $0,75\mu$ étant toutefois suffisamment absorbées.

La construction mécanique a été prévue pour pouvoir interchanger facilement prismes et miroir plan. Nous donnons des détails à ce sujet au chapitre III, § 3, d.

Le monochromateur utilise le dispositif recommandé par CZERNY, TURNER

(*) Il ne nous a pas été possible d'obtenir un prisme en KBr aussi grand que celui en NaCl.

et PLETTIG (42, 43) (voir fig. 5). L'astigmatisme introduit par le miroir M_2 (Pl. 9) est, en grande partie, compensé par le miroir M_3 , les angles d'incidence relatifs au centre de ces miroirs étant égaux et petits (7°).

d) DÉTAILS CONCERNANT LES PIÈCES OPTIQUES. — Les miroirs paraboliques et elliptique proviennent des États-Unis. Ils ont été taillés par M. E. MELLISH à Escondido (Californie). Les miroirs paraboliques sont en pyrex; le miroir elliptique, en verre ordinaire.

Tous les autres miroirs mentionnés dans la description générale ont été taillés à la Société Belge d'Optique de Gand, dans du verre L_4 de Saint-Gobain (France). Ce verre est analogue au pyrex.

La précision de la taille de ces surfaces optiques est en général d'une frange, ce qui correspond à la limite de RAYLEIGH pour la longueur d'onde 4μ .

Les miroirs paraboliques et elliptique ont été aluminisés aux États-Unis, tandis que les autres ont été recouverts du dépôt Hochheim à la I. G. Farben Industrie Gesellschaft (Ludwigshafen a. Rh.) (All.).

Les prismes ont été taillés chez Halle (Berlin-Steglitz) (All.) avec une précision de 4 à 6 franges, malgré le peu de dureté des matières premières. Les faces arrières des prismes sont aluminisées et protégées par une lame en verre mat.

Le KBr provient de l'Université de Göttingen (All.) (*).

Comme réseaux, nous avons prévu :

un réseau à 590,5 traits par mm. (15.000 traits par pouce) pour la région	1μ à 3μ
" 141,7 " " (3.600 ")	" 3μ à 5μ
" 94,4 " " (2.400 ")	" 5μ à 10μ
" 47,2 " " (1.200 ")	" 10μ à 20μ
" 31,5 " " (800 ")	" 20μ à 25μ .

Ces différents domaines spectraux se rapportent aux premiers ordres. Les limites sont approximatives.

Jusqu'à présent, notre Institut possède un réseau plan ordinaire à 576 traits par millimètre (surface gravée, 75×50 mm.), provenant de l'Université d'Upsala (Suède) et un réseau plan à échelottes à 94,4 traits par millimètre (surface gravée, 225×175 mm.), provenant de l'Université de Michigan (É.-U.).

Les réseaux à 141,7 et 47,2 traits par millimètre devaient nous parvenir en 1940, mais leur envoi a été retardé par suite des événements internationaux. Nous espérons aussi obtenir à l'Université de Michigan un réseau à 31,5 traits par millimètre.

(*) En 1938, M. le Prof^r R. V. POHL nous a offert un des plus gros cristaux de KBr fabriqués dans son Institut, pour nous permettre d'obtenir le prisme et les fenêtres nécessaires à notre installation. Nous tenons à lui témoigner ici notre reconnaissance.

Nous attendons, à bref délai, un réseau plan à échelottes à 590, 5 traits par millimètre, — dimensions : 150×50 mm., — gravé pour $1,5\mu$ à l'Université Johns Hopkins (É.-U.).

§ 3. La construction mécanique

a) LE SUPPORT DU FILAMENT DE NERNST (Pl. 3). — Le filament de NERNST est habituellement utilisé entre 1 et 15μ comme source continue de radiations. Au delà de 15μ , il est préférable d'employer un manchon Auer (*).

Un filament de NERNST, muni d'un soquet EDISON, peut être vissé sur le support placé en S_1 (Pl. 9). Dans cette position, le filament est réglable en hauteur et en inclinaison (à l'aide d'une rotule). De plus, il peut subir des mouvements lents de translation dans deux directions perpendiculaires. Ceux-ci permettent d'obtenir aisément le maximum de déviation du spot galvanométrique pour une position déterminée du réseau et du prisme. Le réglage est facilité en orientant un de ces mouvements dans la direction source-centre de M_a .

A l'usage, le filament de NERNST se courbe. Grâce à la rotule, on peut tourner la source sur elle-même, sans toucher au reste du support, pour que les bords de l'image formée sur F_1 soient droits et parallèles à la fente.

Une boîte, à double paroi avec circulation d'eau, recouvre la lampe de NERNST, afin d'éviter l'échauffement de l'atmosphère et de la paroi p_a .

b) LES SUPPORTS DES MIROIRS. — Chaque miroir peut être réglé en direction et en inclinaison au moyen de vis antagonistes, ce qui assure une grande stabilité. Il peut aussi subir un mouvement lent de translation. Nous n'avons pas prévu de réglage en hauteur, la construction mécanique assurant celle-ci avec une précision suffisante.

Les miroirs M_b , M'_b et M_a (Pl. 9) doivent être assez souvent retirés puis réinstallés. Pour que ces opérations puissent s'effectuer rapidement, sans modifier le réglage, des supports spéciaux ont été construits pour ces pièces optiques. La planche 3 donne à l'avant-plan une vue du support de M_b . La partie inférieure de ce support est solidaire de P_1 . Elle porte une petite plate-forme horizontale, réglable en direction, sur laquelle se pose la partie supérieure munie du miroir; un plan, un creux et une rainure, prévus dans la plate-forme, correspondent aux trois vis calantes de la partie supérieure. La partie inférieure est commune aux miroirs M_b et M'_b . Un réglage supplémentaire en direction a été prévu dans la partie supérieure du support de ce dernier miroir. Un support semblable à celui de M_b a aussi été réalisé pour M_a .

(*) Note ajoutée au cours de l'impression : Des progrès ayant été réalisés au cours de ces dernières années dans la construction des « globars », cette source de radiations est de plus en plus utilisée dans le proche infra-rouge.

c) LE SUPPORT DES TUBES D'ABSORPTION (Pl. 3 et 9). — Deux tubes d'absorption t_1 et t_2 (Pl. 9) peuvent être fixés sur un support commun par des lanières élastiques. Ils sont réglables, indépendamment l'un de l'autre, en direction et en inclinaison.

La manœuvre de la manette K_3 fait basculer la partie supérieure du support par rapport à la partie inférieure, solidaire de P_1 ; ceci permet d'amener le tube désiré dans le trajet du faisceau lumineux.

Pour le montage « en lumière convergente », nous avons prévu trois jeux de deux tubes en verre ayant 5 cm. de diamètre et 5, 15 et 30 cm. de longueur. Des fenêtres en NaCl ou en KBr de 5 mm. d'épaisseur peuvent être fixées sur chacun de ceux-ci. De plus, chaque tube porte deux bagues, serties sur la paroi extérieure, qui permettent de le replacer immédiatement dans sa position initiale lorsqu'il a dû être retiré de l'installation.

Lors de l'utilisation du montage « en lumière parallèle », il faut enlever la partie supérieure du support pour qu'elle n'intercepte pas le faisceau de rayons, qui doit se propager entre M_c , M_d et M'_b . Grâce à la construction réalisée, la partie retirée peut être ensuite remplacée très facilement dans sa position initiale.

d) LE SUPPORT ET LES MOUVEMENTS DE ROTATION DU PRISME (Pl. 5 et 6). — Le support du prisme comprend deux parties principales : S_1 et S_2 (Pl. 6, a).

La partie supérieure S_1 , sur laquelle se trouve le prisme P, repose par trois vis calantes V_1 , V_2 , V_3 (Pl. 6, b) sur la partie inférieure S_2 . Le cône J_1 de cette dernière (Pl. 6, a) est fixé à la plate-forme P_1 . La pièce J_2 permet la rotation du prisme par rapport à P_1 . Ce mouvement s'effectue à l'aide du bras Br_1 (Pl. 9). Du côté du prisme, ce bras se termine par un collier qui entoure J_2 (Pl. 6, c); il permet de rendre Br_1 solidaire de J_2 . A l'autre extrémité, Br_1 porte un tenon vertical h_1 (d'environ 1 cm. de long) (Pl. 9), qui appuie contre une came C_a , la pression étant exercée par un poids réglable p' . La manivelle m_3 permet de commuter, à la main, une rotation à C_a . La position du prisme peut être repérée à l'aide du cercle gradué C_1 , situé sous la came et lu au moyen du microscope L_1 .

A une position donnée du réseau doit correspondre une position déterminée du prisme pour que le domaine de longueurs d'onde, qui entre par F_2 , soit précisément celui qui doit être analysé par le réseau. Par suite de la différence de dispersion entre les spectres formés sur F_2 et F_3 , une seule position du prisme donne la possibilité d'analyser une région spectrale d'une certaine étendue à l'aide du réseau. Ainsi, en utilisant le réseau à 576 traits par millimètre dans le premier ordre et des fentes F_2 et F_3 ayant 0,1 mm. de largeur, deux enregistrements consécutifs, couvrant chacun 150 \AA , peuvent être obtenus, sans qu'il soit nécessaire de faire tourner le prisme. Toutefois, les conditions ne sont pas toujours aussi favorables, et, dans certains cas, la position du prisme doit être modifiée au cours d'un enregistrement pour continuer à obtenir la plus grande déviation possible sur le cylindre enregistreur. Nous avons prévu les mécanismes nécessaires pour que ce réglage s'effectue automatiquement, quels que soient le réseau et l'étendue du domaine spectral étudié.

Pour déterminer théoriquement la forme de la came C_a (Pl. 9), nous avons tout d'abord utilisé les formules du prisme

$$\sin i = n \sin r \quad (1)$$

$$A = r + r' \quad (2)$$

$$\sin i' = n \sin r' \quad (3)$$

$$D = i - i' \quad (4)$$

qui permettent d'obtenir l'angle d'incidence i en fonction de l'angle du prisme A et de l'angle de déviation D , connaissant l'indice de réfraction n pour une longueur d'onde donnée.

Comme les fentes F_1 et F_2 ainsi que les miroirs M_1 , M_2 et M_3 restent fixes, l'angle D est constant. Dans notre cas, $D = 28^\circ$.

Les angles des prismes en NaCl et en KBr mesurent respectivement 18° et 10° . Cependant comme ces prismes sont utilisés en montage LITROW, il faut introduire dans les calculs $A_{\text{NaCl}} = 36^\circ$ et $A_{\text{KBr}} = 20^\circ$.

En employant ces données pour D et pour A , nous avons déterminé les angles d'incidence i pour différentes longueurs d'onde en nous basant sur les mesures d'indice de réfraction données par LANDOLT-BORNSTEIN (53) pour NaCl et par E. GUNDELACH (54) et K. KORTH (55) pour KBr.

Pour chaque longueur d'onde, nous avons ensuite calculé l'angle aigu que forme la direction du faisceau incident avec la face arrière de chaque prisme. Ces angles s'obtiennent en ajoutant 18° pour le prisme en NaCl et 10° pour celui en KBr aux compléments des angles d'incidence.

Nous avons alors recherché la valeur des déplacements à faire subir au tenon h_1 pour que chacune des radiations envisagées entre successivement dans le spectrographe à réseau proprement dit. Dans la construction réalisée, la distance entre l'axe de rotation du prisme et la ligne de contact de h_1 sur C_a mesure 725 mm.

La forme de la came a enfin été tracée en fixant le rapport entre la vitesse de rotation du réseau et celle de la plate-forme qui supporte C_a . Malgré l'emploi de cinq réseaux ayant des dispersions très différentes, nous avons pu prévoir une seule came, en choisissant dans chaque cas un rapport adéquat.

La méthode de calcul que nous venons de signaler permet de constater que la forme de C_a dépend de l'angle des prismes, de leurs indices de réfraction ainsi que du réglage du monochromateur et du spectrographe à réseau proprement dit. Vu ces nombreux facteurs, la forme de la came doit être déterminée expérimentalement (cf. chap. III, § 6, e).

En pratique, pour relier le mouvement du prisme à celui du réseau, il suffit de coupler deux axes de la boîte de vitesse B_3 (Pl. 9) aux axes correspondants et convenablement choisis de la boîte de vitesse rotative B_4 .

Pour pouvoir interchanger facilement les prismes de NaCl et de KBr, ainsi que le miroir plan, servant à court-circuiter ces prismes, la partie S_1 (Pl. 6) du support de ces pièces optiques a été construite en trois exemplaires. Aux vis calantes V_1 , V_2 , V_3 de S_1 correspondent un plan, un creux et une rainure sur S_2 .

Par suite de la rotation limitée du bras Br_1 , la construction de S_1 a été prévue pour que la plate-forme p (Pl. 6, b), qui supporte directement un des prismes ou le miroir, puisse tourner par rapport à V_1 , V_2 et V_3 . La rotation s'effectue à l'aide des vis antagonistes e_1 . Son amplitude maximum est de 20° . Les vis e_2 permettent de caler p dans une position déterminée.

Comme les prismes sont hygroscopiques, il est nécessaire de les maintenir, lors de leur utilisation, à une température un peu supérieure (environ 5°C) à la température ambiante. Une résistance électrique a été prévue à cet effet en r (Pl. 6, a), à l'intérieur même de S_1 . Elle aboutit aux bornes c_1 et c_2 , qui sont en contact avec les lames à ressorts d_1 et d_2 , fixées à S_2 . Les fils f relient d_1 et d_2 à la source de courant (batterie 110 V.).

Lorsque les prismes ne sont pas utilisés, chacun de ceux-ci se trouve sur une glace, munie elle aussi de lames à ressorts correspondant aux bornes c_1 et c_2 . Nous donnons planche 6d, un dessin du dispositif employé pour chaque prisme. Une cloche en verre, à bord rodé et graissé, recouvre la pièce optique, ainsi que de la matière asséchante (chlorure de cobalt) placée près de celle-ci. Dans ces conditions, le prisme peut être conservé intact sans autre précaution. Lorsqu'il doit être placé sur l'installation, le dispositif prévu permet son chauffage avant de retirer la cloche.

e) LE SUPPORT ET LES MOUVEMENTS DE ROTATION DU RÉSEAU (Pl. 4, 7 et 9). — Le support du réseau comprend, comme celui du prisme, deux parties principales : S_1 et S_2 (Pl. 7).

La partie S_1 , portant directement le réseau, repose par trois vis calantes V'_1 , V'_2 et V'_3 (Pl. 9) sur la partie inférieure S_2 . Aux vis correspondent un plan, un creux et une rainure. Chaque pièce optique est fixée sur une partie S_1 qui lui est propre.

Nous avons veillé spécialement à ce que les surfaces des réseaux ne subissent aucune tension.

Les grands réseaux sont rectangulaires. Par construction, les traits sont perpendiculaires à la base sur laquelle la pièce optique doit reposer. Cette dernière, placée directement sur S_1 , est fixée à l'aide de six tenons t (Pl. 7, a et b) vissés dans les parois latérales. Supposons que le réseau soit placé contre la paroi d (Pl. 7, b). A l'aide des écrous e_1 et e_2 , la tête de vis a est alors réglée pour qu'elle touche le tenon t . La pièce b permet ensuite de serrer t contre a , en vissant e_3 .

Le petit réseau est taillé sur un disque de 10 cm. de diamètre et de 1,5 cm. d'épaisseur. Il est fixé sur S_1 , par l'intermédiaire d'un barillet et peut subir une rotation dans son plan.

Le cône J_1 (Pl. 7, a) de la partie inférieure S_2 est fixé à la plate-forme P_1 , tandis que la pièce J_2 permet la rotation du réseau par rapport à P_1 . Outre la plate-forme p , J_2 supporte le cercle gradué C_2 , la roue dentée D' servant au mouvement rapide, le bras Br_2 nécessaire au mouvement lent ainsi qu'une partie du mécanisme servant aux couplages des mouvements lent ou rapide. Un poids

réglable p'' (Pl. 9) assure le contact de Br_2 avec un tenon h_2 (1,5 cm. de hauteur, 1 cm. de diamètre). Un mouvement de translation peut être communiqué à ce tenon à l'aide du moteur ou de la manivelle m_2 (Pl. 9). 684 tours des poulies D correspondent à un tour de l'axe A et déplacent h_2 d'un millimètre. La position de h_2 peut être choisie pour qu'un tour des poulies D fasse tourner le cercle C_2 d'une seconde d'arc. Nous donnons des précisions à ce sujet au chapitre III, § 8, c. Un index i_1 et une règle graduée, situés près de la boîte de vitesse B_2 , permettent de repérer la position de h_2 de l'extérieur de la cuve V.

Le moteur peut s'arrêter automatiquement après différentes longueurs de course de h_2 .

Une rotation rapide peut être communiquée au réseau, à l'aide de la manivelle m_1 (Pl. 9), par l'intermédiaire d'une vis tangente qui engrène avec la roue dentée D' (Pl. 7, a). Pour se servir de ce mouvement, la manette K_1 (Pl. 9) doit être placée sur l'indication « Rapide ». Lorsqu'elle est tournée sur l'inscription « Lent », la vis tangente du mouvement rapide est désengrenée et le bras Br_2 est solidaire de J_2 .

Tout mouvement du réseau par rapport au cercle C_2 doit être absolument évité au cours des mesures. Pour satisfaire à cette condition, nous avons dû prévoir trois vis V''_1 , V''_2 et V''_3 (Pl. 7 et 9) pour fixer invariablement S_1 à S_2 , lorsque le réglage des vis V'_1 , V'_2 et V'_3 a été effectué.

f) LE CYLINDRE ENREGISTREUR (Pl. 2 et 9). — Le cylindre C, sur lequel le papier photographique doit être enroulé, a une longueur de 51,5 cm. et un diamètre de 12 cm. Une bague d'un centimètre de large est fixée en son milieu (Pl. 9). De chaque côté de celle-ci, une languette métallique (largeur : 1 cm.) maintient sur le cylindre un papier de 25 x 39 cm. Ce dispositif donne la possibilité de prendre deux enregistrements consécutifs sans recharger le cylindre. Les languettes sont décalées l'une par rapport à l'autre pour que les enregistrements se recoupent sur une longueur d'environ 3 cm. Un index i_2 , situé à l'extérieur de la boîte contenant le cylindre, permet de repérer la position de ce dernier.

La fente d'entrée du faisceau lumineux a une longueur de 50 cm. et une largeur de 2 mm. Un de ses bords est divisé en millimètres et gradué en centimètres de 0 à 50. Cette fente peut être recouverte par un volet à charnières, qui porte aussi une règle graduée semblable à la première.

Une glissière g et une lentille cylindrique se placent entre la fente et le cylindre. La glissière, de 26 cm. de long, protège un des papiers lors de la prise d'un enregistrement sur le papier voisin. La lentille cylindrique concentre le faisceau incident en un point du papier photographique. Elle a une longueur de 46 cm. et s'arrête à 4 cm. de la base du cylindre située vers B_1 .

Une ouverture a été prévue en O pour permettre de photographier, sur le papier enregistreur, les indications d'un compteur C_{ph} relié mécaniquement au compteur visuel C_v .

g) LES BOÎTES DE VITESSE B_1 ET B_2 (Pl. 9). — Nous avons signalé précédemment l'utilisation de cinq réseaux pour couvrir la région spectrale comprise entre 1 et 25 μ . Ceux-ci ayant des dispersions très différentes, nous avons dû utiliser plusieurs rapports entre les vitesses de rotation du réseau et du cylindre, pour qu'un intervalle déterminé du spectre corresponde à une longueur adéquate du papier photographique. Dans la construction réalisée, lorsque l'axe A (Pl. 9) fait un tour, l'axe a effectue 1/5 de tour et l'axe b , deux tours. L'axe c du cylindre peut être couplé directement aux axes a ou b , mais la boîte de vitesse B_1 permet de donner aussi aux rapports de vitesses $\frac{a}{c}$ et $\frac{b}{c}$ les valeurs 3, 2, 1/2 et 1/3. Au chapitre III, § 14, nous donnons des précisions sur les enregistrements qui peuvent être obtenus en utilisant les différents couplages et les différents réseaux.

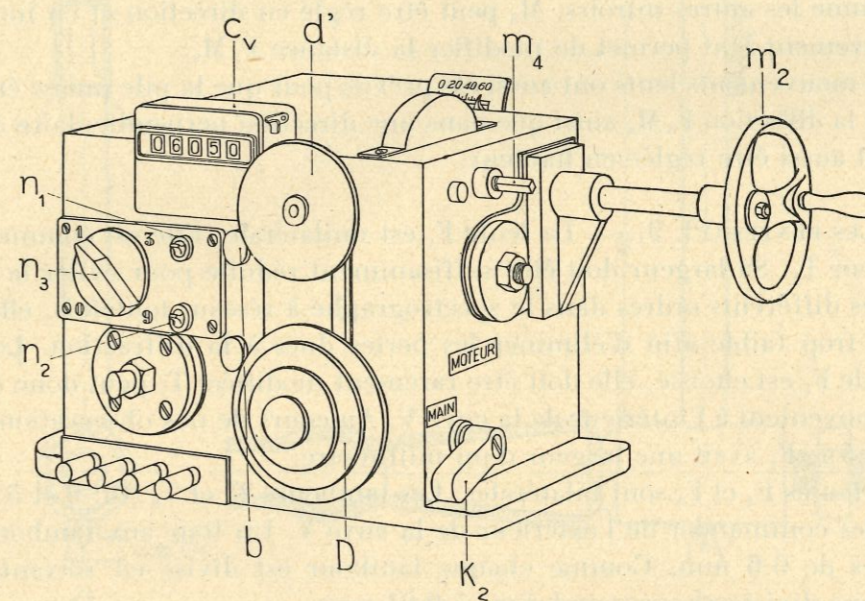


FIG. 7. — La boîte de vitesse B_2 .

La boîte B_2 porte trois interrupteurs n_1 , n_2 et n_3 (fig. 7 et Pl. 1). Les deux premiers servent à l'éclairage des cercles gradués C_1 et C_2 ; le troisième correspond aux trois disques-contacts situés à l'intérieur de B_2 . Lorsque l'interrupteur n_3 est placé successivement sur les indications 1, 3 ou 9, la lampe l_2 (Pl. 8), qui peut éclairer toute la fente du cylindre, s'allume respectivement tous les 10, 30 ou 90 numéros de compteur. Quand n_3 indique 0, la lampe reste éteinte au cours de l'enregistrement. Le bouton moleté b permet de régler la durée des contacts.

La manette K_2 sert à coupler ou à découpler l'axe des poulies D.

Un dispositif a été prévu pour faciliter l'enregistrement discontinu. Pour ce faire, il faut :

- 1° Placer la manette K_2 sur l'indication « moteur »;

2° Retirer la courroie reliant le moteur aux poulies D et coupler celle qui a le plus petit diamètre à la poulie d' ;

3° Placer la manivelle m_2 sur l'axe m_4 . Des ressorts, poussant des billes dans trois encoches régulièrement espacées, permettent de diviser par tiers un tour de m_4 . En passant d'une encoche à la suivante, le réseau se déplace de trois en trois secondes, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des lectures au cercle C_2 (Pl. 9).

h) LE SUPPORT DU MIROIR ELLIPTIQUE ET DE LA PILE THERMO-ÉLECTRIQUE (Pl. 5 et 9). — Pour éviter autant que possible les variations de température, la pile thermo-électrique T et le miroir elliptique M_8 ont été placés dans un cylindre métallique, à double paroi, isolé thermiquement de la plate-forme P_1 (Pl. 9).

Comme les autres miroirs, M_8 peut être réglé en direction et en inclinaison. Un mouvement lent permet de modifier la distance $F_3 M_8$.

Des mouvements lents ont aussi été prévus pour que la pile puisse être déplacée dans la direction $F_3 M_8$ ainsi que dans une direction perpendiculaire à celle-ci. Elle peut aussi être réglée en hauteur.

i) LES FENTES (Pl. 9). — La fente F_1 est unilatérale. Elle est commandée par le tambour T_1 . Sa largeur doit être suffisamment réduite pour éviter la superposition des différents ordres dans le spectrographe à réseau; toutefois, elle ne doit pas être trop faible afin d'éliminer les pertes dues à la diffraction. Lorsque la largeur de F_1 est choisie, elle doit être rarement modifiée. T_1 peut donc être situé sans inconvénient à l'intérieur de la cuve V. Au cours de nos observations dans la région $1,5\mu$, F_1 avait une largeur d'un millimètre.

Les fentes F_2 et F_3 sont bilatérales. Les tambours T_2 et T_3 (Pl. 9 et 5) permettent de les commander de l'extérieur de la cuve V. Un tour aux tambours ouvre les fentes de 0,6 mm. Comme chaque tambour est divisé en soixante parties égales, une division correspond donc à 0,01 mm.

La construction a été prévue pour que chaque fente puisse tourner lentement dans son plan. Ce mouvement s'effectue par vis antagonistes.

j) LES CERCLES GRADUÉS ET LES MICROSCOPES DE LECTURE (Pl. 9). — Le cercle C_1 , de 24 cm. de diamètre, est divisé de 15' en 15' et est lu au moyen du microscope L_1 .

Le cercle C_2 mesure 30 cm. de diamètre. Il est divisé de 5' en 5' et gradué de 30' en 30'. Le microscope L_2 , muni d'un oculaire micrométrique, permet de lire la seconde d'arc et même d'apprécier le dixième de seconde. Le grossissement de ce microscope doit être réglé pour que cinq tours de la vis micrométrique correspondent en moyenne à une division du cercle C_2 . Pour pouvoir effectuer ce réglage, la distance oculaire-objectif est variable et tout le microscope peut être déplacé lentement par rapport au cercle. Des précautions spéciales ont été prises pour assurer une grande stabilité à L_2 .

Le procédé employé pour la détermination des longueurs d'onde ne nécessite pas l'utilisation permanente de deux microscopes, placés à 180° l'un de l'autre (voir détails à ce sujet au chap. III, § 8, b).

§ 4. La pile thermo-électrique, les galvanomètres et l'amplificateur.

La pile thermo-électrique a été construite par M. C. H. CARTWRIGHT au Massachusetts Institute of Technology (Boston, Mass., É.-U.). Elle est constituée par deux couples reliés en opposition et placés en série dans le circuit du premier galvanomètre (pile compensée).

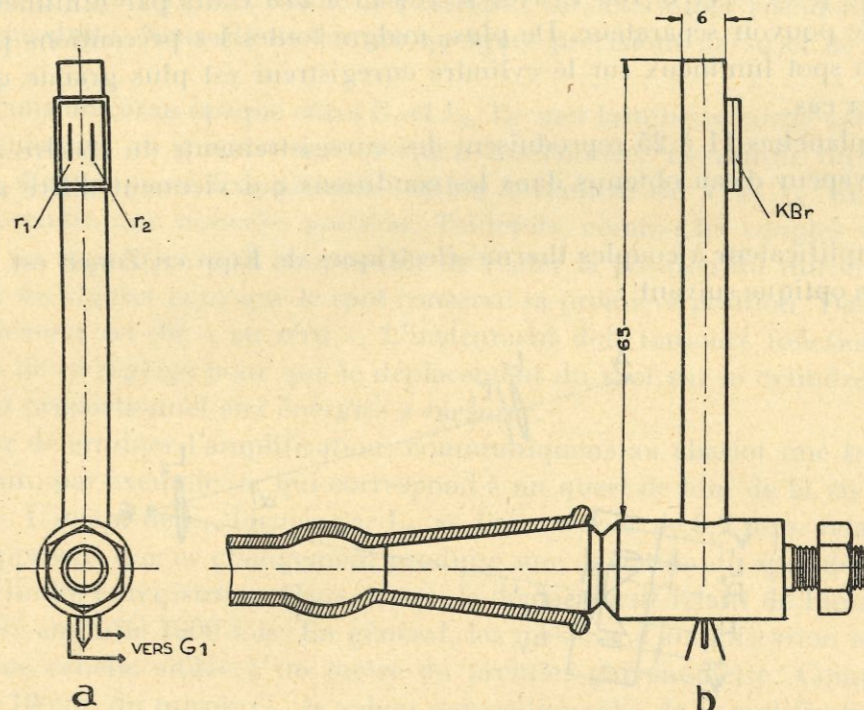


FIG. 8. — La pile thermo-électrique.

Ainsi que l'indique la figure 8 a, les récepteurs r_1 et r_2 sont fixés côte à côte, à une distance d'environ 3 mm. l'un de l'autre. Ils ont comme dimensions $5 \times 0,5$ mm. Le choix de celles-ci a été justifié au chapitre III, § 2, b. Le faisceau lumineux concentré par le miroir elliptique sur un des récepteurs atteint celui-ci après avoir traversé une fenêtre en KBr d'un millimètre d'épaisseur. Pour obtenir le maximum de sensibilité, la pile que nous utilisons doit fonctionner sous une pression égale ou inférieure à 10^{-4} mm. de Hg.

L'emploi de deux couples reliés en opposition entraîne une diminution de sensibilité, mais cet inconvénient est largement compensé par une plus grande stabilité du courant thermo-électrique.

Pour enregistrer le spectre solaire, nous avons utilisé deux galvanomètres « micro » et un amplificateur à couples thermo-électriques de Kipp en Zonen. Cet

amplificateur et les deux galvanomètres ont un « temps d'indication » d'environ 0,3 sec. La pile étant connectée, le temps de réponse de tout le dispositif est de 0,8 sec. Grâce à cette rapidité d'indication, en utilisant le réseau à 576 traits par millimètre, un enregistrement couvrant 150 Å est obtenu en vingt-cinq minutes, sans diminution du pouvoir séparateur pratique du spectrographe.

Lors de nos recherches sur le spectre d'absorption de la vapeur d'eau, les galvanomètres « micro » ont été remplacés par des galvanomètres du type « Moll Original », de manière à utiliser des fentes aussi fines que celles employées pour le soleil. La sensibilité de l'installation est alors six fois plus grande, mais il faut une heure pour couvrir 150 Å, avec le réseau à 576 traits par millimètre, sans affecter le pouvoir séparateur. De plus, malgré toutes les précautions prises, la dérive du spot lumineux sur le cylindre enregistreur est plus grande que dans le premier cas.

Les planches 11 à 25 reproduisent des enregistrements du spectre du soleil et de la vapeur d'eau obtenus dans les conditions qui viennent d'être mentionnées.

L'amplificateur à couples thermo-électriques de Kipp en Zonen est basé sur le schéma optique suivant :

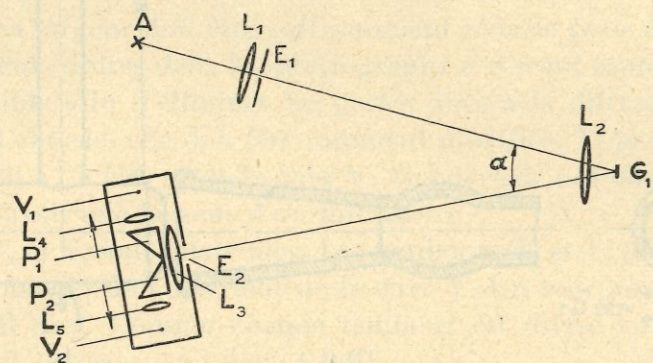


FIG. 9.

Un faisceau lumineux intense, provenant d'une lampe A, est concentré sur le miroir G_1 du galvanomètre dont les déviations doivent être amplifiées. Le faisceau réfléchi tombe sur deux prismes à réflexion totale P_1 et P_2 . Ceux-ci le divisent en deux parties qui sont concentrées sur deux couples thermo-électriques V_1 et V_2 à indication rapide. Les couples doivent être connectés en opposition et placés en série dans le circuit d'un deuxième galvanomètre (*).

Dans la construction réalisée, A, L_1 et E_1 se trouvent au-dessus des prismes et aussi près que possible de ceux-ci, de manière à réduire l'angle α au minimum.

(*) Plusieurs auteurs ont préconisé l'emploi d'amplificateurs à cellules photo-électriques. D. H. FOLLETT (56), en particulier, a remplacé les couples V_1 et V_2 par des cellules dans un montage semblable à celui de KIPP en ZONEN. Le temps d'indication de l'amplificateur est alors pratiquement nul, mais la stabilité du spot n'est plus aussi bonne.

La lentille L_2 doit former une image d'un diaphragme rectangulaire placé en E_1 dans le plan d'un deuxième diaphragme rectangulaire E_2 placé contre L_3 .

Les plages éclairées sur les couples V_1 et V_2 ne doivent pas se déplacer lors de la rotation du miroir G_1 . Pour satisfaire à cette condition, le tirage de chacune des lentilles L_4 et L_5 doit être réglé pour qu'une image de G_1 se forme, sans parallaxe, sur V_1 et V_2 .

Le diaphragme E_2 , les lentilles L_3 , L_4 et L_5 , les prismes et les couples sont montés sur un chariot pouvant subir une translation horizontale perpendiculaire à la direction de l'axe optique de L_3 . Ce dispositif permet d'amener facilement l'instrument « au zéro » et donne la possibilité de déterminer aisément l'amplification produite. Nous allons donner quelques précisions au sujet de ces deux points.

Plaçons un écran opaque entre G_1 et L_3 . Le spot lumineux formé sur le cylindre enregistreur va prendre une position déterminée. Le miroir du galvanomètre G_1 étant supposé fixe, laissons tomber la lumière sur V_1 et V_2 . En général, le spot prendra une nouvelle position. Toutefois, comme les couples sont connectés « en opposition », il est possible de régler la position du miroir G_1 ainsi que celle du chariot pour que le spot conserve sa première position. Dans ce cas, l'amplificateur est dit « au zéro ». L'instrument doit toujours fonctionner aux environs de ce réglage pour que le déplacement du spot sur le cylindre enregistreur soit proportionnel aux énergies à mesurer.

Pour déterminer l'amplification, communiquons au chariot une translation de 0,2 mm. par exemple (ce qui correspond à un quart de tour de la vis prévue à cet effet). L'image de E_1 , formée par L_2 , se déplace donc de 0,2 mm. relativement à E_2 . Supposons que ce changement produise une déviation du spot de 200 mm. sur le cylindre enregistreur. Dans ce cas, le déplacement relatif de l'image de E_1 a donc été amplifié 1000 fois. En général, les mesures d'amplification se rapportent à une échelle située à un mètre du premier galvanomètre. Comme E_2 se trouve à 10 cm. du miroir G_1 , la valeur conventionnelle de l'amplification précédente est donc de 100. Nous appliquerons la même réduction dans la suite de l'exposé.

En pratique, en dehors des perturbations mécaniques, l'amplification est limitée par le mouvement brownien. G. ISING (57) a donné la formule permettant de calculer la grandeur des perturbations qui en résultent. La résistance de la pile thermo-électrique utilisée étant de 45 Ω, les déviations d'un galvanomètre « micro » peuvent être amplifiées 450 fois tout en évitant des perturbations trop grandes dues au mouvement brownien (*). Pour le galvanomètre « Moll original », l'amplification ne doit pas dépasser 400. Lorsqu'un galvanomètre de ce dernier type était relié à la pile, nous avons habituellement employé une amplification de 375. Avec le galvanomètre « micro », nous avons été obligé de nous

(*) Nous avons admis des oscillations moyennes de $\pm 0,5$ mm. pour le spot lumineux formé sur le cylindre enregistreur.

limiter à une amplification de 240, cet appareil, par suite de sa courte période, étant plus influencé que le précédent par les vibrations microsismiques.

Après avoir effectué différents essais, la disposition suivante a été adoptée pour les galvanomètres et l'amplificateur : ce dernier ainsi que le galvanomètre G_1 (Pl. 8) sont placés sur un pilier indépendant du bâtiment; le galvanomètre G_2 se trouve sur la table en marbre supportant le spectrographe, elle-même indépendante du bâtiment. La figure 10 donne, en projection verticale, un schéma du dispositif utilisé pour former le spot lumineux sur la fenêtre E du cylindre enregistreur C. Vu la place occupée par G_2 , le faisceau de lumière G_2m' est réfléchi par deux miroirs plans m' et m'' avant d'atteindre le cylindre. Chacun de ces miroirs mesure $50 \times 10 \times 0,5$ cm. et ont été obtenus en déposant de l'aluminium sur des glaces bien planes. Ils donnent la possibilité de déplacer facilement le spot lumineux sur le cylindre sans toucher à G_2 .

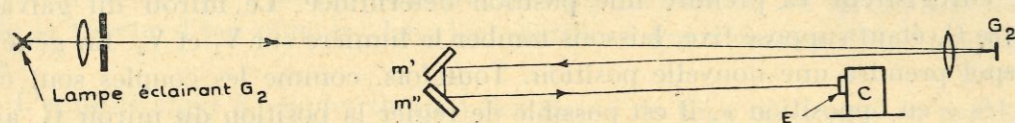


FIG. 10.

L'obtention d'un spot suffisamment stable nécessite de nombreuses précautions lorsque l'amplification est élevée.

L'instabilité du spot peut provenir :

- 1 — de variations thermiques du milieu contenant le récepteur;
- 2 — d'influences électro-magnétiques créant des courants perturbateurs;
- 3 — de potentiels thermiques dans les galvanomètres;
- 4 — de perturbations mécaniques affectant les galvanomètres.

Ces différentes causes engendrent soit de la dérive, soit des perturbations accidentelles. Il faut évidemment essayer de réduire ces effets au minimum.

Rappelons que la pile thermo-électrique, compensée et fonctionnant dans le vide, se trouve à l'intérieur d'un cylindre à double paroi, isolé thermiquement de la plate-forme P_1 . D'autre part, ainsi que nous le signalons au paragraphe suivant, l'installation fonctionne dans un laboratoire à température constante.

Pour éviter autant que possible les perturbations électro-magnétiques, les connexions entre la pile T et le galvanomètre G_1 (Pl. 8), ainsi qu'entre l'amplificateur et le galvanomètre G_2 , sont effectuées à l'aide de fils de cuivre faradisés. Ceux-ci sont bien fixés sur toute leur longueur et les gaines de faradisation, de même que la masse du spectrographe, sont soigneusement reliées à la terre. De plus, G_1 est recouvert d'une boîte métallique pour le soustraire, autant que possible, aux influences extérieures (variations de température ou influences électro-magnétiques). L'ouverture pratiquée dans cette boîte pour laisser passer les

faisceaux lumineux était recouverte d'une feuille mince de mica lors de l'emploi en G_1 d'un galvanomètre « Moll original ».

La lampe de l'amplificateur doit avoir une intensité constante. Pour éviter les mauvais contacts, il est nécessaire de souder les fils amenant le courant aux bornes de cette lampe.

Malgré toutes les précautions prises, une dérive de 3 cm. en une heure était généralement observée en employant deux galvanomètres du type « Moll original ». En vue d'en trouver la cause, nous avons remplacé le galvanomètre G_1 par un miroir fixe. Lors de cet essai, la lampe de l'amplificateur fonctionnait sous son régime normal et la batterie était suffisamment reposée. En utilisant une amplification de 375, le spot se stabilisait trois heures et demie après avoir allumé la lampe. Toutefois, lorsque cette dernière avait fonctionné pendant deux heures, la dérive se réduisait à 1 cm. à l'heure. Les mêmes résultats ont été obtenus avec chacune de nos deux batteries.

En plaçant G_1 , court-circuité, sur l'installation, nous avons alors constaté que la dérive provenait en grande partie de ce galvanomètre. Dans ce cas, il fallait attendre environ six heures après avoir allumé la lampe de l'amplificateur avant d'observer un spot relativement stable. Notons que la suspension du Moll original est particulièrement sensible aux variations de température. Comme le faisceau lumineux, qui doit éclairer le miroir du galvanomètre, échauffe celui-ci ainsi que l'enceinte qui le contient, il faut donc attendre qu'un équilibre de température se réalise avant d'obtenir un spot stable. Lorsque les circonstances le permettent, nous nous proposons de faire de nouveaux essais à ce sujet, en employant un galvanomètre spécialement construit pour réduire l'effet thermique au minimum.

La dérive était nulle ou très faible avec les galvanomètres « micro »; mais, dans ce cas, ainsi que nous l'avons déjà signalé, nous avons dû nous limiter à une amplification d'environ 240 à cause des vibrations microsismiques du pilier sur lequel se trouve le premier galvanomètre.

En vue de supprimer l'influence de ces vibrations, nous avons placé le galvanomètre sur une suspension Julius (58), l'amplificateur restant sur le pilier indépendant. Cependant, par suite des oscillations de ce dernier par rapport à la suspension, les perturbations produites étaient plus grandes que dans le premier cas. Lors de cet essai, l'amplification était de 240. Comme le galvanomètre se trouvait à 20 cm. de l'amplificateur, il suffisait d'un déplacement du pilier de 0,001 mm. pour provoquer une variation de 1,2 mm. dans la position du spot.

Tout déplacement relatif de l'amplificateur par rapport au galvanomètre peut évidemment être évité en plaçant ces deux instruments sur une même suspension Julius ou Müller (59), mais le réglage de l'amplificateur devient alors particulièrement difficile.

Aucune amélioration n'a été observée en plaçant une forte épaisseur de papier (environ 30 cm.) entre le galvanomètre et le pilier. Un résultat tangible

serait sans doute obtenu en remplaçant le papier par du caoutchouc mousse, mais, vu les circonstances, nous n'avons pu nous procurer cette matière en quantité suffisante (*). Nous nous proposons aussi d'effectuer des essais en plaçant le galvanomètre et l'amplificateur sur une console scellée dans les deux murs d'un coin du laboratoire.

§ 5. Précautions prises pour l'installation du spectrographe

A cause de l'emploi de réseaux, il convient de placer le spectrographe dans un local à température constante (**). D'autre part, il faut éviter l'humidité par suite de l'utilisation d'une fenêtre en KBr devant la pile thermo-électrique.

Un laboratoire a été spécialement construit afin de réaliser ces conditions. Il se trouve dans un sous-sol et comprend une pièce de $8,2 \times 7,2$ m., voisine d'un cabinet de préparation, tous deux d'accès indépendant (Pl. 8). Les parois sont constituées par deux murs séparés par une couche d'air de 6 cm. (qui peut être asséchée). Le mur extérieur de 90 cm. d'épaisseur est tapissé de toile de jute imprégnée de bitume, tandis que le mur intérieur de 12 cm. d'épaisseur est recouvert de 5 cm. d'ardennite. Le plancher en béton est à 90 cm. du sol (l'intervalle d'air entre la terre et le béton est ventilé). Il est tapissé de toile de jute imprégnée de bitume, de même que le plafond. Ce dernier est aussi recouvert d'ardennite. Des portes doubles donnent accès à ce local.

Le chauffage central à eau chaude est réglé pour $16^\circ \pm 2^\circ$. Un chauffage électrique d'appoint permet d'obtenir 20° avec une précision de l'ordre du dixième de degré. Pour ce faire, un fil en nichrome de 14 m. de longueur, permettant d'obtenir une puissance de 1400 Watts, a été tendu à 50 cm. du plafond. Ce chauffage est contrôlé par un appareil automatique fourni par Baily-Grundy-Barrett, Cambridge (Angl.). Le dispositif nous donne entière satisfaction. Nous reproduisons figure 11 un enregistrement de la température obtenu, entre le 7 et le 14 juin 1943, en plaçant l'enregistreur près du réseau.

La température peut être uniformisée rapidement par quatre grands ventilateurs. Toutefois, pour nos expériences, leur emploi n'a pas été jugé nécessaire.

Une insufflation d'air chaud permet l'aération du laboratoire, tout en maintenant une température constante. Une installation automatique règle le chauffage de l'air insufflé avant son entrée dans le local.

Le laboratoire présente toutes les commodités désirables en électricité, gaz et eau. Cependant, pour éviter l'humidité, il n'y a pas d'évier mais seulement des tuyaux d'arrivée et de départ, permettant une circulation d'eau dans les appareils qui doivent être refroidis.

Cinq blocs en béton ont été construits indépendamment du bâtiment. Un

(*) Une épaisseur de caoutchouc mousse de 1 cm. n'améliorait pas la stabilité du spot.

(**) Le réseau à 576 traits par millimètre est gravé sur du métal dont le coefficient de dilatation est égal à 16.10^{-6} . Une élévation de température d'un degré peut provoquer une variation de longueur d'onde de $0,2 \text{ \AA}$ à 15.000 \AA .

de ceux-ci supporte la table de marbre ($2,5 \times 1,2$ m.) sur laquelle se trouve le spectrographe. Un autre a été spécialement prévu pour l'utilisation du miroir M_7 (Pl. 8) de 4 m. de distance focale, qui, dans certains cas, remplacera le miroir parabolique M_7 (Pl. 9). Un troisième supporte le galvanomètre G_1 et l'amplificateur, ainsi que nous l'avons déjà signalé.

Deux ouvertures de 20 cm. de largeur et de 50 cm. de hauteur ont été pratiquées dans le mur de séparation entre le grand laboratoire et le cabinet de préparation. Elles permettent l'emploi de fours électriques sans influencer la température du local où se trouve le spectrographe.

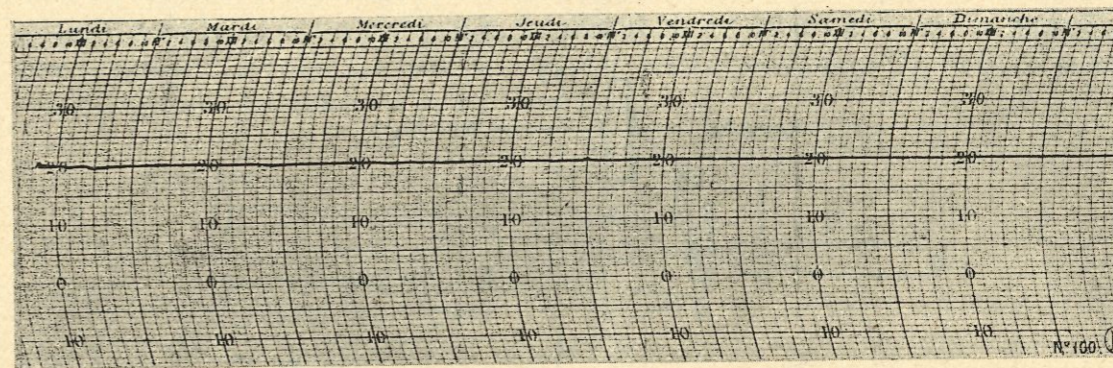


FIG. 11. — Enregistrement de la température du laboratoire du 7 au 14 juin 1943.

Un faisceau de rayons solaires peut entrer dans le laboratoire par une cheminée verticale en éternit maçonné de 40 cm. de diamètre intérieur et de 10 m. de hauteur. Elle débouche dans le coin S.-O. du grand laboratoire. Quoique cette cheminée soit ouverte pendant plusieurs heures durant les observations, la variation de température près du spectrographe reste de l'ordre du dixième de degré par suite du grand volume du local et de la régularisation automatique.

Lors de l'étude du spectre du soleil ou de la vapeur d'eau, les radiations diffusées dans le local pourraient voiler le papier photographique entourant le cylindre enregistreur. Un écran et des rideaux ont été placés en e et r (Pl. 9) pour éviter cet inconvénient.

§ 6. Réglage de l'optique

Avant de procéder à ce réglage, les mécanismes de rotation du prisme P (Pl. 9) et du réseau R sont fixés sur les plates-formes P_1 et P_2 . Il convient d'assurer aussi bien que possible l'horizontalité de la plate-forme P_1 et la verticalité de l'axe de rotation des supports de P et R.

Nous traçons ensuite sur P_1 la projection horizontale des droites $M_a M_b$, $M_2 P$, $M_3 M_4$, $M_7 M_8$ (*) ainsi que celle des plans perpendiculaires aux directions $M_3 M_4$,

(*) Les M représentent les centres des miroirs, et P l'intersection de l'axe de rotation du support du prisme et de la plate-forme P_1 .

M_7, M_8 , passant par F'_2 et F'_3 (fig. 12), points situés respectivement à 2 cm. de F_2 et F_3 .

a) RÉGLAGE DU SPECTROGRAPHE À RÉSEAU PROPREMENT DIT MUNI DU PETIT RÉSEAU (576 traits/mm.). — La fente F_2 (Pl. 9) ainsi que les miroirs M_4 et M_5 sont placés les premiers sur P_1 .

Le plan de F_2 est rendu perpendiculaire à la direction M_3, M_4 en utilisant l'ombre portée par des fils à plomb suspendus au-dessus de 2' et 3' (*) (fig. 12). Ces fils ainsi que le montage de la fente sont éclairés par une lampe à filament rectiligne (**) placée en 1'.

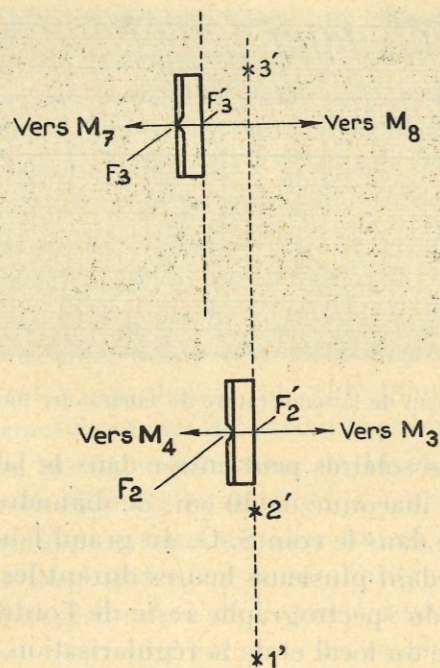


FIG. 12.

Une lampe semblable située en 1 (Pl. 9) (à environ 4 m. de F_2) ainsi que des fils à plomb suspendus au-dessus de 2 et 3 permettent le réglage de la verticalité des lèvres de la fente F_2 , ainsi que la mise en place de M_4 , par rapport au trait M_3, M_4 . Les fils à plomb étant retirés, le faisceau lumineux traversant F_2 donne la possibilité de régler M_4 en direction et en inclinaison.

Le réglage de M_5 est effectué au moyen d'une lampe placée entre M_3 et F_2 , sur l'axe optique de M_4 . Le faisceau lumineux entrant par F_2 et réfléchi par M_4 puis par M_5 doit tomber sur un écran remplaçant un des grands réseaux R. Les vis

(*) La fente F_2 étant située aussi près que possible de M_5 , il est nécessaire d'utiliser la partie arrière de son support pour régler le plan de cette fente.

(**) Pour tous les réglages, nous avons employé des lampes Philips à filament rectiligne 4V—25W.

calantes V'_1, V'_2 et V'_3 sont réglées pour que le centre de l'écran soit à peu près à la même hauteur de P_1 que le centre de M_5 . Par suite du trou pratiqué dans le miroir, on observe deux traces lumineuses sur l'écran. M_5 est incliné pour que ces traces se placent symétriquement par rapport à la médiane horizontale de l'écran. Le réglage en direction doit faire correspondre le centre de M_5 au centre du réseau (*). Pour satisfaire à cette condition dans la construction réalisée, il faut décaler légèrement les traces lumineuses par rapport à la médiane verticale de l'écran, le centre de M_5 n'étant pas situé sur l'axe optique de M_4 .

F_2 et M_5 étant fixés définitivement, le tirage de M_4 est réglé par autocollimation en réalisant le montage schématisé figure 13. Dans ce dispositif, un miroir plan R' remplace l'écran placé en R. Le miroir M_4 est éclairé à travers la fente F_2 , par la lampe l , à l'aide du petit miroir plan m . Le microscope M , mis au point sur F_2 , permet d'examiner l'image de retour.

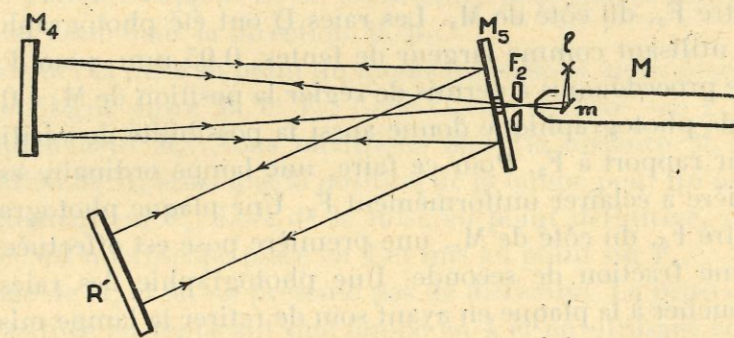


FIG. 13.

Les mêmes procédés sont ensuite appliqués aux réglages de F_3, M_6 et M_7 . Toutefois, l'autocollimation n'est plus utilisée pour la mise au point définitive de ce dernier miroir. Avant de procéder à celle-ci, le réseau à 576 traits par millimètre est fixé sur l'installation.

La surface gravée de ce réseau est située en dehors de la plage obscure due au trou de M_5 . Le plan de cette surface doit être orienté parallèlement à deux des vis calantes, soient V'_2 et V'_3 (Pl. 9) et passé par le centre de la plate-forme p . L'horizontalité de cette plate-forme étant assurée approximativement, le réglage du réseau est effectué en utilisant une lampe au sodium (Philora SO). Cette lampe est placée entre M_3 et F_2 et focalisée sur cette fente pour que le faisceau qui la traverse éclaire uniformément le réseau après avoir été réfléchi par M_4 et M_5 . En tournant aux manivelles m_1 ou m_2 et en agissant sur V'_1 , le réseau est orienté pour que le faisceau réfléchi par la surface plane entourant la partie gravée soit dirigé vers M_6 puis vers M_7 et forme finalement une image de F_2 bien centrée sur F_3 . La netteté de cette image « centrale » est obtenue en réglant le

(*) Les centres de M_5, R et M_6 doivent se correspondre pour que la plage non éclairée du réseau provenant du trou de M_5 se projette au centre de M_6 .

tirage de M_7 . Les faisceaux diffractés dans les premiers, deuxièmes et même troisièmes ordres s'observent aisément.

Dirigeons vers M_6 un des deuxièmes ordres, par exemple, pour que les raies D de NaI se forment à proximité de F_2 . En général, on remarquera un décalage en hauteur entre ces raies et la fente. Pour le supprimer, il suffit de tourner le réseau *dans son plan* au moyen des vis antagonistes prévues à cet effet. Ce réglage bien effectué, aucun décalage en hauteur par rapport à F_3 ne peut plus être observé pour les raies D formées dans les autres ordres.

La mise au point de M_7 peut être améliorée en examinant le spectre à l'aide d'un microscope, placé entre F_3 et M_8 et focalisé sur F_3 . Toutefois, comme le microscope utilisé avait une ouverture plus petite que celle du spectrographe, même lorsque ce dernier était muni du petit réseau, le réglage définitif a été effectué par photographie. Comme les lèvres de F_2 sont tournées vers M_3 et celles de F_3 vers M_7 , la lampe au sodium a été placée en M_8 et la plaque photographique, appliquée contre F_2 , du côté de M_3 . Les raies D ont été photographiées dans ces conditions en utilisant comme largeur de fentes, 0,05 mm. pour F_3 et 2,4 mm. pour F_2 (*). Ce procédé nous a permis de régler la position de M_7 à 0,5 mm. près.

La méthode photographique donne aussi la possibilité de vérifier le parallélisme de F_3 par rapport à F_2 . Pour ce faire, une lampe ordinaire est placée près de M_4 de manière à éclairer uniformément F_2 . Une plaque photographique étant appliquée contre F_2 , du côté de M_3 , une première pose est effectuée en allumant cette lampe une fraction de seconde. Une photographie des raies D est prise ensuite sans toucher à la plaque en ayant soin de retirer la lampe mise près de M_4 . Les temps de pose sont réglés pour assurer un contraste bien marqué entre les deux photographies superposées. Un cliché obtenu dans ces conditions nous a permis de constater que le parallélisme des fentes était assuré à 0,02 mm. près sur toute la hauteur de celles-ci (25 mm.).

b) RÉGLAGE DU MONOCHROMATEUR ET DES MIROIRS M_a ET M_b . — Le miroir M_3 est placé sur la plate-forme P_1 , à environ 50 cm. de F_2 .

Pour faire correspondre le réglage du monochromateur avec celui du spectrographe à réseau, nous plaçons une lampe à filament rectiligne entre M_8 et F_3 . Elle doit être centrée sur l'axe optique de M_7 . Un miroir plan remplaçant le réseau est orienté pour que le faisceau, qui entre par F_3 , sorte par F_2 . Par suite du trou de M_6 , les rayons lumineux donnent deux traces sur un écran placé contre M_3 . Ce miroir est centré par rapport à ces traces, en le déplaçant perpendiculairement à la direction 2-3. Le réglage de son tirage est ensuite effectué par autocollimation, en utilisant un miroir plan auxiliaire, placé près de F_2 . M_3 est alors réglé en direction et en inclinaison pour que les faisceaux lumineux traversant F_2 se réfléchissent vers cette fente et donnent deux traces symétriques par rapport au centre de cette dernière.

(*) Dans le premier ordre, la distance des raies D sur la plaque est de 0,34 mm., la différence de longueurs d'onde étant de 6 Å.

Pour faciliter les réglages suivants, la lampe située entre M_8 et F_3 est déplacée en 4 (entre M_4 et F_2) et son filament est centré sur l'axe optique de M_3 . Le faisceau lumineux traversant F_2 permet :

- 1 — le réglage en direction de M_3 ;
- 2 — la mise en place du miroir court-circuitant le prisme;
- 3 — le réglage de M_2 en inclinaison et en direction.

Ce dernier réglage est effectué pour que l'angle formé par les faisceaux incidents [direction PM_2 (*)] et réfléchi [direction M_2M_1 (*)] soit égal à l'angle F_2M_3P (*).

F_1 et M_1 sont ensuite placés sur l'installation. F_1 doit occuper, aussi exactement que possible, la place indiquée sur la figure 9. Le miroir M_1 est réglé pour que le faisceau lumineux réfléchi par M_2 , tombe en son centre puis passe par F_1 . La partie inférieure du support de M_1 est orientée pour que ce miroir puisse subir une translation lente dans la direction M_1M_2 .

Pour effectuer la mise au point du monochromateur, nous plaçons une lampe à filament rectiligne entre M_6 et F_1 . Celle-ci est focalisée sur F_1 de manière à éclairer complètement M_2 . Nous modifions alors la distance M_1M_2 (M_2 restant fixe), la direction de M_1 ainsi que la position de la lampe pour qu'une image de F_1 se forme nettement sur F_2 . Lors de la mise au point définitive, cette image est examinée avec un microscope placé en 4 et mis au point sur F_2 .

Le réglage de M_a et M_b ne présente pas de difficulté. La mise en place de ces miroirs est facilitée en remplaçant une lampe en 4 et en utilisant comme guide le faisceau sortant par F_1 .

c) RÉGLAGE DU MIROIR ELLIPTIQUE ET DE LA PILE THERMO-ÉLECTRIQUE. — Le cylindre contenant le miroir elliptique est orienté suivant M_7F_3 et placé pour que le centre de M_8 se trouve approximativement à 445 mm. de F_3 (**), cette distance étant prise suivant l'axe optique de M_7 . Le miroir M_8 est centré sur cet axe en utilisant un dispositif analogue à celui employé pour centrer M_3 (la lampe est située entre M_3 et F_2 ; deux faisceaux sortent par F_3). Le tirage de M_8 est ensuite modifié pour que la distance F_3M_8 soit égale, aussi exactement que possible, à 445 mm. Un mouvement lent est prévu à cet effet. Pour régler le miroir en direction et en inclinaison, nous plaçons un écran E (fig. 14) perpendiculairement à la direction F_3M_8 et approximativement à 89 mm. du centre de M_8 . Nous découpons dans cet écran deux ouvertures rectangulaires (fig. 14 a) destinées à laisser passer une partie des faisceaux lumineux provenant de la lampe située entre M_3 et F_2 . L'écran E est fixé pour que les faisceaux tombant sur le miroir tra-

(*) M_1 , M_2 et M_3 , projections verticales du centre de chaque miroir sur P_1 ; P, projection verticale de l'axe de rotation du prisme sur P_1 ; F_2 : projection verticale du centre de la fente sur P_1 .

(**) Distances focales de M_8 , 445 mm. et 89 mm.

versent les ouvertures symétriquement par rapport à P, milieu de la distance AB. Le miroir elliptique est orienté pour que les traces, données sur E par les faisceaux réfléchis, soient centrées sur P.

Un des récepteurs de la pile thermo-électrique T (Pl. 9) est placé ensuite au deuxième foyer de M_8 . Le réglage définitif est effectué en essayant d'obtenir une déviation aussi grande que possible du spot lumineux sur le cylindre enregistreur, pour une quantité donnée d'énergie traversant F_3 . Pour cette mise au point, nous avons employé la raie verte de HgI, la source étant en S_1 .

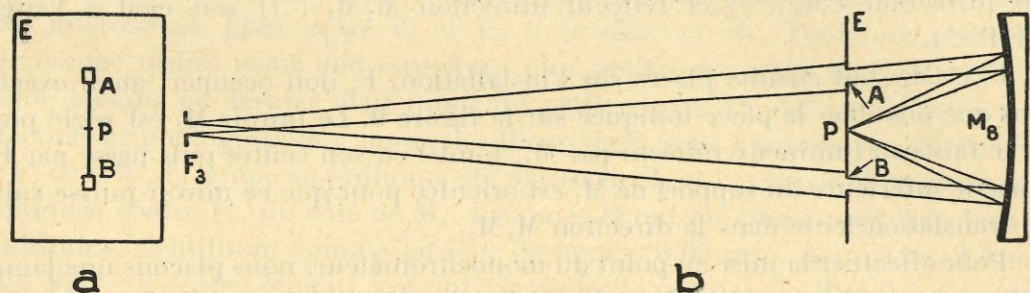


FIG. 14.

d) RÉGLAGE DES GRANDS RÉSEAUX À ÉCHELETTES. — Le procédé utilisé pour régler les grands réseaux diffère un peu de celui employé pour le réseau à 576 traits par millimètre. Comme pour ce dernier, un des grands réseaux est placé en R pour que la surface gravée soit parallèle aux vis V'_2 et V'_3 (Pl. 9) et passe par le centre de la plate-forme p . La pièce optique est ensuite orientée afin que le faisceau provenant de S_1 et réfléchi par les grandes faces des traits (voir fig. 1) se dirige vers M_6 . On peut alors observer une bande lumineuse dans le plan de F_3 . Nous mettons ensuite un niveau à bulle d'air sur la partie supérieure du réseau. Les vis V'_2 et V'_3 sont réglées pour que la bulle vienne entre ses repères. En tournant à V'_1 , nous supprimons le décalage en hauteur existant entre la bande lumineuse et F_3 . Toutefois, le réglage définitif de V'_1 est effectué de manière à obtenir une déviation maximum du spot lumineux sur le cylindre enregistreur pour une direction déterminée du réseau.

e) RÉGLAGE DES PRISMES ET RÉALISATION EXPÉRIMENTALE DE LA CAME C_1 (Pl. 9). — Le bras Br_1 (Pl. 9) est tout d'abord fixé pour que la distance entre le centre de rotation de la came et le tenon h_1 corresponde à celle déterminée théoriquement pour la raie verte de HgI. En tournant la pièce J_2 (Pl. 6) par rapport à Br_1 , orientons alors le miroir qui remplace P pour qu'une image de F_1 se forme sur F_2 . Plaçons ensuite le prisme en NaCl à bonne hauteur et tournons aux vis e_1 (Pl. 6b) pour que la raie verte de HgI tombe sur F_2 . Le faisceau qui traverse cette fente doit éclairer uniformément le réseau R.

Le prisme en KBr peut être réglé d'une manière analogue.

Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre III, § 3, d, la forme de la came doit être déterminée expérimentalement. Pour ce faire, une vis micrométrique

fixée sur P_2 permet de communiquer un mouvement de rotation à Br_1 . Le tenon h_1 est remplacé par un pointeau placé de façon que la pointe coïncide avec la projection horizontale de l'arête de h_1 , qui doit être en contact avec la came. Pour chaque réseau, deux axes de B_3 sont couplés aux axes de B_4 assurant le rapport prévu entre la vitesse de rotation du prisme et du réseau. Connaissant la correspondance entre la graduation de C_2 et la longueur d'onde moyenne traversant F_2 (*), on donne au réseau différentes orientations. Pour chacune de celles-ci, on cherche à obtenir le maximum de déviation du spot galvanométrique en tournant la vis micrométrique. Chaque position du pointeau est soigneusement repérée sur la plaque métallique destinée à la construction de la came et la graduation, qui y correspond, est lue sur C_1 .

La came étant taillée puis fixée sur son support, il est utile de dresser une table donnant la correspondance, pour différentes positions de P, entre la longueur d'onde moyenne du faisceau traversant F_2 et la graduation de C_1 qui s'y rapporte.

§ 7. Principe de la mesure d'une longueur d'onde et localisation du « blaze »

Considérons la figure 15, sur laquelle la ligne OPQRS représente une coupe effectuée perpendiculairement aux traits d'un réseau à échelottes. Soient B et B' deux points correspondants successifs. La droite BB' est parallèle à la surface initiale du réseau et BN représente la normale en B à cette surface. Soient θ_1 et θ_2 les angles d'incidence et de diffraction. Désignons par Φ l'angle ABC et par BD la bissectrice de cet angle. Nous appellerons Θ l'angle formé par cette bissectrice et la normale BN.

Abaissons de B' des perpendiculaires sur AB et BC. Le maximum principal d'ordre m pour la longueur d'onde λ est formé lorsque

$$EB + BF = m\lambda.$$

Nous obtenons donc

$$\left. \begin{aligned} m\lambda &= a \sin \theta_1 + a \sin \theta_2 \\ &= a \sin \left(\theta - \frac{\Phi}{2} \right) + a \sin \left(\theta + \frac{\Phi}{2} \right) \\ &= 2a \cos \frac{\Phi}{2} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ou

$$m\lambda = K \sin \theta \quad (6)$$

en posant

$$K = 2a \cos \frac{\Phi}{2}. \quad (7)$$

Comme la rotation du réseau n'influence pas Φ , cet angle ne change pas au

(*) Cette relation peut être déterminée au moyen de la formule (5) donnée dans le paragraphe suivant.

cours d'un enregistrement. K est appelée habituellement « constante du spectrographe ».

Les valeurs de θ sont mesurées au moyen du cercle C_2 . Il faut donc déterminer en premier lieu la graduation du cercle qui correspond à $\theta=0$. A cet effet, le réseau est orienté de manière à faire coïncider la normale BN avec la bissectrice BD . Dans ce cas, « l'image centrale » tombe sur la pile thermo-électrique et la déviation du spot lumineux sur le cylindre enregistreur atteint un maximum. La graduation du cercle correspondant à cette position du réseau est prise comme origine des θ .

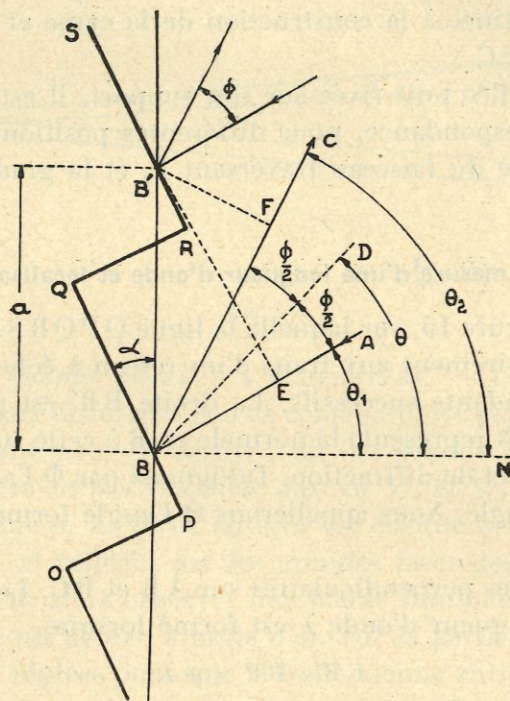


FIG. 15.

Lorsque le réseau n'est pas à échelottes, cette origine peut encore être obtenue en repérant la position d'une raie déterminée dans les deux spectres d'un même ordre.

En général, K est calculée en appliquant la formule (6). Pour ce faire, il suffit de déterminer l'angle θ correspondant à une raie de longueur d'onde connue.

En 1938, SHEARING et PLYLER (60) ont donné une liste de vingt longueurs d'onde, qui sont particulièrement intéressantes à utiliser pour calibrer un spectrographe de 2 à 24μ . Pour la région comprise entre 1 et 2μ , la raie de HgI, $\lambda 10139,75 \text{ \AA} \pm 0,2$ (*), mesurée par VOLK (61), a été habituellement employée jusqu'à présent.

(*) Cette longueur d'onde est exprimée en angströms internationaux. A notre connaissance, une détermination plus précise de la longueur d'onde $10139,75 \text{ \AA}$ n'a pas encore été effectuée.

En vue de comparer nos mesures de longueurs d'onde avec celles de cet auteur, nous avons calculé la constante K de notre instrument en nous basant sur $\lambda 10139,75 \text{ \AA}$. Cette détermination a donné $K=34348,5$. Ayant ensuite effectué des pointés sur les autres raies intenses du spectre infra-rouge de HgI, nous avons constaté que nos résultats étaient en excellent accord avec ceux de VOLK, la plus grande différence s'élevant à $0,4 \text{ \AA}$.

La formule (6) permet aussi de localiser le « blaze » Λ . Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre I, § 1, celui-ci correspond à la direction BC (fig. 15) lorsque BD est perpendiculaire à BQ . Désignons par α l'angle QBB' . Pour calculer Λ , il suffit de donner à θ la valeur α dans la formule (6). On obtient

$$m \Lambda = K \sin \alpha.$$

Dans le cas du réseau à $94,4$ traits par millimètre,

$$\alpha = 28^\circ \quad K = 209414.$$

On trouve donc, dans le premier ordre, $\Lambda = 98314 \text{ \AA}$.

En principe, le réseau permet d'étudier un certain domaine spectral de chaque côté de $9,8\mu$. Toutefois, comme l'émission d'énergie diminue rapidement lorsque la longueur d'onde augmente, le réseau à $94,4$ traits par millimètre est principalement employé de 5 à 10μ (dans le premier ordre).

§ 8. Étude de l'instrument

a) LES FENTES F_2 ET F_3 (Pl. 9). — Une modification de la distance « centre de F_2 -centre de F_3 » influence la détermination des longueurs d'onde en faisant varier les angles θ et Φ . Or, cette distance peut changer lors de la fermeture et de l'ouverture des fentes. Il convient donc de connaître les limites de ces variations. D'autre part, il faut déterminer la correspondance qui existe entre les indications aux tambours T_2 et T_3 et les ouvertures effectives de F_2 et F_3 .

Des graduations de $0,05 \text{ mm.}$ en $0,05 \text{ mm.}$ ont été indiquées sur les tambours T_2 et T_3 dans un intervalle s'étendant de $0,05 \text{ mm.}$ à 1 mm. Les largeurs des fentes qui y correspondent ont été mesurées à l'aide d'un microscope muni d'un oculaire micrométrique.

Nous sommes arrivé aux constatations suivantes :

1° pour chaque fente, les différences entre les lectures effectuées au micromètre et celles données aux tambours ne dépassent pas $0,005 \text{ mm.}$;

2° la variation maximum dans la position du centre est de $0,006 \text{ mm.}$ pour F_2 et de $0,015 \text{ mm.}$ pour F_3 , la variation maximum de la distance F_2 - F_3 étant de $0,02 \text{ mm.}$ Toutefois, pour observer des changements aussi petits, il faut indiquer les différentes graduations en fermant les fentes. Lorsque les mesures sont effectuées en les ouvrant, la distance F_2 - F_3 peut varier de $0,15 \text{ mm.}$

Si une telle modification se produit entre une détermination de l'image centrale et un pointé sur une raie déterminée, il en résulte une erreur de $15''$ sur

l'angle Θ , qui correspond à cette raie. Pour une variation de 0,02 mm., l'erreur sur Θ est de 2". Comme le cercle C_2 permet des mesures d'angle avec une erreur quadratique moyenne de $\pm 1''$, il est essentiel de ne pas modifier la largeur des fentes F_2 et F_3 entre la prise d'un spectre et la détermination de l'image centrale qui s'y rapporte. Il faut prendre aussi la même précaution lors des différents pointés effectués pour calculer K .

Pour obtenir les enregistrements reproduits sur les planches 11 à 25, nous avons utilisé des fentes F_2 et F_3 ayant une largeur égale ou supérieure à 0,1 mm. Pour ces ouvertures, l'image centrale donne une déviation du spot lumineux qui dépasse considérablement la longueur de la règle du cylindre enregistreur. Comme il faut alors éviter de modifier la largeur des fentes, la déviation est ramenée dans les limites prévues en plaçant des épaisseurs de papier ou de verre translucide entre la source et la fente F_1 .

Lorsque la distance séparant les centres des fentes F_2 et F_3 varie de 0,15 mm., l'angle Φ change de 30" et la constante K , de 0,76 Å. Une variation de 0,02 mm. modifie Φ de 4" et K , de 0,06 Å. Cette dernière n'a pratiquement aucune influence, l'erreur quadratique moyenne sur K s'élevant à 1,23 Å. Il n'en est toutefois pas de même d'une variation de 0,15 mm. Dans la pratique courante, pour être certain de n'introduire aucune erreur due aux fentes, nous avons eu soin de ne pas modifier la largeur de ces dernières entre la détermination de la constante K et la prise de l'enregistrement qui s'y rapporte.

b) LE CERCLE-RÉSEAU. — Un deuxième microscope a été fixé à 180° du microscope L_2 pour déterminer l'erreur d'excentricité du cercle C_2 . Dans notre cas, celle-ci atteint 41". Comme cette valeur est assez élevée, il convient d'orienter le réseau par rapport au cercle, pour que l'intervalle de graduations habituellement utilisé se situe aux environs de celui correspondant au maximum ou au minimum de la courbe d'excentricité. L'effet de cette erreur est alors réduit au minimum. Il devient d'ailleurs pratiquement négligeable, en ayant soin de choisir une raie voisine du domaine à étudier pour déterminer la constante du spectrographe. Nous allons donner quelques précisions à ce sujet.

Soit ABC (fig. 16) une partie de la courbe d'excentricité, le minimum correspondant à la graduation 190°.

Pour le réseau à 576 traits par millimètre, l'image centrale se situe à 165° 00' 33".

En pointant sur le premier ordre le plus intense des raies de HgI,

$$\lambda_1 = 10139,75 \text{ Å} (*); \quad \lambda_2 = 13570,60 \text{ Å} (*); \quad \lambda_3 = 15295,25 \text{ Å} (*),$$

nous obtenons respectivement

$$182^\circ 10' 44'' \quad 188^\circ 16' 50'' \quad 191^\circ 27' 06'',$$

graduations qui tombent aux environs de celle correspondant au minimum de la courbe figuré 16.

(*) Mesures de VOLK (61).

Ces mesures permettent de déterminer les valeurs des Θ :

$$\Theta_1 = 17^\circ 10' 11''; \quad \Theta_2 = 23^\circ 16' 17''; \quad \Theta_3 = 26^\circ 26' 33''.$$

Les erreurs d'excentricité sur ces angles s'élèvent respectivement à

$$+ 3''4 \quad + 3''8 \quad + 3''8.$$

En partant de la mesure effectuée sur 10139,75 Å, nous trouvons

$$K_1 = 34348,32.$$

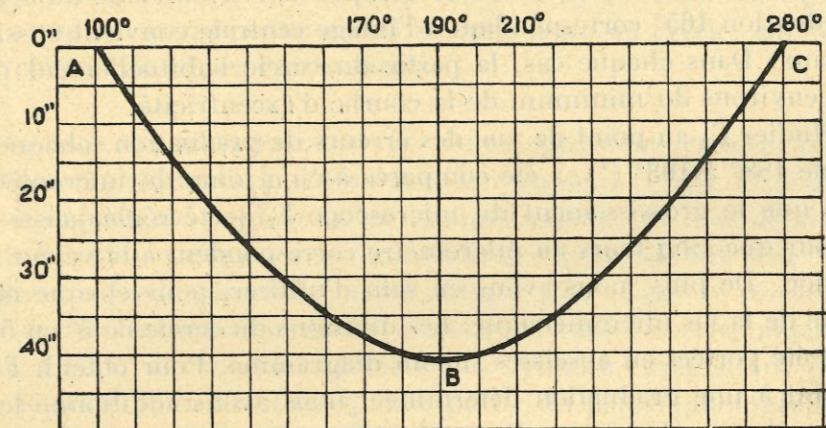


FIG. 16.

En utilisant cette constante et les mesures effectuées sur les deux autres raies, nous calculons

$$\lambda_2 = 13570,57 \text{ Å} \quad \text{et} \quad \lambda_3 = 15295,28 \text{ Å}.$$

En tenant compte des erreurs d'excentricité, nous obtenons

$$\begin{aligned} K'_1 &= 34346,51 \\ \lambda'_2 &= 13570,43 \text{ Å} & \lambda'_3 &= 15295,05 \text{ Å} \\ \lambda'_2 - \lambda_2 &= -0,14 \text{ Å} & \lambda'_3 - \lambda_3 &= -0,23 \text{ Å}. \end{aligned}$$

En nous basant sur la mesure effectuée pour 13570,60 Å, nous avons

$$\begin{aligned} K_2 &= 34348,40 \\ \lambda_1 &= 10139,77 \text{ Å} \quad \text{et} \quad \lambda_3 = 15295,31 \text{ Å} \end{aligned}$$

et en tenant compte des erreurs d'excentricité

$$\begin{aligned} K'_2 &= 34346,94 \\ \lambda'_1 &= 10139,87 \text{ Å} \quad \text{et} \quad \lambda'_3 = 15295,24 \text{ Å} \\ \lambda'_1 - \lambda_1 &= +0,10 \text{ Å} & \lambda'_3 - \lambda_3 &= -0,07 \text{ Å}. \end{aligned}$$

Comme les erreurs accidentelles sont de l'ordre de $\pm 0,7 \text{ Å}$ (erreur quadratique moyenne), l'erreur d'excentricité, quoique assez grande, a donc peu d'influence sur les valeurs des longueurs d'onde déterminées entre 10139 Å et 15295 Å.

Les calculs précédents permettent aussi de constater qu'en principe, pour étudier la région comprise entre $1,35\mu$ et $1,52\mu$, il est préférable de calibrer l'instrument en utilisant la raie $\lambda 13570,6 \text{ \AA}$. Toutefois, lors des recherches entreprises dans ce domaine spectral (cf. deuxième partie), nous avons utilisé habituellement des fentes F_2 et F_3 ayant comme largeur $0,1 \text{ mm}$. Dans ce cas, la déviation due à la raie $\lambda 13570,6 \text{ \AA}$ n'était pas suffisamment grande pour obtenir une valeur précise du θ qui y correspond. Nous avons donc employé $\lambda 10139,75 \text{ \AA}$ pour calibrer le spectrographe et nous avons appliqué une légère correction aux déterminations de longueurs d'onde, pour tenir compte de l'excentricité du cercle C_2 .

La graduation 165° correspondant à l'image centrale convient aussi pour les autres réseaux. Dans chaque cas, la partie du cercle habituellement utilisée se trouve aux environs du minimum de la courbe d'excentricité.

Pour étudier C_2 au point de vue des erreurs de graduation, chaque division du cercle, de 188° à 193° (*), a été comparée à cinq tours du micromètre de L_2 . Soulignons que le grossissement du microscope L_2 a été réglé, aussi bien que possible, pour que cinq tours au micromètre correspondent à la valeur moyenne d'une division. De plus, nous avons eu soin d'utiliser, pour chaque mesure, la même partie de la vis micrométrique. Les divisions du cercle de $5'$ en $5'$ à partir de 188° ont été portées en abscisses sur un diagramme. Pour obtenir l'ordonnée correspondant à une graduation déterminée, nous avons additionné les erreurs trouvées sur chacun des intervalles précédents. Ces erreurs proviennent d'un défaut de réglage du grossissement du microscope, d'erreurs de graduation et de lecture. L'erreur de grossissement a été éliminée, en prenant les écarts en ordonnée des différents points par rapport à une droite passant au mieux par ceux-ci et par l'origine. Les mêmes séries de pointés ayant été effectuées plusieurs fois, nous avons constaté que les erreurs de graduation sont du même ordre de grandeur que les erreurs de lecture, l'erreur quadratique moyenne étant, dans chaque cas, de $\pm 1''$. L'utilisation de différentes parties de la vis micrométrique ne modifie pas ce résultat.

c) CORRESPONDANCE ENTRE LA GRADUATION DU CERCLE-RÉSEAU ET LA NUMÉROTATION DU COMPTEUR VISUEL. — Le compteur C_v (Pl. 9) indique le nombre de tours des poulies D. Six cent quatre-vingt-quatre tours de celles-ci déplacent h_2 d'un millimètre, ce déplacement étant assuré à un millième de millimètre près. D'autre part, nous trouvons pratiquement que 684 numéros au compteur correspondent à $687'' \pm 1''$ au cercle, h_2 partant du milieu de sa course. Pour cette position, la distance de l'axe de rotation du réseau à la ligne de contact de Br_2 sur h_3 est de

$$\frac{1 \text{ mm.}}{\text{tg. } (687'' \pm 1)} = 300,2 \text{ mm.} \pm 0,4.$$

La position de h_2 peut être choisie pour qu'une variation d'une unité au

(*) Intervalle de graduations employé dans la deuxième partie de ce travail.

compteur équivaille à une rotation du cercle d'une seconde d'arc. En effet, si nous déplaçons h_2 de 20 mm . vers M_4 , un déplacement supplémentaire d'un millimètre correspond alors à $683''8$ (valeur calculée en nous basant sur $300,2 \text{ mm}$.). Notons que, sur une distance de $\pm 3,5 \text{ mm}$. à partir de la position choisie pour h_2 , il y a proportionnalité, à $0,001 \text{ mm}$. près (*), entre le déplacement de h_2 et la rotation du réseau. Un tel déplacement de 7 mm . correspond à 4788 tours de D. En utilisant le réseau à 576 traits par millimètre, nous avons pris habituellement deux enregistrements consécutifs, comprenant chacun mille numéros du compteur. Il est donc possible de choisir la position de h_2 pour qu'une variation d'une unité au compteur corresponde à une seconde d'arc au cercle, sur toute la longueur de chacun de ces enregistrements.

d) JEU DANS LES MÉCANISMES. — Le jeu existant dans les mécanismes reliant le cylindre enregistreur C, le réseau R et le compteur C_v (Pl. 9) peut introduire une erreur importante au début d'un enregistrement. En vue de déterminer le maximum de cette erreur, nous avons réalisé l'expérience suivante :

Supposons que le compteur visuel indique zéro et que le réseau soit couplé au cylindre, par l'intermédiaire de B_1 , un tour de l'axe c correspondant à un tiers de tour de l'axe a . Le volet à charnières du cylindre enregistreur étant ouvert, couvrons la fente pour n'utiliser qu'une partie du papier photographique.

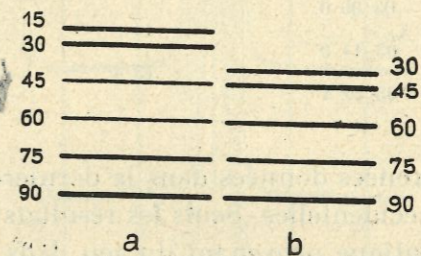


FIG. 17.

Pour introduire le jeu maximum entre les numéros 15 et 30 du compteur C_v , tournons aux poulies D pour que C_v marque un numéro égal ou supérieur à 30, puis changeant le sens de rotation, revenons à 15; les différents mécanismes sont alors en contact. Impressionnons le papier photographique en allumant l_2 (Pl. 8) et notons la graduation de C_2 . Indiquons ensuite 30, 45, 60, 75 et 90 au compteur sans changer le sens de rotation des poulies D. Pour chacun de ces numéros, allumons l_2 et effectuons la lecture à C_2 . En tournant en sens inverse, indiquons 30 au compteur. Utilisons la partie de la fente précédemment couverte, allumons l_2 et notons la graduation à C_2 . Re commençons ces deux dernières opérations pour les numéros 45, 60, 75 et 90 du compteur, ceux-ci étant indiqués sans changer le sens de rotation des poulies D.

(*) Lorsque h_2 est déplacé de $0,001 \text{ mm}$., le réseau tourne de $0''6$ (valeur calculée).

Dans les première et deuxième colonnes du tableau I, nous donnons respectivement les numéros du compteur et les moyennes des lectures correspondantes effectuées au cercle C₂. Dans la troisième colonne, nous avons noté les différences entre les moyennes successives et dans la quatrième, l'écart de ces différences par rapport à l'intervalle normal (15").

TABLEAU I

Numéro du compteur	Moyenne de 3 lectures au cercle C ₂ .	Différences entre les moy.	Différences par rapport à 15".
15	165°02'12"5	18"0	+ 3"
30	02 30 5	15 1	+ 0,1
45	02 45 6	13 6	- 1,4
60	02 59 2	15 6	+ 0,6
75	03 14 8	14 8	- 0,2
90	03 29 6		
30	165°02'26"6	18"9	+ 3"9
45	02 45 5	14 5	- 0,5
60	03 00 0	14	- 1
75	03 14 0	15 4	+ 0,4
90	03 29 4		

En général, les différences données dans la dernière colonne sont de l'ordre de grandeur des erreurs accidentelles. Seuls les résultats + 3" et + 3"9 accusent une légère erreur systématique provenant du jeu dans les mécanismes entre le réseau et le compteur C_v. Toutefois, une erreur plus grande est bien mise en évidence sur la reproduction photographique donnée figure 17. A côté de chacun des traits, nous avons indiqué le numéro du compteur qui y correspond. Ainsi que le montre la première série d'expériences (fig. 17 a), l'écart entre les traits 30 et 45 est normalement de 5 mm. Par suite du jeu, celui-ci est réduit à 1,9 mm. (fig. 17 b). Une erreur de 9"3 peut donc s'introduire au début d'un enregistrement. Pour l'éviter, il suffit de faire tourner le compteur pendant une vingtaine de tours avant de commencer l'enregistrement du spectre et avant de noter les premières lectures à C_v et à C₂.

e) CHOIX DE LA VITESSE DE ROTATION DU RÉSEAU À 576 TRAITS PAR MILLIMÈTRE. — Comme la pile thermo-électrique, l'amplificateur et les galvanomètres demandent un certain temps avant de « répondre » complètement à l'énergie tombant sur le couple, le spectre ne doit pas défiler trop vite sur le récepteur. Si la vitesse de rotation du réseau est trop grande, il en résulte des erreurs dues

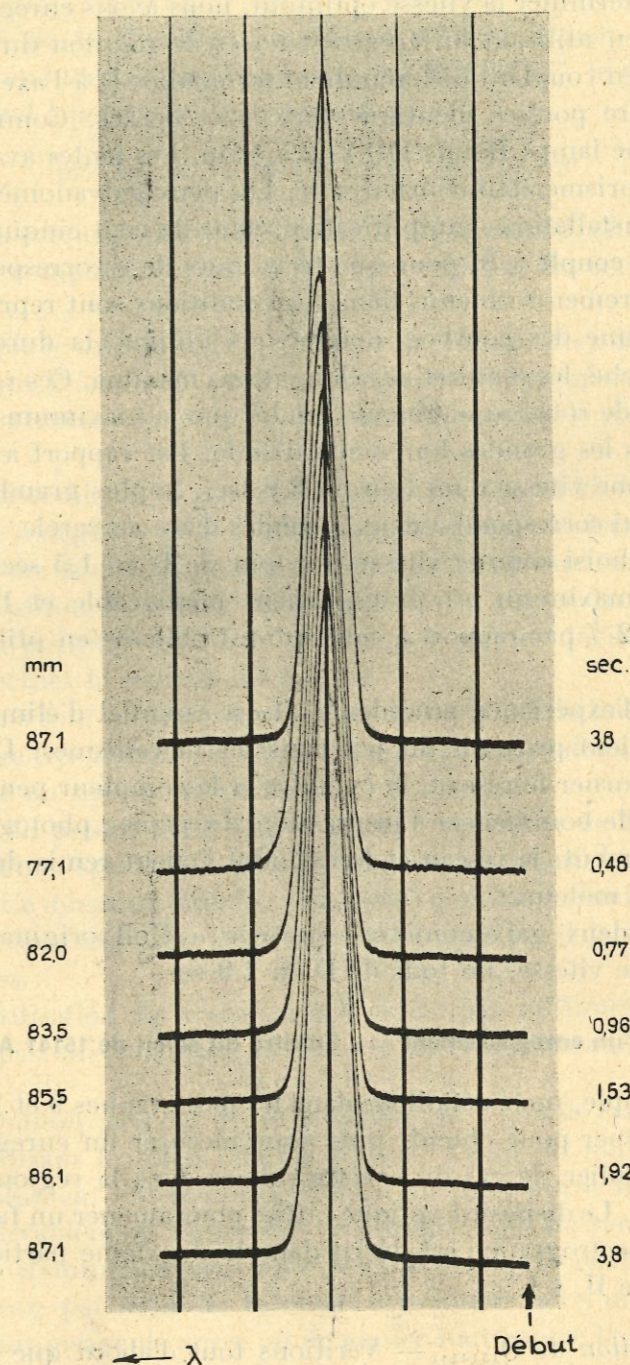


FIG. 18. — Enregistrement de la raie λ 5460 Å de HgI pour différentes vitesses de rotation du réseau.

aux déplacements du maximum des raies ainsi qu'une diminution du pouvoir séparateur pratique du spectrographe.

En vue de déterminer la vitesse optimum, nous avons enregistré la raie verte (5460 Å) de HgI en utilisant différentes vitesses de rotation du réseau. Celles-ci ont été obtenues en couplant différemment les poulies D à l'axe moteur, qui, lui aussi, porte quatre poulies identiques aux précédentes. Comme source, nous avons employé une lampe Heraïs 110 V. 2,5 Amp. Les fentes avaient une largeur de 0,1 mm. et le prisme était court-circuité. Les deux galvanomètres « micro » se trouvaient sur l'installation, l'amplification étant de cent cinquante. Le cylindre enregistreur était couplé à B₂ pour que trois tours de *c* correspondent à un tour de *a*. Les enregistrements obtenus dans ces conditions sont reproduits figure 18. A droite de chacune des courbes, nous avons indiqué la durée d'un tour des poulies D et à gauche, les mesures des élongations maxima. Ces valeurs diminuent lorsque la vitesse de rotation augmente tandis que le maximum se déplace systématiquement vers les grandes longueurs d'onde. Par rapport à l'enregistrement pris en utilisant une vitesse d'un tour en 3,8 sec., le plus grand déplacement est de 0,7 mm., ce qui correspond à deux secondes d'arc au cercle.

Nous avons choisi comme vitesse, un tour de D en 1,5 sec. Dans ce cas, le déplacement du maximum est pratiquement négligeable et l'élongation n'est diminuée que de 2 % par rapport à celle qui est obtenue en utilisant un tour en 3,8 sec.

Au cours de l'expérience précédente, il est essentiel d'éliminer les déplacements qui pourraient provenir du jeu dans les mécanismes. Dans chaque cas, nous avons fait tourner le réseau, le cylindre et le compteur pendant 25 tours de ce dernier avant de commencer l'impression du papier photographique. Après chaque enregistrement, le réseau et le cylindre étaient remis dans leur position initiale à l'aide du moteur.

En utilisant deux galvanomètres du type « Moll original », il convient d'employer comme vitesse, un tour de D en 1,9 sec.

§ 9. Prise d'un enregistrement — Spectre du soleil de 15141 Å à 15293 Å

A titre d'exemple, nous détaillons dans les paragraphes 9 et 10 les différentes opérations à effectuer pour obtenir puis pour mesurer un enregistrement. Nous traitons, en particulier, le cas du spectre solaire dans la région comprise entre 15141 Å et 15293 Å. Le dispositif optique utilisé pour amener un faisceau de rayons solaires dans le spectrographe est décrit dans la deuxième partie de cette publication, au chapitre II, § 1.

1. *Détermination de Θ_{15141} .* — Vérifions tout d'abord que les tambours T₂ et T₃ indiquent 0,1 mm., largeur de fente que nous avons habituellement utilisée pour enregistrer le spectre solaire aux environs de 1,5 μ.

Déterminons ensuite la constante K du spectrographe, en utilisant la raie $\lambda 10139,8$ Å de HgI. Nous trouvons $K = 34349$.

La formule $\lambda = K \sin \Theta$ permet alors de calculer l'angle de diffraction correspondant à 15141 Å. Nous obtenons $\Theta_{15141} = 26^\circ 09' 17''$.

2. *Obtention de la déviation maximum pour la région à enregistrer.* — L'image centrale étant approximativement (*) à $165^\circ 00' 50''$, le début de l'enregistrement correspond à peu près à la graduation

$$165^\circ 00' 50'' + 26^\circ 09' 17'' = 191^\circ 10' 07''.$$

Indiquons au cercle C₂, $191^\circ 10'$, l'index *i*₁ marquant 50, afin qu'une variation d'un numéro au compteur corresponde à une rotation du cercle d'une seconde d'arc.

Supposons que le miroir M_g (Pl. 8) forme une image du soleil, centrée sur F₁. Orientons le prisme P (en NaCl) pour qu'une partie de la région visible du spectre à petite dispersion traverse la fente F₂ et assurons-nous que le réseau est uniformément éclairé.

Indiquons au cercle C₁ la graduation correspondant à 15.000 Å. En tournant à *m*₃, de manière à déplacer vers l'infra-rouge le spectre se formant sur F₂, cherchons à obtenir une déviation maximum du spot lumineux sur le cylindre enregistreur. Si la position du réseau correspond à une région trop absorbée, il y a lieu d'utiliser une position voisine de manière à avoir une déviation suffisamment grande pour effectuer le réglage du prisme.

Les déviations sont souvent augmentées en réglant l'inclinaison du miroir M_g (Pl. 8). Ce réglage très important s'effectue en actionnant deux boutons-poussoirs qui commandent un moteur placé derrière M_g.

La position du prisme étant réglée, il est à conseiller de faire défiler, sur le couple, le domaine spectral à enregistrer, en tournant lentement la manivelle *m*₂ (Pl. 9). Ce domaine (150 Å) correspond à quinze minutes au cercle. Si les déviations observées sont trop grandes ou trop petites, il faut alors changer la largeur des fentes.

Lors de l'utilisation du réseau à 576 traits par millimètre, la position du prisme ne doit pas être modifiée au cours d'un enregistrement couvrant 150 Å.

3. *Détermination précise de la position de l'image centrale.* — Celle-ci s'effectue en utilisant le soleil comme source. Avant de tourner le cercle vers 165° , il est absolument nécessaire de mettre un filtre entre M_g et F₁ de manière à réduire considérablement l'intensité de l'image centrale sans changer l'ouverture des fentes. Habituellement, nous plaçons quelques épaisseurs de papier à 50 cm. de F₁, car, par suite de la chaleur produite par l'image solaire, il est impossible de faire usage de verre ou de papier tout contre la première fente.

En général, nous effectuons deux pointés consécutifs sur l'image centrale,

(*) Pour les premiers réglages, il n'est pas nécessaire de connaître avec grande précision la position de l'image centrale.

en faisant chaque fois trois lectures au micromètre. Dans le cas actuel, nous trouvons

$$\left. \begin{array}{l} 165^{\circ} 00' 55''; 55''; 54'' \\ 54''; 54''; 54''5 \end{array} \right\} \text{Moyenne: } 165^{\circ} 00' 54''.$$

Le début de l'enregistrement se situe donc à $191^{\circ} 10' 11''$.

4. Indiquons au cercle C_2 , $191^{\circ} 09' 40''$ (*) en utilisant la manivelle m_2 .

5. Vérifions que le compteur C_v est au « zéro ».

6. Un papier photographique étant fixé sur le cylindre C, plaçons l'index i_2 pour que l'enregistrement ne soit pas interrompu par la languette maintenant le papier. Connectons ensuite C à B_2 , par l'intermédiaire de B_1 , pour qu'un tour de c corresponde à un tiers de tour de a .

7. Tournons l'interrupteur n_3 (fig. 7) pour qu'il indique 3.

8. Relions le moteur à B_2 (Pl. 9) afin que les poulies D effectuent un tour en une seconde et demie. Plaçons la manette K_2 sur l'indication « moteur » puis mettons celui-ci en marche.

9. Observons la rotation du cercle à l'aide du microscope L_2 et arrêtons le moteur lorsque le cercle indique, à quelques secondes près, $191^{\circ} 10' 11''$.

10. Notons alors la numérotation du compteur C_v (soit 28) (on peut prendre aussi une photographie de l'indication de C_{ph}) et effectuons une lecture précise au cercle C_2 (trois lectures au micromètre). Nous trouvons $191^{\circ} 10' 13''; 14''; 13''5$.

L'enregistrement peut alors commencer, en ayant soin de prendre, en premier lieu, le « zéro » du galvanomètre G_2 .

Au cours de la prise du spectre, il est utile de noter, au moins une fois, l'indication du compteur C_v lorsque la lampe l_2 (Pl. 8) s'allume. On peut aussi prendre à ce moment une photographie de l'indication de C_{ph} sans arrêter la rotation du cylindre.

Le moteur a été arrêté lorsque C_v indiquait 628, 928, 1048. A chaque interruption, nous avons pris le « zéro » du galvanomètre et nous avons repéré l'indication du cercle.

L'arrêt et la mise en marche du moteur influencent le circuit du galvanomètre G_2 . Pour éviter l'impression, sur le papier, du mouvement du spot qui en résulte, il suffit de placer un écran devant C, pendant quelques secondes. Ceci explique les interruptions qui apparaissent sur les courbes reproduites planches 11 à 25.

En général, au cours d'une séance d'observations, nous avons pris trois

(*) Nous ne plaçons pas immédiatement le cercle à $191^{\circ} 10' 11''$ afin de pouvoir tenir compte du jeu dans les mécanismes.

enregistrements de la même région, ceux-ci étant disposés ainsi que l'indique en particulier la planche 24. Pour arriver à ce résultat, le réseau doit être remis dans sa position initiale exclusivement à l'aide du moteur. Au début de chaque enregistrement, le spot est déplacé en modifiant la direction des miroirs m' et m'' (Pl. 8 et fig. 10). Après le premier enregistrement, l'interrupteur n_3 est tourné sur l'indication O pour que la lampe l_2 ne s'allume plus.

Lorsque le soleil était suffisamment haut sur l'horizon, nous avons pris parfois des enregistrements correspondant à deux régions consécutives, couvrant chacune 150 Å. Supposons qu'après le premier enregistrement, le compteur indique 1048. Nous sommes alors passé à l'enregistrement de la deuxième région après avoir indiqué à C_v les numérotations 920 puis 948 à l'aide du moteur et après avoir changé la position du spot sur le cylindre de manière à utiliser le deuxième papier photographique.

TABLEAU II.

Mesures relatives aux enregistrements de la région 15141-15293 Å (Pl. 24)

Date : 14 mai 1943.

Image centrale début : $165^{\circ} 00' 55'' 55'' 54''$ } Moyenne : $165^{\circ} 00' 54''4$.
 $54'' 54'' 54''5$

Numérotations de C_v correspondant à la lampe l_2 : 98, 158, 308.

Enr ^t	G. M. T.	C_v	Lectures à C_2	Moyennes des valeurs mesurées	Valeurs calculées	Diff. grad. calc. et grad. obs.
Sup.	13 ^h 12 ^m	28	191° 10' 13'' 14'' 13''5	191° 10' 13''5	191° 10' 13''5	
		628	20 15 5 13 5 14	20 14 3	20 13 5	- 0,8
		928	25 14 15 14 5	25 14 5	25 13 5	- 1
Int.	13 47	1048	27 15 16 15	27 15 3	27 13 5	- 1,8
		28	191° 10 14 13 5 14	191° 10 13 8	191° 10 13 8	
		328	15 13 12 5 13	15 12 8	15 13 8	+ 1
Inf.	15 35	828	23 32 32 32	23 32	23 33 8	+ 1,8
		1048	27 14 15 14	27 14 3	27 13 8	- 0,5
		28	191° 10 15 15 13 5	191° 10 14 5	191° 10 14 5	
Inf.	17 30	1048	27 14 15 14 5	27 14 5	27 14 5	0

Image centrale fin : $165^{\circ} 00' 53''5 53''5 53''5$ } Moyenne : $165^{\circ} 00' 52''9$.
 $53'' 52''5 52''5$

Pour permettre le calcul des hauteurs du soleil, l'heure est notée au début et à la fin de chaque enregistrement.

Après chaque séance d'observation, nous avons effectué une nouvelle détermination de l'image centrale.

Les enregistrements qui se rapportent à la région 15141-15293 Å sont reproduits planche 24. Les courbes ont été obtenues dans l'ordre suivant : supérieure,

intermédiaire, inférieure. Dans chaque cas, le début se trouve du côté des courtes longueurs d'onde. Les petits traits parallèles aux lignes-repères donnent les positions du spot galvanométrique lorsqu'un écran opaque est placé devant F_2 . Pour les mettre en évidence, nous les avons encadrés par deux autres traits. Ceux-ci permettent de tracer facilement les « lignes-zéro » se rapportant aux trois enregistrements.

Les mesures relatives aux courbes de la planche 24 sont données dans le tableau II. Les valeurs de la dernière colonne sont calculées en supposant qu'un changement d'une unité à C_1 correspond à une variation d'une seconde d'arc à C_2 .

Comme les poulies D effectuent un tour en une seconde et demie, il faut vingt-cinq minutes pour que la numérotation du compteur change de mille unités. En tenant compte des interruptions, un enregistrement dure à peu près trente-cinq minutes. D'autre part, il faut environ trente minutes pour effectuer les différentes opérations qui précèdent la prise du premier enregistrement.

§ 10. Mesure d'un spectrogramme

Dans l'exemple suivant, nous utiliserons les mesures données dans le tableau II.

1. *Détermination de $\Theta_{\text{début}}$.* — L'image centrale correspondant à $165^\circ 00' 54''$ (*) et la graduation $191^\circ 10' 14''$ (**) se rapportant au début de l'enregistrement, nous en tirons

$$\Theta = 26^\circ 09' 20''.$$

2. *Numérotation des lignes-repères.* — L'intervalle entre chaque ligne marquée par la lampe l_2 (Pl. 8) mesure 10 mm. sur l'enregistrement original. Il correspond, d'autre part, à 30 numéros du compteur.

La distance qui sépare le début de l'enregistrement de la première ligne est de 3,3 mm. En supposant qu'au début le compteur marque « zéro », celui-ci indiquera donc 10 pour la première ligne-repère. Ce nombre sert de base pour la numérotation des autres lignes.

Comme nous avons tenu compte du jeu dans les mécanismes, le même résultat doit être obtenu en se basant sur la numérotation 98 lue à C_1 . On en tire, en effet, $(98-28)-(2 \times 30) = 10$.

3. *Correspondance cercle-compteur.* — Comme les différences données dans la dernière colonne du tableau II sont de l'ordre de grandeur des erreurs accidentelles, nous pouvons admettre qu'une variation d'une unité au compteur correspond à une rotation du cercle d'une seconde d'arc sur toute la longueur de l'enregistrement.

(*) Dans la pratique courante, les valeurs moyennes sont arrondies à la seconde d'arc.

(**) Moyenne des valeurs correspondant à la numérotation 28.

4. *Détermination des Θ correspondant aux raies du spectre.* — En utilisant la numérotation marquée pour les lignes-repères, il est aisé de déterminer la distance, en secondes d'arc, qui sépare une raie déterminée du début de l'enregistrement. Il suffit d'interpoler entre deux lignes-repères successives. Le nombre trouvé, additionné à Θ_0 , donne le Θ correspondant à la raie mesurée.

5. *Détermination des longueurs d'onde.* — Ainsi que nous l'avons vu au chapitre III, § 7, lorsque les Θ sont connus, les longueurs d'onde s'en déduisent en utilisant la formule

$$\lambda = K \sin \Theta.$$

Nous trouvons en particulier $\lambda_{\text{début}} = 15141,2 \text{ \AA}$ et $\lambda_{\text{fin}} = 15293,4 \text{ \AA}$ en introduisant une correction de $-0,2 \text{ \AA}$ pour tenir compte de l'excentricité du cercle. Les enregistrements reproduits planche 24 s'étendent donc sur 152 \AA . Dans un tel domaine, il y a proportionnalité entre les nombres d'onde et la distance entre les raies. Au lieu de numérotter les différentes lignes-repères, on peut donc indiquer directement les nombres d'onde qui s'y rapportent. L'intervalle entre chaque ligne correspond à $1,95 \text{ cm}^{-1}$. En interpolant entre deux lignes successives, on obtient alors les nombres d'onde des raies du spectre. Cette méthode a été habituellement utilisée pour vérifier nos déterminations de longueurs d'onde.

§ 11. Utilisation du spectrographe dans la région 6μ

Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre III, § 2, *d*, outre le réseau à 576 traits par millimètre, notre laboratoire possède un réseau à 94,4 traits par millimètre. Celui-ci permet d'étudier la région spectrale de 5 à 10μ dans le premier ordre.

Pour juger de l'efficacité de l'installation dans ce domaine, nous avons enregistré le spectre de la vapeur d'eau de 58600 à 64420 \AA . Nos premiers enregistrements donnent autant de détails que celui de BARKER et MARTIN (cf. fig. 6, *a*). Toutefois, la réquisition de notre laboratoire ne nous a pas permis d'obtenir des résultats définitifs dans cette région. Nous effectuerons de nouvelles expériences à ce sujet aussitôt que les circonstances le permettront.

§ 12. Les erreurs accidentelles de mesure

Les erreurs sur les longueurs d'onde proviennent d'erreurs sur K et sur Θ .

La différentiation de la relation $\lambda = K \sin \Theta$ donne

$$\Delta \lambda = \sin \Theta \times \Delta K + K \cos \Theta \times \Delta \Theta. \quad (8)$$

La « constante » K est habituellement obtenue en utilisant la formule

$$K = \frac{\lambda}{\sin \Theta}.$$

En différentiant, on obtient

$$\Delta K = \frac{\Delta \lambda}{\sin \Theta} + \frac{\lambda \cos \Theta}{\sin^2 \Theta} \Delta \Theta. \quad (9)$$

A titre d'exemple, reprenons les mesures effectuées sur les raies de HgI. Nous avons trouvé (*) que pour

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 10139,75 \text{ \AA}, & \Theta_1 = 17^\circ 10' 11'' \\ \lambda_2 = 13570,60 \text{ \AA}, & \Theta_2 = 23^\circ 16' 17'' \\ \lambda_3 = 15295,25 \text{ \AA}, & \Theta_3 = 26^\circ 26' 33''. \end{array}$$

L'erreur quadratique moyenne sur la détermination des Θ est de l'ordre de $\pm 1''$.

En partant de $\lambda_1 = 10139,75 \text{ \AA}$, on trouve $K = 34348,32 \text{ \AA}$ et l'application de la formule (9) donne $\Delta K = 1,23 \text{ \AA}$ sachant que la longueur d'onde λ_1 est donnée à $\pm 0,2 \text{ \AA}$ près.

La formule (8) permet ensuite d'obtenir $\Delta \lambda_2 = 0,64 \text{ \AA}$ et $\Delta \lambda_3 = 0,70 \text{ \AA}$.

Lors des mesures effectuées sur un enregistrement, le Θ d'une raie déterminée résulte de la détermination de deux angles. Au $\Theta_{\text{début}}$, il faut ajouter la mesure de la distance, exprimée en secondes d'arc, entre le début de l'enregistrement et la raie à mesurer. Par suite de l'utilisation des lignes-repères, les déformations éventuelles du papier photographique n'introduisent pas d'erreurs appréciables. Pour les raies bien nettes, l'interpolation entre deux lignes voisines s'effectue avec une précision de $\pm 0,1 \text{ mm.}$, ce qui correspond à $0,3$ seconde d'arc. La mesure de la distance entre le début de l'enregistrement et la première ligne-repère peut se déterminer avec une erreur du même ordre de grandeur. Il en résulte donc une erreur supplémentaire sur Θ de l'ordre de

$$\sqrt{0,3^2 + 0,3^2} = 0,4''.$$

Dans ce cas, l'erreur totale sur Θ est égale à

$$\sqrt{1^2 + 0,4^2} = 1,08''.$$

L'erreur quadratique moyenne sur la détermination des longueurs d'onde, entre $1,35 \mu$ et $1,52 \mu$, reste donc de l'ordre de $0,7 \text{ \AA}$. Notons que, sans tenir compte de l'erreur de $\pm 0,2 \text{ \AA}$ sur la longueur d'onde de base, nous trouvons $\pm 0,4 \text{ \AA}$ comme ordre de grandeur des erreurs de mesures.

Par suite des influences électro-magnétiques, certaines raies sont parfois légèrement déformées, ce qui peut occasionner des erreurs de mesures de deux ou trois secondes d'arc. Cette constatation a notamment été faite sur les enregistrements du spectre de la vapeur d'eau, obtenus en utilisant une installation particulièrement sensible. Pour déceler ces perturbations et améliorer la précision des mesures, nous avons enregistré plusieurs fois la même région spectrale.

(*) Il n'y a pas lieu de tenir compte de l'erreur d'excentricité, son influence étant trop faible pour changer les valeurs calculées pour ΔK et $\Delta \lambda$.

Dans la région 6μ , en utilisant $\lambda = 61841 \text{ \AA}$ (raie 152 de PLYLER et SLEATOR, cf. fig. 6 b), nous obtenons $\Theta = 17^\circ 10' 33''$, d'où $K = 209414 \text{ \AA}$. Par suite des mesures effectuées sur les enregistrements, les erreurs commises sur les déterminations des angles de diffraction sont de l'ordre de $\pm 3''$. D'autre part, d'après PLYLER et SLEATOR, l'erreur sur 61841 \AA s'élève à $\pm 3 \text{ \AA}$. L'application de la formule (9) donne $\Delta K = 11,1 \text{ \AA}$. Pour $\lambda = 58813 \text{ \AA}$, par exemple (raie 117 de la fig. 6 b), $\Theta = 16^\circ 18' 35''$ et $\Delta \lambda = \pm 6 \text{ \AA}$. Dans cette région spectrale, 6 \AA équivalent à $0,17 \text{ cm}^{-1}$.

Soulignons que les erreurs quadratiques moyennes que nous avons mentionnées ne sont que des ordres de grandeur et qu'elles ne sont applicables qu'aux raies bien nettes.

§ 13. Pouvoir de résolution et largeur de fente effective

La figure 19 reproduit en vraie grandeur une partie des enregistrements du spectre solaire obtenus le 17 juillet 1943 en utilisant le réseau à 576 traits par millimètre dans le premier ordre le plus intense. Ceux-ci permettent de constater que les raies $\lambda 15185,6 \text{ \AA}$ et $\lambda 15187,6 \text{ \AA}$, distantes de 2 \AA ($0,9 \text{ cm}^{-1}$), peuvent encore être séparées. Le pouvoir de résolution s'élève donc à environ 7600 (*). Notons que le réseau employé a des dimensions relativement petites ($75 \times 50 \text{ mm.}$) et n'est pas à échelottes. Le pouvoir de résolution pratique sera sans doute considérablement augmenté en utilisant le réseau commandé au Prof. WOOD. Ainsi que nous l'avons signalé, ce réseau sera à échelottes, spécialement gravé pour $1,5 \mu$ et mesurera $150 \times 50 \text{ mm.}$

En employant le réseau à 94,4 traits par millimètre dans le premier ordre, nous avons constaté que, dans la région 6μ , les raies doivent être distantes d'environ 50 \AA pour être séparables. Dans ce cas, le pouvoir de résolution est de l'ordre de 1200, mais cette valeur doit être considérée comme provisoire (**). Notons que, à 6μ , 50 \AA équivalent à $1,3 \text{ cm}^{-1}$.

Le réseau à 94,4 traits par millimètre est prévu pour le domaine compris entre 5 et 10μ . En utilisant les autres réseaux, nous espérons aussi séparer, entre 3 et 5μ ainsi qu'entre 10 et 25μ , des raies spectrales distantes d'environ 1 cm^{-1} .

Une idée de l'efficacité d'un spectrographe peut encore être donnée par le calcul de la « largeur de fente effective », c'est-à-dire par la détermination du nombre d'angströms ou de cm^{-1} , compris dans la fente de sortie. En d'autres termes, la largeur « effective » est égale à l'intervalle spectral qui sépare les faisceaux se concentrant sur les lèvres de F_3 .

Dans le cas de la figure 19, nous avons utilisé une largeur de $0,1 \text{ mm.}$ pour F_3 . D'autre part, la distance focale du deuxième miroir parabolique M_7 mesure 1 m. La différence de direction entre les faisceaux tombant sur M_7 et se

(*) Par suite de la diminution d'intensité observée dans les spectres des 2^{es} et 3^{es} ordres, le pouvoir de résolution pratique reste du même ordre de grandeur.

(**) Cf. p. 57.

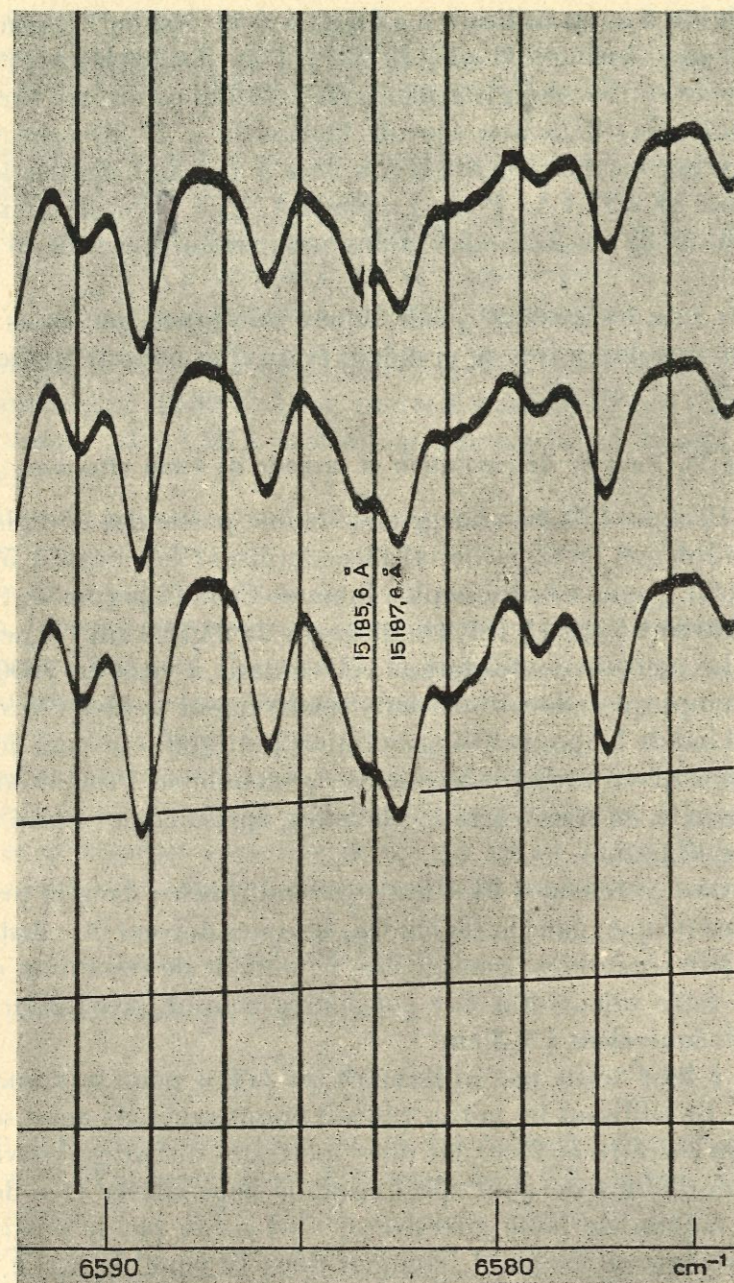


FIG. 19. — Spectre du soleil (17 juillet 1943). Fentes : 0,1 mm.

concentrant sur chacun des bords de F_3 est donc égale à 0,0001 radiant. Ceci correspond à une variation de Θ de 0,00005 radiant. La largeur effective est alors facilement obtenue en introduisant cette variation de Θ dans la formule $d\lambda = K \cos \Theta d\Theta$. En utilisant le réseau à 576 traits par millimètre, on trouve $d\lambda = 1,4 \text{ \AA}$ ($0,62 \text{ cm}^{-1}$), l'angle Θ correspondant à 15.000 \AA .

§ 14. Choix du couplage entre le cylindre enregistreur et la deuxième boîte de vitesse

Le rapport des vitesses entre les axes a et c , ainsi qu'entre les axes b et c , doit être choisi suivant le réseau utilisé et la complexité du spectre à étudier.

Lorsque ce spectre est très compliqué, il faut employer une démultiplication faisant correspondre une longueur de papier photographique d'environ 5 cm. à un intervalle de 10 cm^{-1} dans le spectre formé sur F_3 . Sur les enregistrements reproduits planches 11 à 24, par exemple, 10 cm^{-1} s'étendent en moyenne sur 4,5 cm.

Si des raies larges et peu nombreuses doivent être enregistrées, 10 cm^{-1} peuvent alors correspondre à une plus petite longueur de papier sans nuire à la précision des mesures.

Notons aussi que plusieurs rapports de vitesses ont été prévus entre la rotation du réseau et celle du cylindre, par suite de l'utilisation de réseaux ayant des dispersions très différentes.

Le tableau III, à double entrée, permet de choisir la démultiplication qui convient dans les différents cas. D'une part, nous avons indiqué les rapports de vitesses $\frac{a}{c}$ ou $\frac{b}{c}$; d'autre part, dans la première colonne, nous avons mentionné différentes régions spectrales. Dans les autres colonnes, nous donnons les longueurs de papier photographique, exprimées en centimètres, qui correspondent à un intervalle de 10 cm^{-1} dans le spectre du premier ordre formé sur la fente F_3 .

Considérons, par exemple, l'emploi du réseau à 576 traits par millimètre de 13500 à 13600 Å, c'est-à-dire de $7407,4$ à $7352,9 \text{ cm}^{-1}$ (différence des nombres d'onde, $54,5 \text{ cm}^{-1}$).

En utilisant $K = 34349$, on obtient, dans le premier ordre :

$$\Theta_{13500} = 23^\circ 08' 30'' \quad \text{et} \quad \Theta_{13600} = 23^\circ 19' 28'' \quad (\text{différence des } \Theta : 10' 58'').$$

Ces calculs permettent de déduire que, dans ce domaine, un intervalle de 10 cm^{-1} défile sur F_3 lorsque le réseau tourne de $120''7$. Or, la construction mécanique assure les correspondances suivantes :

$$684'' \text{ au cercle } C_2 \rightarrow 1 \text{ tour de } A \rightarrow 1/5 \text{ de tour de } a \rightarrow \frac{37,7}{5} \text{ cm.}$$

de papier photographique lorsque c tourne à la même vitesse que a , d'où

$$1'' \text{ au cercle } C_2 \rightarrow 0,11 \text{ mm. de papier photographique.}$$

Dans le cas du couplage direct, 10 cm^{-1} correspondent donc à une longueur de papier de 1,33 cm.

Pour des rapports de vitesses $\frac{a}{c}$ égaux à 3, 2, $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$, 10 cm^{-1} s'étendent respectivement sur 0,44 cm.; 0,66 cm.; 2,66 cm. et 4 cm.

Les autres résultats reproduits dans le tableau III ont été obtenus en effec-

TABLEAU III

1. Couplage à l'axe a

λ \begin{matrix} a \\ c \end{matrix}	3	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
<i>Réseau à 576 tr./mm.</i> (14 630 tr./pouce)					
13500 Å — 13600 Å	0,44 cm	0,66 cm	1,33 cm	2,66 cm	4 cm
15000 — 15100	0,58	0,84	1,68	3,36	5
20000 — 20100	1	1,5	3	6	9
25000 — 25100	2,01	3,02	6,05	12,10	—
30000 — 30100	4,14	6,21	12,42	—	—
<i>Réseau à 141,7 tr./mm.</i> (3.600 tr./pouce)					
3μ — 3,1μ	0,51 cm	0,77 cm	1,55 cm	3,10 cm	4,65 cm
4 — 4,1	0,92	1,39	2,78	5,56	8,34
5 — 5,1	1,45	2,17	4,35	8,70	13,05
<i>Réseau à 94,4 tr./mm.</i> (2.400 tr./pouce)					
5μ — 5,1μ	0,93 cm	1,39 cm	2,79 cm	5,58 cm	8,37 cm
7 — 7,1	1,91	2,87	5,75	11,50	17,25
10 — 10,1	4,11	6,17	12,35	—	—
<i>Réseau à 47,2 tr./mm.</i> (1200 tr./pouce)					
10μ — 10,1μ	1,86 cm	2,76 cm	5,58 cm	11,16 cm	16,74 cm
12 — 12,5	2,52	4,29	8,58	17,16	—
15 — 15,5	4,61	6,92	13,85	—	—
17 — 17,5	5,95	8,93	17,87	—	—
20 — 20,5	8,59	12,89	25,78	—	—
<i>Réseau à 31,5 tr./mm.</i> (800 tr./pouce)					
20μ — 20,5μ	5,30 cm	7,94 cm	15,89 cm	—	—
25 — 25,5	8,22	12,33	24,66	—	—

2. Couplage à l'axe b

λ \begin{matrix} b \\ c \end{matrix}	3	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
<i>Réseau à 576 tr./mm.</i> (14630 tr./pouce)					
13500 Å — 13600 Å	4,43 cm	6,65 cm	13,30 cm	—	—
15000 — 15100	5,61	8,42	16,85	—	—
<i>Réseau à 141,7 tr./mm.</i> (3.600 tr./pouce)					
3μ — 3,1μ	5,19 cm	7,79 cm	15,58 cm	—	—

tuant des calculs analogues aux précédents. Pour le réseau à 94,4 traits par millimètre, nous avons utilisé $K=209414$. Nous sommes parti de cette valeur pour déterminer les constantes de l'instrument se rapportant aux autres réseaux.

Nous n'avons pas indiqué le nombre de centimètres dans les cinquième et sixième colonnes du tableau III lorsqu'il est pratiquement trop grand.

§ 15. Avantages du nouveau spectrographe

A notre connaissance, l'installation décrite dans ce mémoire constitue la première construction permettant d'enregistrer automatiquement le spectre de 1 à 25 μ, en utilisant cinq réseaux ayant des dispersions très différentes.

Les avantages du nouveau spectrographe peuvent se résumer comme suit :

- a) Utilisation de l'enregistrement automatique de 1 à 25 μ;
- b) Grande stabilité de construction;
- c) Facilités de manipulation.

Nous allons développer successivement ces différents points.

a) Les avantages de l'enregistrement automatique ayant été énumérés au chapitre I, § 4, nous nous bornerons à attirer l'attention sur la différence de rapidité existant entre la méthode par enregistrement continu et le procédé « point par point ». En appliquant ce dernier, pour obtenir un diagramme aussi détaillé qu'un des spectrogrammes reproduits planche 24, par exemple, le réseau doit être tourné au maximum de cinq en cinq secondes d'arc. En supposant une très bonne stabilité du spot, admettons qu'une lecture sur la règle graduée soit suffisante pour chaque position du réseau. Admettons aussi que la détermination de la position « zéro » du spot galvanométrique soit seulement effectuée chaque fois que le réseau aura tourné d'une minute d'arc par exemple. Comme l'enregistrement s'étend sur 17', il faudra placer le réseau dans 204 positions différentes et effectuer 220 lectures, au minimum, sur une règle graduée. Ceci nécessite au moins quatre heures d'un travail fastidieux et continu. Il faudra ensuite tracer un diagramme en portant en abscisses les indications du cercle et en ordonnées les déviations correspondantes du spot lumineux. Grâce à l'enregistrement automatique, de meilleurs résultats sont obtenus en une demi-heure, sans intervention de l'expérimentateur lors de la prise de l'enregistrement. Nous signalons de « meilleurs résultats », car dans le procédé « point par point », le réseau ne peut être tourné exactement de cinq en cinq secondes, ce qui occasionne une déformation du profil des raies. Pratiquement des diagrammes définitifs ne sont obtenus qu'après avoir parcouru plusieurs fois la même région spectrale.

Le cas de l'enregistrement pris dans la région 6 μ est aussi intéressant à considérer. Pour obtenir le diagramme reproduit figure 6, b, PLYLER et SLEATOR ont déplacé le réseau de quinze en quinze secondes d'arc. Pour chacune de ces positions, ces auteurs ont effectué, par suite de l'instabilité du spot, quatre, six et même huit déterminations indépendantes des déviations galvanométriques. En

supposant de meilleures conditions de travail, admettons que deux déterminations seulement du déplacement du spot soient nécessaires. Il n'en résulte pas moins, que pour couvrir la région s'étendant de 58600 à 64420 Å, il faudra placer le réseau dans 400 positions différentes et effectuer 1.600 lectures sur une règle graduée. Pratiquement ces opérations nécessitent plusieurs jours. Dans notre cas, le même travail s'effectue automatiquement en deux heures et nous espérons encore améliorer ce résultat.

b) Nous avons veillé tout spécialement à la stabilité de la construction. A l'exception du réseau et du prisme, les pièces optiques sont fixées solidement à P₁ (Pl. 9), plate-forme particulièrement stable. De plus, la plupart des réglages s'effectuent par vis antagonistes. Grâce aux précautions prises, nous n'avons remarqué aucune modification dans la mise au point de l'instrument, au cours des dix-huit mois pendant lesquels il a été utilisé.

c) La technique de la spectroscopie infra-rouge à grande dispersion étant assez compliquée, nous nous sommes efforcé de prévoir une construction mécanique facilitant autant que possible les différentes opérations à effectuer pour obtenir un enregistrement.

Sans changer de place, l'expérimentateur peut commander tous les mouvements nécessités par la prise d'un spectre.

Les prismes et le miroir qui sert à les court-circuiter peuvent être interchangeés facilement, sans modifier le réglage du monochromateur.

Les tubes d'absorption peuvent être retirés puis replacés dans leur position initiale, sans nouveau réglage.

Enfin, l'installation peut être utilisée, en lumière convergente, en lumière parallèle ou pour l'étude du spectre solaire, en effectuant, dans les différents cas, un minimum de réglages.

Outre les avantages qui viennent d'être signalés, rappelons que la construction mécanique a été prévue pour que la plate-forme P₁ puisse être placée à l'intérieur d'une cuve étanche. L'utilisation de celle-ci permettra d'éviter, autant que possible, les inconvénients dus aux nombreuses bandes d'absorption provenant de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique contenus dans l'atmosphère du laboratoire.

Grâce aux améliorations apportées, l'utilisation de notre installation n'est pas beaucoup plus compliquée que celle d'un spectrographe à petite dispersion. Par suite de son grand pouvoir séparateur, on peut espérer que son emploi sera particulièrement fructueux pour la résolution de nombreux problèmes.

§ 16. Quelques applications

La nouvelle installation a été conçue non seulement pour effectuer des recherches en astrophysique, mais aussi en vue de résoudre des problèmes de physique et de physico-chimie.

SPECTRES ATOMIQUES. — L'observation des spectres atomiques dans l'infra-rouge est nécessaire pour situer de nombreux niveaux énergétiques. Elle donne aussi la possibilité de vérifier les schémas de niveaux établis à partir d'études dans le visible et dans l'ultra-violet.

Une partie des spectres de trente et un éléments seulement sont connus dans l'infra-rouge au delà de 1,35 μ, avec une précision suffisante pour permettre la classification des raies observées. De nouvelles études doivent être entreprises dans ce domaine non seulement pour faire progresser nos connaissances sur les structures atomiques, mais aussi en vue de l'interprétation du spectre infra-rouge du soleil. Notre spectrographe est particulièrement bien adapté à ce genre de recherches à cause de son grand pouvoir séparateur et de l'utilisation de l'enregistrement automatique.

SPECTRES MOLÉCULAIRES. — Alors que la stéréo-chimie, les rayons X et la diffraction électronique considèrent les molécules à l'état statique, l'étude des spectres infra-rouges conduit à envisager leur état dynamique. L'interprétation de ces spectres permet non seulement la discussion des modèles moléculaires de base et la détermination de leurs dimensions, mais elle procure aussi des renseignements sur le mécanisme des vibrations et des rotations internes ainsi que sur les grandeurs des forces qui entrent en jeu. Concernant ces différents sujets, la méthode infra-rouge complète ou confirme les données fournies par l'effet Raman.

Etat gazeux. — Les recherches entreprises sur les spectres d'absorption des gaz dans le domaine de 1 à 25 μ ont été particulièrement fructueuses pour étudier les structures moléculaires de nombreuses bandes de vibration situées dans cette région spectrale. Les renseignements les plus précis concernant ces structures sont tirés des études effectuées à l'aide de spectrographes à grand pouvoir de résolution. Seul l'emploi de ces appareils permet de déceler la structure de rotation des bandes de vibration avec suffisamment de détails pour qu'une interprétation théorique puisse être envisagée.

Quoique de nombreuses bandes d'absorption aient déjà été résolues, l'étude, à grande dispersion, des spectres d'absorption des gaz reste un important sujet de recherche pour l'avenir. Signalons, en particulier, l'intérêt d'études systématiques sur les molécules isotopiques. Durant ces dernières années, la découverte du deutérium a permis de compléter nos connaissances concernant de nombreuses molécules. Espérons que, dans un avenir rapproché, les isotopes des autres éléments, en particulier du carbone, de l'oxygène et du chlore pourront être aussi utilisés dans le même but.

Etat solide. — Les cristaux produisent aussi des bandes d'absorption dans tout le domaine infra-rouge. Celles qui sont situées dans l'infra-rouge lointain sont dues à la vibration des réseaux cristallins partiels, les uns par rapport aux autres (vibrations intermoléculaires) tandis que les bandes généralement obser-

vées entre 1 et 25μ proviennent de vibrations intramoléculaires (par exemple, fréquences propres de CO_2 , NO_2 , SiO_2 , NH_3 , etc.).

Comme la position des bandes reflète la structure moléculaire, la méthode infra-rouge permet d'étudier les modifications qui surviennent à l'intérieur d'un cristal lorsque celui-ci est soumis à l'action d'agents physiques variables. Les recherches à ce sujet sont particulièrement intéressantes aux environs des « points d'inversion » (cas des sels ammoniacaux et de HCl solide, par exemple) (*).

En ce qui concerne l'étude des spectres infra-rouges des solides, mentionnons aussi la fructueuse « méthode des poudres ». Ainsi que le signale J. LECOMTE (63), cette méthode permet d'obtenir facilement d'excellents spectres d'absorption infra-rouges pour de nombreuses substances, solides dans les conditions ordinaires, qui ne peuvent être étudiées au moyen des techniques habituelles (lame cristalline, dissolution ou fusion). Elle présente, entre autres avantages, ceux de ne demander qu'une très faible quantité de substance et de permettre l'examen des corps dans l'état exact où ils se trouvent.

Jusqu'à présent, les spectres infra-rouges des solides ont surtout été étudiés à petite dispersion. L'utilisation d'un spectrographe à grand pouvoir de résolution pourrait apporter d'importantes contributions dans ce domaine.

Etat liquide. — Au point de vue physique, l'étude des liquides est beaucoup moins avancée que celle des gaz et même des solides, par suite de la complexité des interactions moléculaires.

Pour faire progresser les recherches sur la structure des liquides, il est spécialement intéressant d'étudier les modifications observées dans les spectres d'absorption de certains composés pris à l'état gazeux et à l'état liquide. Ces spectres diffèrent par la position et par le nombre de bandes. Dans plusieurs cas, la grande dispersion est nécessaire pour déterminer les variations de position avec la précision désirable.

Il serait aussi intéressant d'étudier à grande dispersion la structure de rotation des bandes de vibration des liquides dilués dans un solvant neutre.

Pour les analyses chimiques, des spectrographes infra-rouges à petite dispersion ont été généralement utilisés jusqu'à présent. Ils permettent déjà de résoudre de nombreux problèmes. Cependant, dès 1919, lors d'un congrès de la Faraday Society, J. LECOMTE réclamait l'emploi d'une grande dispersion pour certaines analyses : même en opérant sur des fractions de distillation très serrées, il arrive qu'une même fraction contienne un assez grand nombre de composés, d'où l'obtention d'un spectre très compliqué, impossible à résoudre à l'aide de spectrographes à prismes.

Au point de vue des applications astrophysiques, le champ principal de recherches consiste actuellement dans l'étude à grande dispersion du spectre solaire. Le sujet est développé dans la deuxième partie de ce mémoire.

(*) Pour les références, cf. F. MATOSSI (62).

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE DU SPECTRE DU SOLEIL ET DU SPECTRE D'ABSORPTION DE LA VAPEUR D'EAU DANS LA RÉGION COMPRISE ENTRE 13440 ET 15293 Å

CHAPITRE I

IMPORTANCE DE L'ÉTUDE DU SPECTRE INFRA-ROUGE SOLAIRE ET PRINCIPALES RECHERCHES EFFECTUÉES A CE SUJET

L'étude du spectre infra-rouge du soleil présente un grand intérêt tant en astrophysique qu'en physique atomique et moléculaire.

En astrophysique, elle permet de compléter nos connaissances sur la constitution chimique du soleil. La région de grandes longueurs d'onde est aussi spécialement intéressante pour l'étude des effets DOPPLER, ZEEMAN, EINSTEIN ainsi que pour l'étude des effets de pression.

Par suite des conditions physiques régnant dans l'atmosphère solaire, on peut déceler dans la région infra-rouge de son spectre, tout comme dans le visible et l'ultra-violet, de nombreuses raies, qui peuvent difficilement être observées en laboratoire, ce qui constitue une source importante d'informations pour l'établissement des schémas de niveaux atomiques.

De plus, la partie infra-rouge du spectre solaire contient la plupart des bandes de vibration des molécules de l'atmosphère terrestre (en particulier H_2O , CO_2 , O_3 , NO_2). L'épaisseur de cette atmosphère et les conditions physiques qui y règnent permettent d'obtenir des détails sur la structure fine de ces bandes, détails que ne peuvent fournir les recherches en laboratoire. La connaissance de cette structure est importante non seulement au point de vue physico-chimique, mais aussi pour l'étude de l'absorption par l'atmosphère terrestre.

Jusqu'à présent, de nombreux travaux ont déjà été publiés sur le spectre infra-rouge du soleil. Nous allons donner un bref aperçu des progrès réalisés à ce sujet.

§ 1. Domaine photographique

($\lambda < 1,35 \mu$, limite actuelle de sensibilité des émulsions photographiques.)

Dès 1880, W. DE W. ABNEY (1) parvient à préparer des émulsions spéciales qui lui permettent de déceler environ 200 raies de FRAUNHOFER entre 7600 et 9825 Å, en utilisant un spectrographe à réseau. A cette époque, le spectre solaire fut même photographié jusqu'à 12000 Å environ, à l'aide d'un appareil à prisme, mais la dispersion était trop petite pour révéler les détails du spectre.

En 1855, de meilleures photographies donnent la possibilité au même observateur (2) de mesurer 590 raies entre 7146 et 9867 Å. Toutefois, les longueurs d'onde mentionnées par ABNEY ne sont pas suffisamment précises pour permettre des identifications atomiques. Des résultats intéressants à ce sujet seront seulement obtenus en 1918. Au cours de cette année, W. F. MEGGERS (3) publie les clichés pris à grande dispersion entre 6800 et 9500 Å. En 1919, le même auteur (4) fait connaître la position de 2402 raies situées entre 6500 et 9000 Å. Dans ce travail, les raies telluriques sont séparées des raies solaires en utilisant l'effet DOPPLER et la précision des mesures permet d'attribuer environ 400 raies à dix-huit éléments chimiques.

En 1920, BURNS (5) atteint environ 9900 Å. Son étude est reprise, en 1921, par F. S. BRACKETT (6), qui parvient à trouver, entre 9000 et 9850 Å, 14 raies dues au fer et une ou deux raies dues au nickel.

En 1927, H. D. BABCOCK (7) donne une liste de 507 raies standards situées entre 6868 et 8980 Å, ces raies étant mesurées par interférométrie.

Il faut attendre 1928, pour que la limite $\lambda 9867$ Å atteinte par ABNEY soit dépassée dans les études à grande dispersion. Au cours de cette année, H. D. BABCOCK (8) mesure des raies jusqu'à 10220 Å, en utilisant un spectrographe à réseau, et jusqu'à 10750 Å, en employant un spectrographe à prisme. Ses observations lui permettent en particulier de repérer une raie de l'hydrogène à $\lambda 10049,4$ Å (quatrième raie de la série de PASCHEN).

Peu après, H. D. BABCOCK et W. P. HOGE (9) portent la limite, à petite dispersion, jusqu'à 11760 Å. Avec un réseau concave donnant une dispersion de 4,75 Å par millimètre, 52 raies sont alors mesurées entre 9867 et 10925 Å.

C'est aussi en 1928 qu'une extension du spectre solaire de 7333 à 10218 Å est publiée comme addendum à la table révisée de ROWLAND (10).

En 1929, H. D. BABCOCK (11) réussit à photographier, à grande dispersion (4,6 Å par millimètre), la région s'étendant de 8600 à 11630 Å.

En 1932, H. W. BABCOCK (12) repère, dans des spectres de la chromosphère entre 8503 et 9544 Å, neuf raies de l'hydrogène faisant partie de la série de PASCHEN (de la 5^e à la 13^e raie). D'après H. H. et H. W. BABCOCK (13), les troisième et quatrième raies de la même série, $\lambda 10938,13$ Å et $\lambda 10049,37$ Å, présentent l'aspect de raies larges et diffuses sur des spectres du disque pris en 1934.

Plusieurs autres travaux importants sont aussi publiés en 1934.

Au cours de cette année, H. N. RUSSELL, H. D. BABCOCK et C. E. MOORE (14) trouvent dans le spectre solaire les séries de singulets et de triplets $3D-nF^{\circ}$ de MgI, ce qui leur permet d'identifier dix-sept raies entre 6894 et 12083,7 Å, alors que plusieurs de celles-ci n'avaient pas été observées en laboratoire (*).

H. D. BABCOCK, C. E. MOORE et C. C. KIESS (15) signalent la présence du phosphore par des raies situées entre 9175 et 10205 Å.

C. E. MOORE et H. D. BABCOCK (16) attribuent au soufre les raies $\lambda\lambda 10455,47$ ($4^3S^{\circ}-4^3P$), 10456,79, 10459,46, 11453, 11464, 11472 Å, grâce aux raies antérieurement connues $\lambda\lambda 9212$, 9228 et 9237 Å.

En décembre 1934, les mêmes auteurs (17) annoncent que 5.000 raies ont été mesurées entre 7330 et 13000 Å. Outre les indentifications citées précédemment, ils mentionnent la présence de nouvelles raies de C, N, O, Fe et d'une trentaine de raies de Si. Dès cette époque, la précision des mesures effectuées sur le spectre infra-rouge solaire dépasse de loin celle des données fournies par les études en laboratoire.

La même année, HERZBERG (18) publie une étude sur la bande atmosphérique de O₂ située à 1,27 μ .

De 1934 date aussi un ouvrage de W. BAUMANN et R. MECKE (19) fournissant les longueurs d'onde du spectre solaire de 7000 à 10000 Å. Ces auteurs entreprirent de nouvelles observations dans ce domaine en vue d'étudier la structure de rotation de certaines bandes de vibration de O₂ et de H₂O, gaz contenus dans l'atmosphère terrestre. Leurs résultats furent critiqués, à plusieurs points de vue, par H. D. BABCOCK (20).

Continuant ses observations sur le spectre de la chromosphère, H. W. BABCOCK (21) étudie, en 1935, le domaine compris entre 8000 et 11937 Å. Au delà de 9000 Å, le triplet de He à $\lambda 10830$ Å est caractéristique. De plus, les raies $\lambda 10938$ Å et $\lambda 10049$ Å de l'hydrogène apparaissent pour la première fois dans le spectre chromosphérique. La même publication signale que le spectre du disque a été mesuré jusqu'à 13530 Å, la dispersion étant de 17 Å par millimètre. Cette limite a été atteinte en utilisant des plaques Eastman 1Z, sensibilisées à l'ammoniaque et exposées pendant onze heures. Outre de nombreuses raies intenses dues à la vapeur d'eau, les clichés mettent en évidence $\lambda 12818$ Å, deuxième raie de la série de PASCHEN pour l'hydrogène (22).

En 1936, H. D. BABCOCK, C. E. MOORE et W. P. HOGE (23) publient une table de raies standards complétant celle parue en 1927 (7). La nouvelle liste donne la position de 249 raies comprises entre 7050 et 12103 Å. Même pour $\lambda > 10000$ Å, la précision est d'environ $1/10^6$.

En 1937, les nouvelles mesures de BABCOCK permirent à C. E. MOORE (24) de repérer, dans le spectre solaire, deux raies de Li ($\lambda 6707,76$ Å et $\lambda 6707,98$ Å) et une raie de Rb ($\lambda 7800,29$ Å).

(*) Ce travail vient d'être révisé par H. D. BABCOCK et C. E. MOORE (*Astrophys. Journ.*, 101, 374, 1945).

Quatre publications sont à citer pour 1938. Au cours de cette année, B. EDLÉN (25) indentifie, entre 7423,63 et 9460,66 Å, des raies de l'azote atomique ayant des potentiels d'excitation très élevés.

En utilisant une puissante décharge dans la vapeur de sodium, R. ROOD et R. A. SAWYER (26) mesurent le spectre du sodium jusqu'à λ 12679,0 Å ($3^2D-5^2F^{\circ}$), ce qui leur permet d'identifier sept raies solaires.

C. W. ALLEN (27) publie les intensités de 188 raies d'absorption situées entre 8800 et 11830 Å.

Enfin, H. D. BABCOCK donne, dans les *Rapports de l'Union Astronomique Internationale* (28), les valeurs préliminaires de longueurs d'onde solaires situées entre 12015,21 et 13376,33 Å.

En 1939, R. S. RICHARDSON et R. MINKOWSKI (29) font connaître les résultats de leurs études sur les spectres d'éruptions chromosphériques brillantes (région 3300 à 11500 Å). Cette publication est spécialement importante pour le problème de l'ionisation dans l'atmosphère terrestre.

Les longues et patientes recherches de H. D. BABCOCK et C. E. MOORE vont aboutir prochainement à la publication d'une table, *The Mount Wilson-Princeton Infra-red Solar Table* (30). Nous tirons d'un rapport de M. F. COFFEEN (31) les renseignements suivants concernant cet important travail.

La nouvelle table donne la position de 7500 raies, situées entre 6600 et 13500 Å. Un quart de ces raies ont certainement une origine solaire, et un tiers une origine tellurique. Probablement, plus de la moitié du reste sont des raies telluriques.

L'analyse de spectres obtenus en laboratoire a permis de classer environ deux tiers des raies solaires. Souvent des raies faibles, non encore observées en laboratoire sont nettement repérées. En plus des raies de Ca II et de H, les particularités les plus importantes du spectre infra-rouge sont dues aux multiplets de Si et de C.

Les transitions de vibration et la constitution isotopique sont données pour l'oxygène atmosphérique.

§ 2. Domaine de longueurs d'onde plus grandes que 1,35 μ

A la fin du XIX^e siècle, S. P. LANGLEY (32), aidé par C. G. ABBOT, parvient à déterminer l'aspect général du spectre solaire jusqu'à 5,3 μ . Ce résultat a été obtenu grâce à l'utilisation du bolomètre et de l'enregistrement automatique. Le spectrographe employé était généralement muni d'un prisme en sel gemme (hauteur : 19 cm., largeur des faces : 13 cm., angle : 60°). Quelques parties du spectre furent aussi examinées avec un prisme en flint de mêmes dimensions. Les spectrogrammes obtenus à cette époque révèlent principalement les bandes de vibration de H₂O et CO₂, gaz contenus dans l'atmosphère terrestre.

Les recherches de LANGLEY furent continuées par ABBOT et ses élèves. En particulier, C. B. ABBOT et H. B. FREEMAN (33) publient, en 1928, une liste de 1.104 raies comprises entre 7582 et 18194 Å, ainsi que les spectrogrammes qui se rapportent à cette région. Ces observations ont été effectuées en utilisant un spec-

trographe muni de trois prismes en flint (dimensions des faces : 6 x 6 cm.; deux prismes de 60°, un prisme de 64°).

Comme le signale H. D. BABCOCK (34), les résultats d'ABBOT et FREEMAN donnent la possibilité de repérer les 2^e, 3^e et 4^e membres de la série de PASCHEN pour l'hydrogène, ainsi que les plus importantes des raies solaires de longueurs d'onde inférieures à 10000 Å. Ils mettent aussi en évidence une bande tellurique à 12600 Å, qui est due à l'oxygène atmosphérique (35) et qui fut ensuite photographiée et mesurée par HERZBERG (18). Au delà de 1 μ , la dispersion utilisée n'est pas suffisante pour permettre des identifications atomiques.

En 1935, A. ADEL, V. M. SLIPHER et E. F. BARKER (36) effectuent des observations de 5 à 21 μ et parviennent à enregistrer le spectre solaire à petite dispersion jusqu'à 13,5 μ .

Entre 1938 et 1941, A. ADEL et C. O. LAMPLAND (37, 38, 39) obtiennent de nouveaux détails dans le spectre solaire étudié, à petite dispersion, entre 2,7 et 13,5 μ . Leurs observations leur ont permis principalement d'identifier des bandes de H₂O, CO₂, O₃, N₂O et N₂O₅. L'absorption du N₂O contenu dans l'atmosphère terrestre serait au minimum équivalente à celle d'une couche de 3 mm. de N₂O à température et pression normales (40). L'identification de N₂O₅ reste problématique jusqu'à présent. D'après G. B. B. M. SUTHERLAND et G. S. CALLENDAR (41), il est peu probable que la pression réduite de ce gaz s'élève à quelques dixièmes de millimètre.

Enfin, en 1942, une nouvelle étude, à petite dispersion, du spectre solaire au delà de 13,5 μ permet à A. ADEL (42) d'étendre les observations jusqu'à 24 μ .

La première étude, à grande dispersion, du spectre solaire au delà de 1,35 μ date de 1935. Pendant cette année, A. ADEL et V. M. SLIPHER (43) publient les résultats obtenus en utilisant l'installation de HARDY (cf. bibl., 1^{re} partie, 39). En employant un réseau à 47,2 traits par millimètre (1.200 traits par pouce), 101 raies furent observées à cette époque entre 7,7 et 11 μ . Les observations effectuées entre 9 et 10 μ permirent de déceler la structure fine de la bande d'ozone ayant son centre à 9,6 μ (44).

En 1941, A. ADEL (45) annonce qu'il est parvenu à enregistrer le spectre solaire de 2 à 14 μ en utilisant un réseau à 94,4 traits par millimètre (2.400 traits par pouce).

La dernière publication (46), que nous avons reçue concernant cette étude, donne les enregistrements obtenus de 7 à 14 μ ainsi qu'une liste d'environ 400 raies mesurées dans cette région spectrale. Notons que des raies distantes de 1 cm⁻¹ sont encore séparées.

Grâce à ces observations, la structure fine des bandes suivantes a été repérée :

- I. ν_2 de H D O. Centre à 7,12 μ . (47)
- II. ν_1 de N N O. Centre à 7,78 μ . (48)
- III. ν_2 de O C O. Centre à 13,9 μ . (49)
- IV. $\nu_3 - (\nu_1, 2 \nu_2)$ de O C O. Centres à 10,4 μ et 9,4 μ . (50)

Trois raies entre 9,062 et 9,284 μ ont été attribuées aux transitions 3D-4P de NaI et trois raies entre 8,637 et 8,410 μ seraient dues aux transitions 6P-5D de KI (51).

Les enregistrements entre 7 et 14 μ révèlent aussi d'autres détails (en particulier des raies à 11,7 et 12,6 μ), qui n'étaient pas identifiés lors de la publication (*).

En résumé, les observations, à grande dispersion, effectuées sur le spectre solaire par H. D. BABCOCK et C. E. MOORE se limitent à 1,35 μ , tandis que celles de A. ADEL commencent à 2 μ .

Lors de la mise en service de notre installation infra-rouge, la région 1,35 à 2 μ était donc la moins étudiée. A la suite de cette constatation, nous avons entrepris nos premières observations dans ce domaine, en utilisant le réseau à 576 traits par millimètre.

La partie du spectre solaire comprise entre 1,35 et 2 μ est intéressante à étudier à plusieurs points de vue :

1° six bandes de CO₂ et deux bandes de vapeur d'eau sont situées dans ce domaine;

2° plusieurs raies atomiques peuvent y être prédites;

3° par suite de l'intensité relativement grande du rayonnement de 1,35 à 2 μ , cette région peut être étudiée avec un pouvoir de résolution plus grand que celui qui est applicable au delà de 2 μ .

CHAPITRE II

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION UTILISÉE ET RÉSULTATS OBTENUS

§ 1. Description de l'installation

En vue de l'étude du spectre infra-rouge solaire, un coelostat, avec miroir secondaire, a été installé au deuxième étage de l'Institut d'Astrophysique de Cointe. La planche 10 donne une photographie de cet instrument. Il permet d'envoyer verticalement, vers le bas, un faisceau de rayons solaires. Après avoir été réfléchi par le miroir principal puis par le miroir secondaire, le faisceau passe dans une « cheminée », qui débouche dans le coin S.-W. du laboratoire où se trouve le grand spectrographe infra-rouge. Un miroir plan M_c (Pl. 8), incliné

(*) Concernant l'étude de l'atmosphère terrestre et les identifications éventuelles dans le spectre infra-rouge solaire, la publication de SUTHERLAND et CALLENDAR (41) est particulièrement intéressante à consulter.

A. ADEL (51_a) a aussi observé, dans le spectre solaire, la structure fine des bandes de CO₂ situées à 20061 Å et 20568 Å. Ses résultats nous sont parvenus au cours de l'impression du présent travail.

à 45° et situé sous la « cheminée », envoie les rayons solaires sur le miroir plan M_r, qui les dirige sur le miroir sphérique M_p (distance focale : 1,50 m.). Ce dernier forme une image du soleil sur la fente F₁ du spectrographe, le miroir M_b ayant été retiré.

Tous les miroirs mesurent 30 cm. de diamètre. Ils ont été aluminisés après avoir été taillés optiquement dans du verre L₄ de Saint-Gobain (France). Ce verre est analogue au pyrex.

Le coelostat a été construit par M. MANENT (*), d'après les indications de A. COUDER, de l'Observatoire de Paris.

Le mouvement de rotation, qui doit être communiqué au miroir principal, s'effectue à l'aide d'une magnéto synchronisée par une pendulette électrique (système Brillé). Tout en étant situé près du spectrographe, l'observateur peut orienter le miroir principal et le miroir secondaire, en utilisant respectivement une magnéto de rappel et deux petits moteurs électriques.

Le coelostat a été réglé en utilisant la première méthode par autocollimation, signalée par W. HARTMAN (52).

Pour enregistrer le spectre du soleil, le spectrographe décrit dans la première partie de ce mémoire était muni du réseau à 576 traits par millimètre et du prisme en sel gemme. Nous avons alors employé deux galvanomètres « micro » dans l'installation, l'amplification s'élevant habituellement à 240 (cf. 1^{re} partie, chap. III, § 4).

Les différentes opérations à effectuer pour obtenir un enregistrement ont été énumérées dans la première partie au chapitre III, § 9.

§ 2. Résultats de nos observations

Jusqu'à présent, nous avons trouvé 420 nouvelles raies entre 13440 et 15960 Å. Dans ce qui suit, nous nous occuperons des 284 raies observées entre 13440 et 15293 Å (**). Ce domaine est divisé en quatorze régions couvrant chacune environ 150 Å. Les enregistrements qui s'y rapportent sont reproduits, à l'échelle 1/2, sur les planches 11 à 24. Pour chaque région, nous avons indiqué les longueurs d'onde du début et de la fin des enregistrements. Le début correspond à la longueur d'onde la plus courte. Une échelle, graduée de 10 en 10 cm⁻¹, permet de repérer facilement la position approximative des raies observées. Ces dernières correspondent aux minima des courbes.

A côté des largeurs de fente exprimées en millimètres, nous donnons les largeurs de fente effectives, en angströms et en cm⁻¹. Celles-ci ont été calculées pour une longueur d'onde du centre de chaque région.

(*) M. MANENT, constructeur, rue du Parc, La Croix de Berny, Seine (France).

(**) Nous publierons ultérieurement les résultats obtenus entre 15293 Å et 15960 Å. Nous nous proposons aussi de poursuivre l'étude du spectre solaire au delà de cette limite. Un examen préliminaire nous a permis de constater que, même en employant un petit réseau (75 x 50 mm.), il était possible d'atteindre environ 2,4 μ tout en utilisant des fentes de 0,2 mm.

Chaque enregistrement a été interrompu, généralement plusieurs fois, pour permettre l'impression des positions « zéro » du spot galvanométrique. Celles-ci se marquent sur le papier photographique par de petits traits parallèles aux « lignes-repères ». Pour les mettre en évidence, nous les avons encadrés par deux autres traits (*). Ceux-ci permettent de tracer les « lignes-zéro ». Dans chaque région, les lignes-zéro supérieure et inférieure correspondent respectivement aux enregistrements supérieur et inférieur. Les ordonnées mesurées par rapport à ces lignes sont proportionnelles aux intensités des radiations tombant sur la pile thermo-électrique T.

Par suite de l'effet DOPPLER, la différence des longueurs d'onde d'une même raie dans le spectre des deux extrémités de l'équateur solaire est de $0,2 \text{ \AA}$ pour $\lambda = 15000 \text{ \AA}$. Comme l'erreur quadratique moyenne de nos mesures s'élève à $\pm 0,7 \text{ \AA}$, cet effet ne peut donc pas être utilisé dans notre cas, pour séparer les raies telluriques des raies solaires. Pour essayer d'atteindre ce but, des enregistrements ont généralement été pris dans une même région spectrale, lorsque le soleil était « haut » et « bas » sur l'horizon. Lorsque les circonstances le permettaient, le spectre a aussi été enregistré pour une hauteur intermédiaire du soleil. Sur les enregistrements *a* des planches 11 à 25, l'absorption atmosphérique croît en passant de la courbe supérieure à la courbe inférieure. Pour chaque enregistrement, elle augmente avec la longueur d'onde. Le tableau IV, à double entrée, donne les hauteurs du soleil, qui correspondent au début et à la fin de chaque courbe. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, le début se rapporte toujours aux courtes longueurs d'onde. Les conditions d'observation n'ont pas permis de prendre le spectre du soleil, lorsque celui-ci atteignait des hauteurs inférieures à 10° .

Par suite des variations de l'état hygrométrique de l'air, les enregistrements d'une même région spectrale peuvent présenter des aspects très différents, lorsqu'ils ont été obtenus à différentes époques de l'année. A titre d'exemple, nous donnons planche 11 *a* et planche 25 les enregistrements pris respectivement le 8 mai et le 26 juillet 1943 (**). Chacune de ces planches se rapporte au domaine 13440-13593 Å. Les différences d'intensité observées permettent d'identifier facilement la plupart des raies comme étant dues à la vapeur d'eau.

Nous donnons dans le tableau V les résultats des mesures effectuées sur nos enregistrements.

Les troisième et cinquième colonnes fournissent respectivement les longueurs d'onde et les nombres d'onde des 284 nouvelles raies observées, dans le spectre

(*) Ces deux traits sont parfois légèrement décalés l'un par rapport à l'autre pour tenir compte de la dérive. Rappelons à ce sujet, qu'après avoir interrompu l'enregistrement et pris la position du zéro, nous avons effectué des lectures aux cercles C_2 . Pendant ce temps, la position du zéro peut avoir changé. Le décalage éventuel se mesure en prenant la différence des positions occupées par le spot au début et à la fin de l'interruption.

(**) La dérive observée sur l'enregistrement inférieur de la planche 25 est due à la décharge des batteries reliées à la lampe de l'amplificateur.

solaire, entre 13440 et 15293 Å. Pour les raies bien nettes, l'erreur quadratique moyenne est de l'ordre de $\pm 0,7 \text{ \AA}$ ou de $\pm 0,4 \text{ cm}^{-1}$.

Lorsqu'une raie se marque par une inflexion, la mesure est influencée par la raie intense voisine. A ce sujet, il est intéressant de comparer la différence d'aspect que présente, par exemple, la raie $\sqrt{7111,7 \text{ cm}^{-1}}$ sur les deux enregistrements de la figure 20 (*). Sur la courbe inférieure, la raie en question est fortement influencée par la raie intense voisine s'étendant de *c* à *d*. La position de $7111,7 \text{ cm}^{-1}$ sur l'enregistrement supérieur montre que, pour tenir compte de l'effet de voisinage, la raie correspondante de l'enregistrement inférieur doit être située en *a* et non en *b*. Au cours de nos mesures, nous avons tenu compte de cette constatation pour déterminer les positions des inflexions.

Notons que les mesures du tableau V, qui concernent le spectre solaire, se rapportent à l'enregistrement supérieur dans chaque région. Cette remarque est spécialement applicable aux raies larges. Pour la raie *cd* de la figure 20, par exemple, nous donnons, dans le tableau, la position des limites *e* et *f* marquées sur la courbe supérieure.

TABLEAU IV

Hauteurs du soleil correspondant aux différents enregistrements.

Pl.	Supérieure		Intermédiaire		Inférieure	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
11	32° 21'	30° 04'	29° 07'	26° 37'	—	—
25	52 22	48 07	45 47	40 00	26° 00'	21° 22'
12	—	—	—	—	—	—
13	—	—	20 37	16 30	14 30	10 30
14	31 45	23 00	—	—	—	—
15	—	—	28 15	25 22	24 22	20 15
16	—	—	23 27	17 45	16 30	11 37
17	60 15	57 15	49 15	43 49	—	—
18	57 07	54 22	47 30	43 49	20 07	15 52
19	53 52	49 37	42 33	33 19	15 00	11 09
20	35 45	29 52	26 52	21 22	16 45	12 15
21	56 15	52 55	43 15	38 30	21 30	17 00
22	51 30	47 22	37 19	32 22	15 00	10 30
23	57 15	53 40	43 45	39 00	25 39	17 07
24	52 30	48 30	37 45	32 49	15 00	10 30

(*) Cette figure reproduit, en vraie grandeur, une partie de nos enregistrements originaux correspondant à la planche 15 *a*.

TABLEAU V

Spectre du soleil et de la vapeur d'eau.
Domaine de longueurs d'onde : 13440-15293 Å.

Notations et symboles :

- λ : longueur d'onde en Angströms Internationaux.
- ν : nombre d'onde.
- inf. : raie se marquant par une inflexion.
- f : raie de faible intensité.
- la : raie particulièrement large.
- ? : la présence de la raie est douteuse.
- + : raie très faible ou absente lorsque le tube d'absorption est à la température du laboratoire (20°).
- c : mesures se rapportant à des raies communes à deux régions.

Remarque : Certaines raies n'apparaissent pas sur les enregistrements du spectre solaire reproduits Pl. 11 à 25, mais elles ont été observées au cours d'autres séances d'observation. Dans ce cas, nous avons indiqué les dates qui y correspondent dans la dernière colonne du tableau V.

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm ⁻¹	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm ⁻¹	Δλ sol.-vap. d'eau	Observations.		
11	1	13441,4		7437,7	13442,0+		7437,4+	-0,6			
		13443,5	inf.	7436,5	13444, +	inf.	7436,3+	-0,5			
		13451,3		7432,2	13451,5+		7432,1+	-0,2	Renforcement d'intensité dans le sp. solaire.		
				13455,1		7430,1	13455,8+		7429,7+	-0,7	
				13458,1		7428,5	—		—	—	
				13461,3		7426,7	13461,6		7426,5	-0,3	
				13464.	inf.	7425,2	—		—	—	
				13468,2		7422,9	—		—	—	
				13473,9		7419,8	13474,0		7419,7	-0,1	
				13476.	inf.	7418,6	13477.	inf.	7418,0+	-1	
				13480,6		7416,1	13480,8		7416,0	-0,2	
				13485,4		7413,4	13485,1		7413,6	+0,3	
				13488,2		7411,9	13488,7+		7411,6+	-0,5	
				13492,2	f	7409,7	—		—	—	
				13495,3		7408,0	13495,2		7408,1	+0,1	
				13499,8	la	7405,5	13499,8		7405,5	0	
				13502,5	inf.	7404,1	13503.	inf.	7403,8	-0,5	
				13505.	inf.	7402,7	13506. +	inf.	7402,5+	-1	
				13511,2		7399,3	13510,8		7399,5	+0,4	
				13514,2	la	7397,6	13514,2		7397,6	0	
				13521,4		7393,7	13521,2		7393,8	+0,2	
				13527,9	la	7390,2	13527,8		7390,2	+0,1	
				13533,7		7387,0	13533,7		7387,0	0	
				Raie de		Raie de					
				13539.		7384,1	13539,6		7383,8	—	
				à		à	13544,0		7381,4	—	
							13546,1		7380,2	—	
				13549.		7378,6	13549.	inf.	7378,6	—	

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm ⁻¹	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm ⁻¹	Δλ sol.-vap. d'eau	Observations.	
12	2	Raie de		Raie de						
		13552.		7377,0	13554,9		7375,4	—		
		à		à						
		13559.		7373,2	13559,6		7372,9	—		
		Raie de		Raie de						
		13567.		7368,8	13567,9		7368,4	—		
		à		à	13572.	inf.	7366,1	—		
		13574.		7365,0	13574,6		7364,7	—		
		Raie de		Raie de						
		13579.		7362,3	13581,0		7361,3	—	c	
		à		à						
		13585.		7359,0	13584,9		7359,2	—	c	
		Abs. de		Abs. de						
		13588.		7357,4	13589.	inf.	7356,9	—	c	
		à		à						
		13593.		7354,7						
		Abs. de		Abs. de						
		13578.		7362,9						
						13580,7		7361,4	—	c
						13584,9		7359,2	—	c
						13589.	inf.	7356,9	—	c
				13591,7	la	7355,5	—			
				13599,5		7351,3	—			
				13606,2	la	7347,6	—			
				13608.	inf.	7346,6	—			
				13613,7		7343,6	—			
				13617,1		7341,8	—			
				13619.	inf.	7340,7	—			
				13620,3		7340,0	—			
				13624,0		7338,0	—			
				13627.	inf.	7336,4	—			
				13631,5		7334,0	—			
				13635,5	inf.	7331,8	—			
		à	à	13638,2		7330,3	—			
				13642,8		7327,9	—			
				13651,2		7323,4	—			
				13659,4		7319,0	—			
				13665,3		7315,8	—			
				13672,3		7312,1	—			
				13674,6		7310,8	—			
				13682,5		7306,6	—			
				13685.	inf.	7305,3	—			
				13688,9		7303,2	—			
				13696,0		7299,4	—	c		
				13701.	f	7296,7	—	c		

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol. vap. d'eau	Observations.		
13	3	13730.		7281,3	13705,9		7294,1	—	c		
					13709.	inf.	7292,5	—	c		
					13713,7		7290,0	—	c		
					13718,2		7287,6	—	c		
					13725,4		7283,8	—	c		
		Abs. de 13694.		Abs. de 7300,5		—		—			
		à					13695,8		7299,5	—	c
							13701.	f	7296,7	—	c
							13705,9		7294,1	—	c
							13709.	inf.	7292,5	—	c
							13713,4		7290,2	—	c
							13717,8		7287,8	—	c
							13725,3		7283,8	—	c
							13729,8		7281,5	—	
							Raie de 13735,5		Raie de 7278,4	—	
							13740,3		7275,9	—	
		la					13745,4		7273,2	—	
							13755,4		7267,9	—	
							13757,5	inf.	7266,8	—	
							Raie de 13761,4		Raie de 7264,7	—	
							13765,7		7262,5	—	
							13768.	inf.	7261,2	—	
							Raie de 13777.		Raie de 7256,5	—	
							13783,4	la	7253,1	—	
							13788.		7250,7	—	
							Abs. de 13798.		Abs. de 7245,5	—	
		à					13797,8		7245,6	—	
							13803,1	la	7242,8	—	
							13807,2		7240,7	—	
							13815,4		7236,4	—	
							Raie de 13822.		Raie de 7232,9	—	
							13826.		7230,8	—	
13827.	inf.						7230,3	—			
13831,4							7228,0	—	c		
13835,1							7226,1	—	c		
13840,4							7223,3	—	c		
13842.		7222,5	—								

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol. vap. d'eau	Observations.					
14	4	Abs. de 13835.			Abs. de 13831,3		7228,0	—	c					
					13834,9		7226,2	—	c					
					13840,4		7223,3	—	c					
					13846,4	la	7220,2	—						
					13849.	inf.	7218,8	—						
		à					13854,9		7215,7	—				
							13860,0		7213,1	—				
							13863. +	inf.	7211,5+	—				
							13866,7		7209,6	—				
							13875,6	la	7205,0	—				
							13878,8	la	7203,3	—				
							13881.	inf.	7202,2	—				
							13886,3		7199,4	—				
							13891,5	f	7196,7	—				
							13895,6		7194,6	—				
		la					13903,7		7190,4	—				
							13905,5		7189,5	—				
							Raie de 13913,3		Raie de 7185,4	—				
							13919.	inf.	7182,5	—				
							13921,3	la	7181,3	—				
							13928. +	inf.	7177,9+	—				
							13932,0		7175,8	—				
							13935,3		7174,1	—				
							13938,1	inf.	7172,7	—				
							13942,9		7170,2	—				
		à					13946,3		7168,5	—				
							13951,6		7165,7	—				
							13954.	inf.	7164,5	—	c			
							13960,9	la	7161,0	—	c			
							13968,5		7157,1	—	c			
							13971.		7155,8	—				
							Abs. de 13944.		Abs. de 7169,6	—				
à										13951,3		7165,9	—	c
										13954.	inf.	7164,5	—	c
										13960,7	la	7161,0	—	c
		13968,2		7157,2	—	c								
		13973,5	f	7154,5	—									
		13977,8+		7152,3+	—									
		13981,1+		7150,6+	—									
		13978,4		7152,0	—									

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.	
16	6	Raie de		Raie de						
		13990.		7146.1	13986,1+		7148,1+	—		
					13991,3		7145,4	—		
					13996,5		7142,7	—		
		à		à	14000.	inf.	7140,9	—		
					14003,0		7139,4	—		
		14015.		7133,3	14011,1	la	7135,3	—		
					14017.	inf.	7132,3	—		
		14026,1		7127,6	14026,8	la	7127,3	—		
		Raie de		Raie de						
		14037.		7122,1	14033,3		7124,0	—		
					14037,1		7122,0	—		
		à		à	14040,6		7120,3	—		
					14046,1		7117,5	—		
		14049.		7116,0	14050.	inf.	7115,5	—		
		14052,	inf.	7114,5	14053,8+		7113,6+	-1,8		
		14057,6		7111,7	14057,9+		7111,5+	-0,3		
		Raie de		Raie de						
		14063.		7108,9						
		à		à	14065.	la	7107,5	—		
					14069.	la	7105,9	—		
		14071.		7104,9	14071.	inf.	7104,9	—		
		14079,3		7100,7	14079,3		7100,7	0	c	
		Abs. de		Abs. de						
		14085.		7097,8	14085,7		7097,5	—	c	
		à		à						
		14088.		7096,3	14089,0	inf.	7095,8	—	c	
					14091.	la	7094,8	—	c	
					14095,2		7092,7	—	c	
		14079,6		7100,5	14079,3		7100,7	+ 0,3	c	
		Raie de		Raie de						
14085.		7097,8	14085,9		7097,4	—	c			
à		à	14089,5	inf.	7095,6	—	c			
			14091.	la	7094,8	—	c			
14096.		7092,3	14095,5		7092,5	—	c			
14100,0	la	7090,3	14102,4		7089,1	—				
Raie de		Raie de								
14108.		7086,3	14108,5	la	7086,0	—				
à		à								
14110.		7085,2	14112.	inf.	7084,3	—				
			14119,3		7080,6	—				
14119,2	la	7080,6	14122.	inf.	7079,2	—				
14128.	inf.	7076,2	—		—	—	(19.2.1943)			
14132,1		7074,2	14132,3		7074,1	-0,2				

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.		
		Raie de		Raie de							
		14136.		7072,2							
					14138,2		7071,1	—			
					14142,8		7068,8	—			
		à		à	14144.	inf.	7068,2	—			
					14149,4		7065,5	—			
		14151.		7064,7	14154. +	inf.	7063,2+	—			
		14156,5	inf.	7062,0	14157,0+		7061,7+	-0,5			
		14163,5	Inf.	7058,5	14162,5+		7059,0+	+ 1			
		14166,4	la	7057,1	14165,6		7057,5	+ 0,8			
		14170.	inf.	7055,3	—		—	—			
		14172,3		7054,1	14172,2		7054,2	+ 0,1			
		14177,0		7051,8	14177,1		7151,7	-0,1			
		Raie de		Raie de							
		14185.		7047,8	14183.	inf.	7048,8	—			
					14185,9		7047,4	—			
		à		à	14189,2		7045,7	—			
					14192,9		7043,9	—			
		14193.		7043,8							
		14195,8		7042,4	14196,5		7042,1	-0,7			
		14202,6		7039,1	14203,3		7038,7	-0,7	c		
		14207,6		7036,6	14208,0		7036,4	-0,4	c		
		14212,2		7034,3	14212,3		7034,3	-0,1	c		
		14217,5		7031,7	14218,3	la	7031,3	-0,8	c		
					14223,9	la	7028,5	—	c		
		17	7	14202,7	la	7039,0	14203,3		7038,8	-0,6	c
				14207,7		7036,5	14208,0		7036,4	-0,3	c
				14212,1		7034,4	14212,3		7034,3	-0,2	c
				14217,6		7031,6	14217,9	la	7031,5	-0,3	c
				14223,7		7028,6	14223,8	la	7028,6	-0,1	c
				14229,3	la	7025,9	14229,6	la	7025,7	-0,3	
		14235,5	la	7022,8	14235,7	la	7022,7	-0,2			
		14241,7	f	7019,8	—		—				
		14245,7		7017,8	14245,7		7017,8	0			
		14250.	inf.	7015,6	14249,3		7016,0	+ 0,7			
		14253,3		7014,0	14252,8		7014,3	+ 0,5			
		14255,0		7013,2	14255,5		7013,0	-0,5			
		14260,2		7010,6	14260,2		7010,6	0			
		14265,5	inf.	7008,0	14265. +	inf.	7008,3+	+ 0,5			
		14269,3		7006,2	14269,0		7006,3	+ 0,3			
		14273,9		7003,9	14273,5		7004,1	+ 0,4			

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.
		Raie de 14278.		Raie de 7001,9	14278,0		7001,9	—	
		à 14282.		à 6999,9	14280,0		7000,9	—	
		14285,5		6998,2	14285,7		6998,1	- 0,2	
		14292,8	inf.	6994,7	14292,0		6995,1	+ 0,8	
		14295,5		6993,3	14295,4		6993,4	+ 0,1	
		14308,2		6987,1	14308,0		6987,2	+ 0,2	
		Raie de 14313.		Raie de 6984,7	14312,8		6984,9	—	
		à 14315.		à 6983,8	14315.	inf.	6983,8	—	
		Raie de 14320.		Raie de 6981,4	14320,8		6981,0	—	
		à 14322.		à 6980,4	14323. +	inf.	6979,9+	—	
		14325,5	inf.	6978,7	14325,5+		6978,7+	0	
		14333,7		6974,7	14333,7		6974,7	0	
		Raie de 14338.		Raie de 6972,6	14338. +	inf.	6972,6+	—	
		à 14341.		à 6971,1	14340,0		6971,6	—	c
		14344.	inf.	6969,7	14344,6+	f	6969,4+	- 0,6	c
		14349,0		6967,3	14348,7		6967,4	+ 0,3	c
18	8	14340,5	la	6971,4	14340,3		6971,5	+ 0,2	c
		14345.	inf.	6969,2	14345,1+	f	6969,2+	- 0,1	c
		14349,1		6967,2	14348,9		6967,3	+ 0,2	c
		14352,3		6965,7	14352. +	inf.	6965,8+	+ 0,3	
		14358,2		6962,8	14357,6		6963,1	+ 0,6	
		14361.	inf.	6961,4	14362. +	inf.	6960,9+	- 1	
		14369.	la	6957,5	14368,7		6957,7	+ 0,3	
		Raie de 14372.		Raie de 6956,1	14373. +	? inf	6955,6+	—	
		à 14376.		à 6954,1	14374,7	la	6954,8	—	
		14381,8		6951,4	14381,8+		6951,4+	0	
		14388.	inf.	6948,4	14387. +	inf.	6948,8+	+ 1	
		14392,0	la	6946,5	14391,8	la	6946,6	+ 0,2	
		14396,5		6944,3	14396. +	inf.	6944,5+	+ 0,5	
		14401,2		6942,0	14400,9+		6942,2+	+ 0,3	
		14406,0		6939,7	14405,4+	f	6940,0+	+ 0,6	
		14411,3	la	6937,1	14411,4		6937,1	- 0,1	
		14418,8		6933,5	14418,7+		6933,6+	+ 0,1	
		14420.	inf.	6932,9	—		—	—	
		14425,5	la	6930,3	14425,7		6930,2	- 0,2	

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.
		14433,6		6926,4	14434. +	f	6926,2+	- 0,4	
		14437,5	inf.	6924,6	14437,1+		6924,7+	+ 0,4	
		14440,1		6923,3	14440,5		6923,1	- 0,4	
		14445.	inf.	6920,9	14445. +	f	6920,9+	0.	
		Raie de 14451.		Raie de 6918,0	14449. +	inf.	6919. +	—	
		à 14456.		à 6915,6	14454,2	la	6916,5	—	
		14458.	inf.	6914,7	14458,5	inf.	6914,5	- 0,5	
		14460.	inf.	6913,7	—		—	—	(20.6.1943)
		14466.	inf.	6910,9	14466. +	inf.	6910,9+	0	
		14467,1		6910,3	14467,5+	la	6910,2+	- 0,4	
		14469,5	inf.	6909,2	14471. +	inf.	6908,5+	- 1,5	
		14478,6		6904,9	14478,7		6904,8	- 0,1	c
		14483,7		6902,4	14483,8+		6902,4+	- 0,1	c
19	9	14478,6		6904,9	14478,0		6905,2	+ 0,6	c
		14483,7		6902,4	14483,6+		6902,5+	+ 0,1	c
		14488,3	f	6900,3	—		—	—	(8.4.1943)
		14492.	inf.	6898,4	14491,5+	inf.	6898,7+	+ 0,5	
		14494,7		6897,2	14494,3+		6897,4+	+ 0,4	
		Raie de 14499.		Raie de 6895,1	14498,3		6895,5	—	
		à 14508.		à 6890,9	14502,5		6893,5	—	
		14515.	inf.	6887,6	14507,3		6891,2	—	
		14518,5		6885,9	14514. +	inf.	6888,1+	+ 1.	
		14526,0		6882,3	14518,4		6886,0	+ 0,1	
		14531,0		6880,0	14525,6		6882,5	+ 0,4	
		14537,2		6877,0	14530. +	inf.	6880,5+	+ 1	
		14540,6		6875,4	14537. +	f	6877,2+	+ 0,2	
		14546.	inf.	6872,9	14540,4		6875,5	+ 0,2	
		14549,7		6871,1	14545. +	? inf.	6873,4+	+ 1	
		14555,4		6868,5	14549,7		6871,1	0	D* le sp. solaire. l'aile droite de 14549,7 est perturbée
		14558,6		6866,9	—		—	—	
		14560,7		6866,0	—		—	—	
		14566,0		6863,5	14565,6+		6863,7+	+ 0,4	Renforcement d'intensité dans le sp. solaire.
		14569,6		6861,8	14569,5+		6861,8+	+ 0,1	
		14573,8		6859,8	14573,8		6859,8	0	
		14581.	inf.	6856,4	—		—	—	
		14582,9		6855,5	—		—	—	
		14587,3		6853,4	—		—	—	
		14590,0		6852,2	—		—	—	
		14595,3		6849,7	—		—	—	
		14600,0		6847,5	14599,7		6847,6	+ 0,3	

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.	
20	10	14604.	inf.	6845,6	14604. +	? f	6845,6+	0		
		14609,3		6843,1	14608,9		6843,3	+ 0,4	c	
		14613,5		6841,2	14613,3		6841,2	+ 0,2	c	
		14616,5	inf.	6839,7	—		—	—	c	
		14609,2		6843,2	14608,5		6843,5	+ 0,7	c	
		14610.	inf.	6842,8	14610. +	inf.	6842,8+	0		
		14613,5		6841,2	14613. +		6841,4+	+ 0,5	c	
		14616,6		6839,7	14616,7+	f	6839,7+	- 0,1	c	
		14622,5		6836,9	14621,7+	f	6837,3+	+ 0,8		
		Raie de 14627.		Raie de 6834,9.						
		à		à	14628,4	la	6834,2	—		
		14630.		6833,5						
		14635,9		6830,7	14636. +	f	6830,7+	+ 0,1		
		14649,2	la	6824,5	14648,7		6824,7	+ 0,5		
		14656,9		6820,9	14656,5		6821,1	+ 0,4		
		Raie de 14661.		Raie de 6819,0						
		à		à	14660,5		6819,2	—		
		14663.		6818,1	14663. +	inf.	6818,1+	—		
		14666,9		6816,3	14666,7		6816,3	+ 0,2		
		14671.	inf.	6814,3	—		—	—		
		14674,3		6812,8	14674,4		6812,8	- 0,1		
		14679.	inf.	6810,6	14678. +	? f	6811,1+	+ 1		
		14681,4		6809,5	14681,1	la	6809,7	+ 0,3		
		14688,4		6806,3	14689. +	inf.	6806,0+	- 0,6		
		14692,7	la	6804,3	14692,5		6804,4	+ 0,2		
		Raie de 14702.		Raie de 6800,0						
		à		à	14703,2		6799,4	—		
					14706,7		6797,8	—		
		14708.		6797,2	14708. +	inf.	6797,2+	—		
		14713,8		6794,5	14713,8+		6794,5+	0		
		Raie de 14719.		Raie de 6792,1						
		à		à	14719,8		6791,8	—		
		14722.		6790,8	14721,8		6790,8	—		
		14728,7		6787,7	14728,5		6787,8	+ 0,2		
14734,2	la	6785,1	14733,7		6785,4	+ 0,5				
14743,6		6780,8	14743,5+	la	6780,8+	+ 0,1	c			
14743,3		6780,9	14743. +	la	6781,1+	+ 0,3	c			
14751.	inf.	6777,4	14751. +	inf.	6777,4+	0				
14754,6		6775,7	14754,5		6775,7	+ 0,1				
14764.	inf.	6771,4	14764. +	inf.	6771,4+	0				

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.	
22	12	14766,5		6770,2	14766,8		6770,1	- 0,3		
		14775,2		6766,3	14774,8		6766,4	+ 0,4		
		14777.	inf.	6765,5	14777.	inf.	6765,5	0		
		14785,7		6761,5	14785,8+		6761,4+	- 0,1		
		14791,0.		6759,0	14791,2		6758,9	- 0,2		
		14799,7.	la	6755,1	14799,8		6755,0	- 0,1		
		14802,5		6753,8	14803,0		6753,6	- 0,5		
		14813,5		6748,8	14813,2		6748,9	+ 0,3		
		14817,7		6746,9	14817,5		6746,9	+ 0,2		
		14821,8		6745,0	—		—	—		
		14827,5		6742,4	14826,8+	f	6742,7+	+ 0,7		
		14830,4		6741,1	—		—	—		
		14835.	inf.	6739,0	—		—	—		
		14837.	inf.	6738,1	—		—	—		
		14840,5		6736,5	14840,4		6736,5	+ 0,1		
		14843.	inf.	6735,4	14843. +	inf.	6735,4+	0		
		14848,6		6732,8	14848,9+		6732,7+	- 0,3		
		14851,7		6731,4	14851,9+		6731,3+	- 0,2		
		14857,4		6728,8	14857,5+	inf.	6728,8+	- 0,1		
		14861,5	inf.	6727,0	14861.	? inf.	6727,2	+ 0,5		
		14862,8		6726,4	14863,4		6726,1	- 0,6		
		14867,6		6724,2	14868,3+		6723,9+	- 0,7		
		14871,1		6722,6	14871. +	f	6722,7+	+ 0,1		
		14876,1		6720,4	14876,0		6720,4	+ 0,1	c	
		14878,6		6719,2	14879. +	inf.	6719,1+	- 0,4	c	
		14886,2		6715,8	14886. +	f	6715,9+	+ 0,2	c	
		14875,9		6720,5	—		—	—	c	
		14878,5		6719,3	14879. +	inf.	6719,1+	- 0,5	c	
		14886,1		6715,9	14885. +	f	6716,4+	+ 1,1	c	
		14892,8		6712,8	14892,9		6712,8	- 0,1		
		14895.	inf.	6711,9	—		—	—		
		14898.	inf.	6710,5	—		—	—		
		14902,3		6708,6	—		—	—		
		14905,1		6707,3	—		—	—		
		14910,6		6704,8	14910,5		6704,9	+ 0,1		
		14916,5		6702,2	14915,7+	f	6702,5+	+ 0,8		
		14920,8		6700,2	—		—	—		
		14924,7		6698,5	—		—	—		
		14928,6		6696,7	—		—	—		
		14936,2		6693,3	14935,6+		6693,6+	+ 0,6		
		14939,5		6691,9	—		—	—		
		Raie de 14945.		Raie de 6689,4						
		à		à	14946,2+		6688,9+	—		
		14946.		6688,9	—		—	—		

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.
		14949.	inf.	6687,6	—		—	—	
		14953,5		6685,6	14953,5+		6685,6+	0	
		14960,7		6682,4	14960,5+		6682,5+	+ 0,2	
		14965	inf.	6680,5	—		—	—	
		14968,1		6679,1	—		—	—	
		14971,6		6677,5	14971,7+		6677,5+	- 0,1	
		14976,4		6675,4	14976,3+		6675,4+	+ 0,1	
		14981,1		6673,3	14980,9+		6673,4+	+ 0,2	
		14984,5	inf.	6671,8	—		—	—	
		14987,2		6670,6	14986,6+	f	6670,8+	+ 0,6	
		14992,9		6668,0	14992,9+	f	6668,0+	0	
		14998.	? inf.	6665,7	—		—	—	Voir note (*)
		15002,6		6663,7	15002,8+	f	6663,6+	- 0,2	
		15007,9		6661,4	15007,8+	f	6661,4+	+ 0,1	c
		15013,7		6658,8	15013,9+		6658,7+	- 0,2	c
23	13	15008,0		6661,3	—		—	—	c
		15013,9		6658,7	15013,7+		6658,8+	+ 0,2	c
		15023,3		6654,5	—		—	—	
		15027,0		6652,9	—		—	—	
		15031,2		6651,0	—		—	—	
		15035,1		6649,3	15034,5+		6649,6+	+ 0,6	
		15039,7		6647,3	—		—	—	
		15043,2		6645,7	15043,0+		6645,8+	+ 0,2	
		15047,5		6643,8	—		—	—	
		15051,5	inf.	6642,0	—		—	—	
		15053,7		6641,1	—		—	—	
		15058,5		6639,0	—		—	—	
		15063,5	f	6636,8	—		—	—	
		15068,6		6634,5	15068,3+	la	6634,7+	+ 0,3	
		15073,3		6632,5	—		—	—	
		15078,9		6630,0	—		—	—	
		15082.	inf.	6628,6	—		—	—	
		15083,8		6627,9	—		—	—	
		15086,6		6626,6	—		—	—	
		15092.	f	6624,2	—		—	—	
		15095,3		6622,8	—		—	—	
		15098,2		6621,5	—		—	—	
		15101,3		6620,2	—		—	—	

(*) La raie λ 14998 A n'a été observée que sur le premier enregistrement obtenu le 18 mai 1943. Sur les enregistrements pris le 13 mai ainsi que les 12 et 14 octobre 1943, nous ne trouvons pas de raie entre 14992,9 Å et 15002,6 Å. Toutefois, aucun de ces enregistrements n'a été pris pour des hauteurs du soleil aussi élevées que celle correspondant au premier enregistrement du 18 mai 1943. Pour confirmer la présence de λ 14998 A, il convient d'effectuer de nouvelles observations par temps spécialement sec.

Pl.	Rég.	λ sp. solaire A.I	Rem.	ν sp. solaire cm^{-1}	λ sp. vap. d'eau A.I	Rem.	ν sp. vap. d'eau cm^{-1}	$\Delta\lambda$ sol.-vap. d'eau	Observations.
		15105,8		6618,2	—		—	—	
		15108,1		6617,2	—		—	—	
		15112,0		6615,5	—		—	—	
		15120,0		6612,0	—		—	—	
		15124,7		6609,9	—		—	—	
		15127,5		6608,7	—		—	—	
		15131,2		6607,1	—		—	—	
		15134,0		6605,8	—		—	—	
		15137,7		6604,2	—		—	—	
		15144,4		6601,3	—		—	—	c
		15151,6		6598,2	—		—	—	c
24	14	15144,2		6601,4	—		—	—	c
		15151,4		6598,3	—		—	—	c
		15158,9		6595,0	—		—	—	
		15164,1		6592,7	—		—	—	
		15168,6		6590,8	—		—	—	
		15172,2		6589,2	—		—	—	
		15179,8		6585,9	—		—	—	
		15183.	inf.	6584,5	—		—	—	
		15185,6		6583,4	—		—	—	
		15187,6		6582,5	—		—	—	
		15190,5		6581,3	—		—	—	
		15192.	inf.	6580,6	—		—	—	
		15196,1		6578,9	—		—	—	
		15200,2		6577,1	—		—	—	
		15204.	inf.	6575,4	—		—	—	
		15207,7		6573,8	—		—	—	
		15212.	inf.	6572,0	—		—	—	
		15214,4		6570,9	—		—	—	(17.7.1943)
		15217,5	inf.	6569,6	—		—	—	
		15219,5		6568,7	—		—	—	
		15224,9		6566,4	—		—	—	
		15230,2		6564,1	—		—	—	
		15237.	inf.	6561,2	—		—	—	
		15241,4		6559,3	—		—	—	
		15245,8		6557,4	—		—	—	
		15251,1		6555,1	—		—	—	
		15254,3		6553,8	—		—	—	
		15258,0		6552,2	—		—	—	
		15260,8		6551,0	—		—	—	
		15263,8		6549,7	—		—	—	
		15269,9		6547,1	—		—	—	
		15276,1		6544,4	—		—	—	
		15283,5		6541,2	—		—	—	
		15288,0		6539,3	—		—	—	

La méthode employée pour déterminer les longueurs d'onde a été indiquée puis précisée au chapitre III, § 7 et 10 de la première partie de ce mémoire. La valeur de la constante K de l'instrument est basée sur la mesure de l'angle θ correspondant à la raie 10139,8 Å de HgI, cette longueur d'onde étant exprimée en angströms internationaux.

Pour convertir les longueurs d'onde en nombres d'onde, nous avons extrapolé au delà de 10000 Å les formules de MEGGERS et PETERS (53) permettant de calculer les indices de réfraction de l'air. L'application des formules de KÖSTER et LAMPE (54) et de M. RUSCH (55) donne pratiquement le même résultat.

Remarquons que les différentes formules que nous venons de mentionner ne tiennent pas compte des anomalies de l'indice de réfraction, qui peuvent se présenter aux environs des bandes d'absorption intenses de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique.

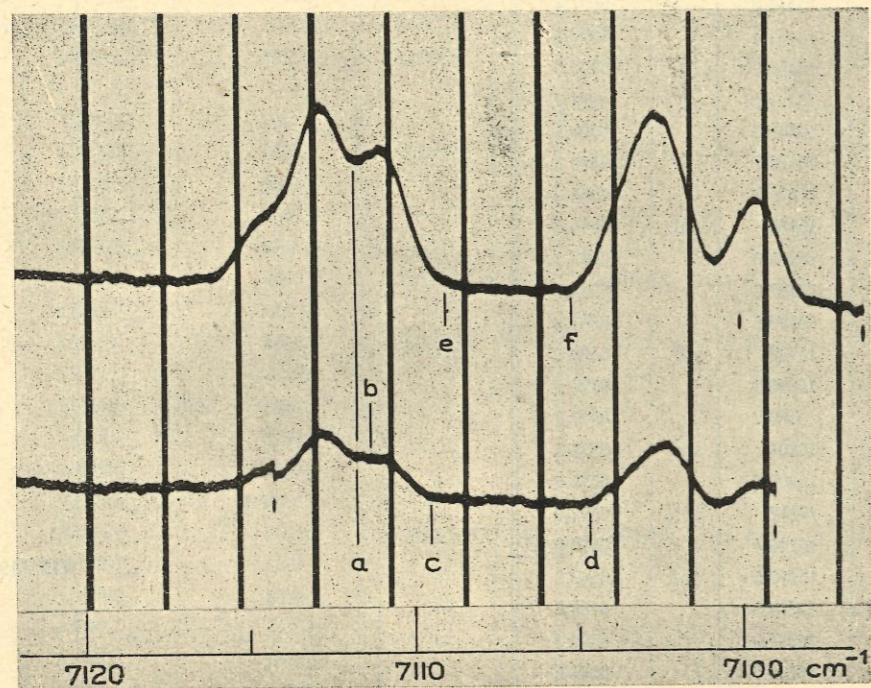


FIG. 20.

L'état du ciel de la Belgique est peu favorable aux observations solaires de longue durée. Très souvent, nous avons dû interrompre nos enregistrements à cause des nuages qui interceptaient le faisceau de rayons solaires tombant sur le coelostat. En général, par suite de ces circonstances défavorables, plusieurs journées ensoleillées ont été consacrées à chacune des quatorze régions étudiées. Tous les enregistrements obtenus dans de bonnes conditions ont été mesurés. Les longueurs d'onde données dans le tableau V résultent de la moyenne de ces mesures.

§ 3. Comparaison avec les résultats de C. G. Abbot et H. B. Freeman.

La dernière étude du spectre solaire dans la région 13440-15293 Å date de 1928. Elle a été effectuée, à l'Observatoire du Mont Wilson, par ABBOT et FREEMAN (33). Nous avons déjà signalé que ces auteurs avaient utilisé un spectrographe muni de trois prismes en flint (dimensions des faces : 6 × 6 cm.; deux prismes de 60°, un prisme de 64°). Le dispositif « bolomètre plus galvanomètre » était cinq fois plus sensible que la meilleure des installations réceptrices employées par LANGLEY. La planche 26 reproduit les enregistrements obtenus à cette époque entre 13400 et 15293 Å. Comme dans notre cas, les raies correspondent aux minima des courbes et l'absorption due à l'atmosphère terrestre augmente en passant de la courbe supérieure à la courbe inférieure. Cependant, pour chaque enregistrement, elle décroît de la gauche vers la droite.

De manière à faciliter la comparaison avec nos résultats, la planche 26 a été divisée en quatorze régions, numérotées de 1 à 14. Celles-ci correspondent respectivement aux enregistrements *a* des planches 11 à 24. On peut constater facilement qu'en général, nous sommes parvenu à résoudre en de nombreuses composantes chacune des raies observées précédemment.

§ 4. Comparaison avec les résultats de H. D. Babcock et C. E. Moore.

Dans le chapitre précédent, nous avons signalé que H. D. BABCOCK et C. E. MOORE (30) ont photographié le spectre du soleil jusqu'à 13500 Å, les clichés ayant été pris à l'Observatoire du Mont Wilson avec un spectrographe à réseau. Grâce à l'obligeance de M. BABCOCK, nous avons pu obtenir, avant sa publication, la liste des longueurs d'onde relatives aux raies comprises entre 13440 et 13500 Å. Cette liste est reproduite dans la première colonne du tableau VI, tandis que la deuxième donne les intensités estimées d'après l'échelle de ROWLAND (*). Dans la troisième colonne, nous avons indiqué les longueurs d'onde des raies observées sur nos enregistrements, et dans la quatrième, les nombres d'onde correspondants, de manière à localiser facilement les raies en question. Dans la dernière colonne, nous mentionnons les différences qui existent entre les mesures de BABCOCK-MOORE et les nôtres.

La comparaison des résultats est particulièrement intéressante. Tout d'abord, nous constatons que les différences observées ne dépassent pas l'ordre de gran-

(*) L'intensité 1 s'applique à une raie à la limite de nette visibilité sur les clichés photographiques, tandis que 1000 est utilisé pour les raies H et K. Au-dessous de 1, les intensités vont de 0 à -3, ces chiffres indiquant des raies de plus en plus difficiles à voir. *N* est employé pour une raie, qui n'est pas clairement définie ou qui est beaucoup plus faible que l'intensité correspondant normalement à sa largeur.

Les raies marquées d'un *N* peuvent généralement être considérées comme composées d'au moins deux raies trop rapprochées pour être séparées.

deur des erreurs de mesures. Dans deux cas, nous observons deux raies alors que BABCOCK et MOORE n'en mesurent qu'une. De plus, entre 13473,9 et 13495,3 Å, nos enregistrements révèlent cinq raies non mentionnées jusqu'à présent. Ainsi que nous le signalons dans le chapitre suivant, quatre de ces raies ont été retrouvées dans le spectre d'absorption de la vapeur d'eau.

TABLEAU VI
Spectre du soleil de 13440 à 13500 Å

Résultats de H.-D. BABCOCK et C.-E. MOORE		Résultats de l'auteur		λ_B et M moins λ_{auteur}
λ	intensité	λ	ν	
13442,12	2	13441,4 13443,5 (inf.)	7437,7 7436,5	(+0,72) (-1,38)
13452,08	2N	13451,3	7432,2	+0,78
13455,94	0	13455,1	7430,1	+0,84
13459,46	-1N	13458,1	7428,5	+1,36
13462,21	1N	13461,3 13464 (inf.)	7426,7 7425,2	(+0,91) (-1,79)
13468,41	0	13468,2	7422,9	+0,21
13473,91	3	13473,9	7419,8	+0,01
—		13476 (inf.)	7418,6	—
—		13480,6	7416,1	—
—		13485,4	7413,4	—
—		13488,2	7411,9	—
—		13492,2 (f)	7409,7	—
13495,20	2	13495,3	7408,0	-0,10

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES NOUVELLES RAIES OBSERVÉES DANS LE SPECTRE SOLAIRE

§ 1. Raies d'origine solaire

Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre II, § 2, nous avons enregistré la même région spectrale pour différentes hauteurs du soleil en vue de séparer les raies solaires et les raies telluriques. La comparaison des courbes inférieure et supérieure sur les figures a des planches 11 à 24 permet de constater qu'en général l'intensité des raies augmente lorsque le soleil descend sur l'horizon. La plupart des raies ont donc une origine tellurique, comme le confirment d'ailleurs les

identifications signalées au paragraphe suivant. En fait, nous n'avons trouvé que cinq raies, qui semblent manifester une origine solaire. Il s'agit de 14558,6 Å (6866,9 cm⁻¹, Pl. 19), 14998 Å (6665,7 cm⁻¹, Pl. 22), 15095,3 Å (6622,8 cm⁻¹, Pl. 23), 15207,7 Å (6573,8 cm⁻¹, Pl. 24) et de 15217,5 Å (6569,6 cm⁻¹, raie observée le 17 juillet 1943). Cependant, les enregistrements obtenus jusqu'à présent ne permettent pas de décider avec certitude de leur origine. D'une part, à cause des nombreuses raies observées, le « fond continu » ne peut être repéré sur nos courbes avec suffisamment de précision. D'autre part, il ne nous a pas été possible de prendre des spectres du soleil pour des hauteurs inférieures à 10°.

Les raies $\lambda 14558,4 \text{ Å} \pm 2$ (*) de Co I et $\lambda 14557,7 \text{ Å} \pm 2$ (*) de Fe I pourraient contribuer à la formation de $\lambda 14558,6 \text{ Å}$ (6866,9 cm⁻¹).

Nous avons signalé dans le tableau V que la raie $\lambda 14998 \text{ Å}$ doit être considérée comme douteuse, cette raie n'apparaissant que sur un seul de nos enregistrements. Sa présence serait intéressante à confirmer, une raie du baryum neutre étant située à $\lambda 14999,8 \text{ Å} \pm 2$ (**).

D'après la table révisée de ROWLAND (10), aucune raie du baryum neutre n'apparaît dans le spectre du disque solaire. Cependant, suivant A. D. THACKERAY (59), la raie ultime de Ba I (1S-2P), mesurée par G. R. HARRISON (60) à $\lambda 5535,484 \text{ Å}$, identifierait la raie solaire $\lambda 5535,566$ d'intensité 0. L'examen du schéma des niveaux du baryum neutre (†) montre que les autres raies les plus intenses se trouvent à $\lambda 15000,4 \text{ Å}$ (3D-2P) et dans les régions 2,5 μ et 3 μ (passages 3³D-2³P). L'identification de ces raies dans le spectre solaire permettrait de confirmer celle de THACKERAY.

La raie $\lambda 15207,7 \text{ Å}$ pourrait correspondre à une raie du cobalt $\lambda 15209,0 \text{ Å} \pm 2$ (††) et la raie $\lambda 15217,5 \text{ Å}$, à une raie du manganèse $\lambda 15218,0 \text{ Å} \pm 2$ (††). Notons que les raies les plus intenses du cobalt, du manganèse et du fer comprises entre 13440 et 15293 Å sont masquées par des raies atmosphériques. Il en est de même des principales raies de Mg, C, N, K, Cr, Ni et Zn.

§ 2. Raies d'origine tellurique.

SPECTRE DE LA VAPEUR D'EAU DE 13440 À 15070 Å.

Dans la région spectrale comprise entre 13440 et 15293 Å il existe une bande faible de CO₂ à 1,43 μ et une bande intense de vapeur d'eau à 1,38 μ (§).

a) REMARQUE CONCERNANT LA BANDE DE CO₂ À 1,43 μ . — La bande 3 ν_3 de CO₂ a été observée à grande dispersion en laboratoire par E. F. BARKER et TA YOU

(*) Mesures de RANDALL et BARKER (56, 57) exprimées en angströms internationaux.

(**) Mesure de H. M. RANDALL (58) exprimée en angströms internationaux.

(†) Cf., par exemple, GROTRIAN (61), vol. II, p. 69.

(††) Mesures de RANDALL et BARKER (56) exprimées en angströms internationaux.

(§) Au cours de l'impression, nous avons pu prendre connaissance d'une publication de T. G. COWLING (*Nature*, 152, 694, 1943) signalant que l'absorption observée, à petite

Wu (62) en utilisant un tube de 7 m. de long rempli de CO₂ à la concentration de 80 %. Le réseau utilisé (4800 traits par pouce) n'a pas permis d'obtenir la structure fine de cette bande. Celle-ci apparaît comme un doublet et a son centre à 6978 cm⁻¹ (1,43 μ). Elle s'étend sur environ 60 cm⁻¹ de chaque côté de ce nombre d'onde.

L'installation, que nous avons employée, a un pouvoir de résolution du même ordre de grandeur que celle de E. F. BARKER et TA YOU WU. Aucune structure fine due à CO₂ ne peut donc être observée sur nos enregistrements vers 1,4 μ.

b) TENTATIVE D'IDENTIFICATION BASÉE SUR LES RÉSULTATS DE E. K. PLYLER. — On peut normalement supposer qu'une grande partie des raies observées dans le spectre solaire proviennent de la structure fine de la bande de vapeur d'eau située à 1,38 μ. A notre connaissance, la plus récente étude au sujet de cette structure date de 1932. En utilisant le spectromètre de MEYER (*), muni d'un réseau à 590,5 traits par millimètre (15000 traits/pouce), E. K. PLYLER (63) parvint alors à déceler 45 raies dues à la vapeur d'eau entre 13440 et 14240 Å. Un filament de NERNST était utilisé comme source de radiations. La longueur du trajet des rayons dans le milieu absorbant (atmosphère du laboratoire) s'élevait à 6 m., la pression de vapeur d'eau dans l'air atteignant au maximum 2 centimètres.

Le diagramme de PLYLER est reproduit figure 21. Les nombres d'onde ont été portés en abscisses et les déviations galvanométriques en ordonnées. Les raies d'absorption correspondent donc aux minima des courbes. Les longueurs d'onde des raies numérotées de 1 à 45 sont données dans le tableau VII. PLYLER ne mentionne pas explicitement les erreurs de mesure, mais il signale que les longueurs d'onde données résultent de la moyenne des mesures effectuées sur deux courbes différentes. Pour chaque raie, les différences ne dépassent jamais deux angströms.

Nous avons tout d'abord essayé d'interpréter nos observations en nous basant sur les résultats de PLYLER. De 13460 à 13530 Å, six raies sur quatorze peuvent être identifiées. A partir de 13530 Å jusqu'à 14088 Å (régions 1 à 5), le spectre solaire est caractérisé par quelques raies larges, qui s'interprètent aussi d'une

dispersion, vers 1,47 μ dans le spectre de la vapeur d'eau est due à la bande (0, 2, 1). Une partie de la structure fine révélée par nos enregistrements peut sans doute être attribuée à cette bande.

Depuis 1940, de nouvelles recherches, tant expérimentales que théoriques, ont été entreprises aux États-Unis sur le spectre d'absorption de la vapeur d'eau (H. H. NIELSEN, *Phys. Rev.*, 55, 346 A, 1940; 59, 565, 1941; 62, 422, 1942). Les événements internationaux ne nous ont pas encore permis de prendre connaissance des résultats obtenus.

(*) Cf. première partie : Bibliographie, (25) et (26).

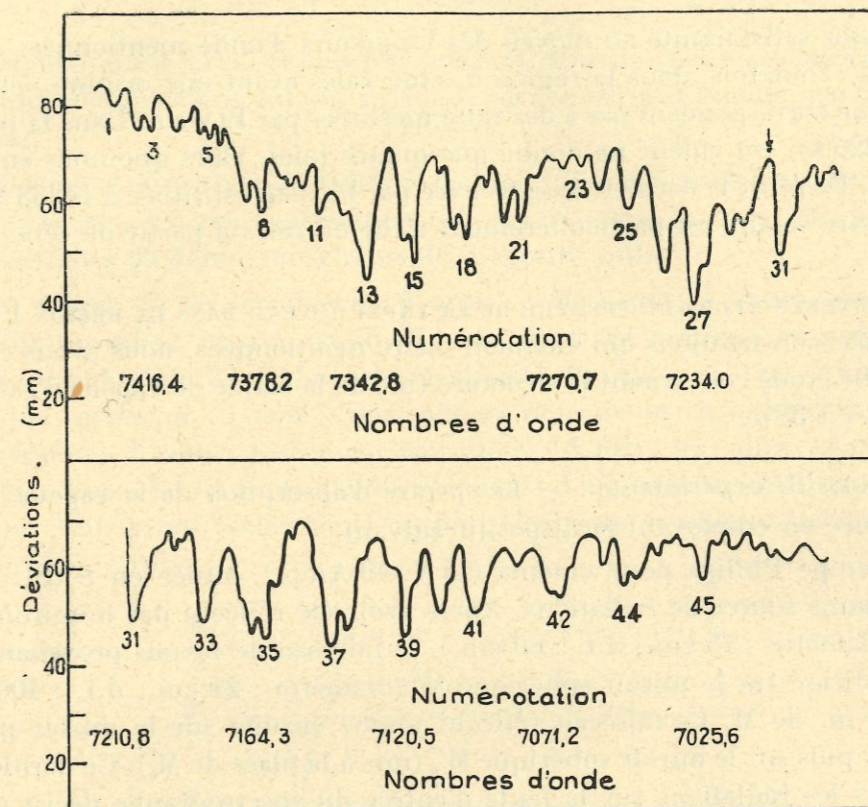


FIG. 21. — Spectre d'absorption de la vapeur d'eau. Région 1,4 μ. Diagramme de E. K. PLYLER (63). Largeur de fente effective : 3 Å.

TABLEAU VII.
Spectre d'absorption de la vapeur d'eau. Mesures de PLYLER (63).

Nos des raies	λ en Å. I	Nos des raies	λ en Å. I	Nos des raies	λ en Å. I	Nos des raies	λ en Å. I
1	13461	13	13619	25	13783	37	14001
2	13474	14	13643	26	13803	38	14008
3	13484	15	13649	27	13824	39	14044*
4	13499	16	13664	28	13833	40	14069
5	13519	17	13673	29	13846	41	14093
6	13526	18	13682	30	13853	42	14142
7	13545	19	13693	31	13878*	43	14171
8	13554	20	13704	32	13901	44	14189
9	13572	21	13717	33	13920	45	14233
10	13583	22	13743	34	13950		
11	13590	23	13754	35	13959		
12	13603	24	13767	36	13968		

(*) Cf. remarque p. 97.

manière assez satisfaisante au moyen des longueurs d'onde mentionnées dans le tableau VII. Toutefois, dans la région 5, cinq raies ayant une origine nettement tellurique ne correspondent pas à des raies mesurées par PLYLER. Dans la région 6 (14074-14220 Å), cet auteur ne donne que quatre raies, alors que nous en observons vingt. De plus, la dernière raie trouvée par PLYLER est située à 14233 Å, alors que le spectre solaire est particulièrement riche en raies à partir de cette limite.

c) NOUVELLE ÉTUDE DU SPECTRE DE LA VAPEUR D'EAU DANS LA RÉGION 1,4 μ . — A la suite des constatations qui viennent d'être mentionnées, nous avons effectué une nouvelle étude concernant la structure fine de la bande de vapeur d'eau ayant son centre à 1,38 μ .

a) Dispositif expérimental. — Le spectre d'absorption de la vapeur d'eau a été enregistré en employant le dispositif suivant.

Une lampe Philips pour cinéma (15 V.-49 Amp.), située en S (Pl. 8), est utilisée comme source de radiations. Après avoir été réfléchi par le miroir sphérique M (diamètre : 15 cm., d.f. : 80 cm.), le faisceau de rayons provenant de la lampe est dirigé sur le miroir sphérique M' (diamètre : 24 cm., d.f. : 400 cm.), placé à 20 m. de M. Le faisceau réfléchi tombe ensuite sur le miroir plan M_a (Pl. 8 et 9), puis sur le miroir sphérique M'' (mis à la place de M_b). Ce dernier concentre alors les radiations sur la fente d'entrée du spectrographe décrit dans la première partie de ce mémoire. La longueur du trajet des rayons lumineux issus de S et tombant sur la pile thermo-électrique T s'élève à environ 38 m. Avant d'atteindre la fente F₁, ces rayons ont parcouru 28 m.

Le spectrographe est muni du réseau à 576 traits par millimètre (surface gravée : 75 x 50 mm.). Un miroir plan est employé à la place du prisme. Pour éliminer les radiations susceptibles de perturber le spectre dans le premier ordre de la région comprise entre 1,34 μ et 1,50 μ , un filtre, signalé par PFUND (64), est placé contre la fente F₁. Ce filtre s'obtient très facilement en dissolvant de l'iode dans du tétrachlorure de carbone. Sa courbe de transmission est reproduite figure 22. Celle-ci permet de constater que la solution laisse passer environ 90 % des radiations de 1,34 μ à 1,50 μ , mais qu'elle absorbe plus de 90 % de celles qui sont comprises entre 0,67 μ et 0,75 μ . Dans notre cas, la solution est contenue dans une cuvette en quartz à faces parallèles, ayant une épaisseur de 10 mm. Nous avons constaté expérimentalement que les radiations de 0,67 μ à 0,75 μ dans le deuxième ordre ne pouvaient perturber le spectre à enregistrer. Alors que l'emploi du prisme en NaCl occasionne une perte de 30 % dans la région 1,4 μ , l'utilisation du filtre réduit celle-ci à 10 %.

Pour obtenir une déviation suffisamment grande du spot lumineux sur le cylindre enregistreur, tout en utilisant des fentes F₂ et F₃ aussi fines que celles employées lors de l'étude du spectre solaire, nous avons dû remplacer les deux galvanomètres « micro » par des galvanomètres « Moll original ». La sensibilité

de l'installation est alors six fois plus grande, mais le spot n'est plus aussi stable et, malgré toutes les précautions prises, la dérive est plus grande que dans le premier cas.

Un tube d'absorption de 6,40 m. de long (diamètre intérieur, 20 cm.; épaisseur des parois, 1,5 cm.) est placé en T_u (Pl. 8) dans le trajet des rayons issus de S. La figure 23 donne un schéma du dispositif utilisé.

Un disque en fer (épaisseur : 5 mm.) a été soudé, à l'autogène, à chaque extrémité du tube. Un trou de 15 x 15 cm. avait été pratiqué au préalable dans chaque disque (fig. 23 a). Le tube a ensuite été entouré d'une mince couche d'amiante (épaisseur : 1 mm.). Sur celle-ci, nous avons enroulé 220 m. de fil de fer (diamètre, 1 mm.; résistance par mètre, 0,1 Ω), les spires étant distantes d'environ 2 cm. Le fil a ensuite été recouvert d'une couche de 3 cm. de mousse de verre. Nous avons réalisé ainsi un four électrique permettant d'atteindre 100° à l'intérieur du tube.

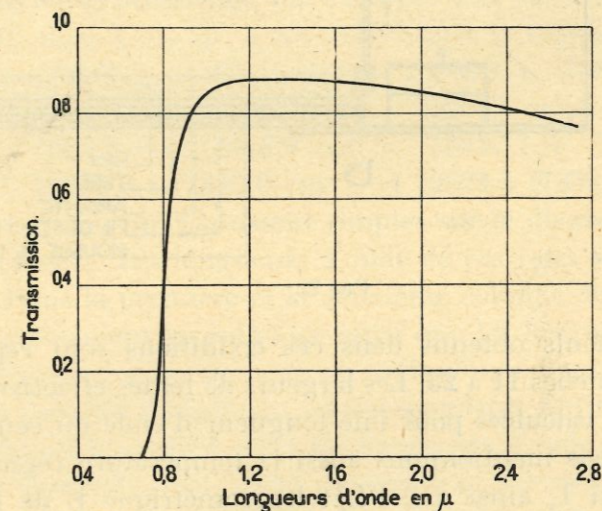


FIG. 22. — Courbe de transmission du filtre utilisé.
(Iode dans tétrachlorure de carbone.)

Après avoir placé ce tube en T_u, nous y avons introduit de l'eau, sous une épaisseur maximum d'environ 5 cm. Des fenêtres en verre (dimensions : 16 x 16 cm., épaisseur : 1 mm.) ont ensuite été fixées en f (fig. 23 a et b), à l'aide de cadres métalliques vissés sur les disques. Des joints en feutre, placés entre le verre et le métal, rendaient la fermeture suffisamment étanche à la vapeur d'eau. Pour que celle-ci ne se condense pas sur les fenêtres f, ces dernières ont été chauffées extérieurement au moyen de réchauds électriques placés en r, à l'intérieur de tubes en tôle de 40 cm. de longueur. Deux ouvertures pratiquées vers le milieu du tube ont permis l'introduction d'un thermomètre et la mise en place d'une soupape de sûreté.

β) Résultats. — Grâce à l'installation qui vient d'être décrite, nous avons découvert 162 raies dans la région spectrale où PLYLER en avait trouvé 45. De plus, nous sommes parvenu à étendre le domaine d'expérimentation, ce qui nous a permis de repérer entre 13440 et 15070 Å, 300 raies dues à la vapeur d'eau.

L'intervalle spectral considéré a été divisé en treize régions, couvrant chacune environ 150 Å. Dans chaque région, le spectre a été enregistré lorsque le tube d'absorption était à la température du laboratoire (environ 20°), puis lorsque ce tube était porté à une température supérieure à 20°.

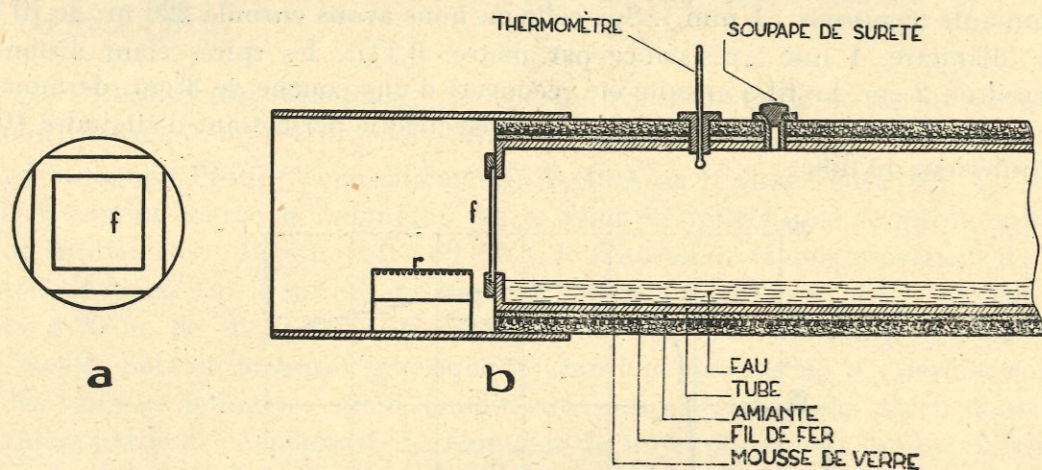


FIG. 23.

Les enregistrements obtenus dans ces conditions sont reproduits sur les figures b et c des planches 11 à 23. Les largeurs de fentes effectives, données pour chaque courbe, sont calculées pour une longueur d'onde du centre de la région spectrale étudiée. Nous mentionnons aussi la température régnant à l'intérieur du tube d'absorption T_u ainsi que l'état hygrométrique E de l'atmosphère du laboratoire. Dans chaque région, une échelle divisée en cm^{-1} permet de repérer facilement les positions approximatives des raies. Celles-ci correspondent aux minima des courbes. Les lignes-zéro peuvent être tracées en joignant les traits qui encadrent les positions « zéro » du spot, positions photographiées au cours de chaque enregistrement. Dans tous les cas, la dérive est suffisamment réduite pour ne pas influencer les mesures de longueurs d'onde; toutefois, elle crée une certaine imprécision concernant les mesures d'intensité.

Par suite de la grande sensibilité du dispositif récepteur, les inductions électro-magnétiques déforment parfois les raies observées. En vue de déceler ces perturbations et d'augmenter la précision des mesures, chaque spectre a été enregistré au moins deux fois dans les mêmes conditions expérimentales. Soulignons aussi que l'épaisseur du trait des enregistrements est due principalement aux vibrations du miroir du premier galvanomètre, celui-ci étant influencé par le mouvement brownien et par les vibrations microsismiques.

Sur chacune des planches 11 à 23, la comparaison des enregistrements b et c permet de constater nettement une augmentation d'intensité et un élargissement de toutes les raies observées, en passant de la courbe b (basse température) à la courbe c (haute température). On peut donc en conclure que les nouvelles raies décelées proviennent bien de la vapeur d'eau. L'emploi du tube chauffé à une température supérieure à 20° donne aussi la possibilité de trouver de nombreuses raies qui n'apparaissent pas, dans nos conditions expérimentales, à la température ordinaire du laboratoire.

Les longueurs d'onde des 300 raies mesurées ainsi que leurs nombres d'onde sont donnés respectivement dans la 6^e et la 8^e colonne du tableau V. Pour déterminer la constante K de l'instrument, nous avons utilisé la raie $\lambda 10139,8 \text{ \AA}$ de HgI. L'erreur quadratique moyenne pour les raies bien nettes est de l'ordre de $\pm 0,7 \text{ \AA}$ ou de $\pm 0,4 \text{ cm}^{-1}$.

Très souvent une seule raie notée par E. K. PLYLER se rapporte à un groupe de raies sur nos enregistrements. Par exemple, à la place de la raie n° 7, $\lambda 13545 \text{ \AA}$ du tableau VII, nous trouvons quatre raies dans la région 1, situées à $13539,6 \text{ \AA}$ ($7383,8 \text{ cm}^{-1}$), 13544 \AA ($7381,4 \text{ cm}^{-1}$), $13546,1 \text{ \AA}$ ($7380,2 \text{ cm}^{-1}$) et 13549 \AA ($7378,6 \text{ cm}^{-1}$). A la place de la raie n° 13, $\lambda 13619 \text{ \AA}$, nous observons cinq raies de la région 2 : $13613,7 \text{ \AA}$ ($7343,6 \text{ cm}^{-1}$), $13617,1 \text{ \AA}$ ($7341,8 \text{ cm}^{-1}$), 13619 \AA ($7340,7 \text{ cm}^{-1}$), $13620,3 \text{ \AA}$ ($7340,0 \text{ cm}^{-1}$) et 13624 \AA ($7338,0 \text{ cm}^{-1}$). Toutefois, on peut repérer des raies qui paraissent simples sur le diagramme de PLYLER et sur nos enregistrements. Les longueurs d'onde de ces raies sont reproduites dans le tableau VIII. Dans la première et la deuxième colonne de ce tableau, nous mentionnons respectivement les numéros ainsi que les longueurs d'onde de PLYLER. Dans la troisième colonne, nous avons indiqué nos longueurs d'onde et dans la quatrième, les nombres d'onde qui y correspondent. Enfin, la cinquième colonne donne les différences existant entre les longueurs d'onde de PLYLER et celles que nous avons déterminées. Vu l'ordre de grandeur des erreurs de mesure, l'accord peut être considéré comme satisfaisant. Toutefois, les différences mettent en évidence une faible erreur systématique entre les deux déterminations : dans la plupart des cas, les valeurs de PLYLER sont plus petites que les nôtres.

Remarque au sujet des raies n°s 31 et 39. — Concernant celles-ci, PLYLER donne :

Raie n° 31	$\lambda = 13868 \text{ \AA}$	inverse : $7210,8 \text{ cm}^{-1}$
Raie n° 39	$\lambda = 14053 \text{ \AA}$	inverse : $7120,5 \text{ cm}^{-1}$

Dans ces deux cas seulement, les mesures de cet auteur ne correspondent pas à une raie intense ou à un groupe de raies sur nos courbes.

Notons que l'inverse de 7120,5 n'est pas 14053 mais 14043,9. Sur la planche 15, b et c, un groupe de quatre raies se rapporte à cette dernière détermination. Ces raies se situent à : $14037,1 \text{ \AA}$ ($7122,0 \text{ cm}^{-1}$), $14040,6 \text{ \AA}$ ($7120,3 \text{ cm}^{-1}$), $14046,1 \text{ \AA}$ ($7117,5 \text{ cm}^{-1}$) et 14050 \AA ($7115,5 \text{ cm}^{-1}$).

TABLEAU VIII

Comparaison entre les mesures de E. K. PLYLER et celles de l'auteur pour les raies qui paraissent simples dans les deux cas.

Numération de Plyler	λ de Plyler	λ de l'auteur	ν de l'auteur	$\Delta \lambda$ Plyler - auteur
1	13461	13461,6	7426,5	- 0,6
2	13474	13474,0	7419,7	0
4	13499	13499,8	7405,5	- 0,8
6	13526	13527,8	7390,2	- 1,8
8	13554	13554,9	7375,4	- 0,9
14	13643	13642,8	7327,9	+ 0,2
15	13649	13651,2	7323,4	- 2,2
16	13664	13665,3	7315,8	- 1,3
18	13682	13682,5	7306,6	- 0,5
19	13693	13696,0	7299,4	- 3
21	13717	13718,2	7287,6	- 1,2
23	13754	13755,4	7267,9	- 1,4
25	13783	13783,4	7253,1	- 0,4
26	13803	13803,1	7242,8	- 0,1
27	13824	13823,6	7232,1	+ 0,4
29	13846	13846,4	7220,2	- 0,4
30	13853	13854,9	7215,7	- 1,9
35	13959	13960,9	7161,0	- 1,9
36	13968	13968,2	7157,2	- 0,2
38	14008	14011,1	7135,3	- 3,1
43	14171	14172,2	7054,2	- 1,2

D'autre part, en indiquant 13878 Å au lieu de 13868 Å pour la raie 31, celle-ci correspond alors à deux raies intenses sur nos enregistrements, planche 14, *b* et *c*. Il s'agit des raies λ 13875,6 Å (7205,0 cm⁻¹) et λ 13878,8 Å (7203,3 cm⁻¹).

Ces constatations justifient les changements que nous avons apportés dans le tableau VII.

Notre dispositif expérimental permet aussi de déceler une structure fine dans le domaine de longueurs d'onde inférieures à 13440 Å, mais, comme celui-ci est accessible à la photographie, nous n'avons pas pris d'enregistrement dans cette région spectrale.

d) IDENTIFICATION DES RAIES OBSERVÉES DANS LE SPECTRE SOLAIRE EN UTILISANT NOS RÉSULTATS SUR LE SPECTRE DE LA VAPEUR D'EAU.

La nouvelle étude du spectre de la vapeur d'eau nous a permis d'interpréter 80 % des raies observées dans le spectre solaire entre 13440 Å et 15070 Å.

Pour chacune des treize régions étudiées, les enregistrements relatifs à la vapeur d'eau ont été placés au-dessous de ceux qui se rapportent au soleil. Une simple comparaison des courbes permet d'identifier de nombreuses raies. Ces identifications sont d'ailleurs confirmées par les mesures données dans le tableau V. Quand une raie du spectre solaire se rapporte à une raie bien déterminée de vapeur d'eau, la différence de longueurs d'onde est indiquée dans la huitième colonne du même tableau.

La comparaison des spectres du soleil et de la vapeur d'eau permet de faire les remarques suivantes :

Région 1 (Pl. 11). — Dans la région 1, seules les quatre raies les moins intenses ne sont pas interprétées.

Région 2 (Pl. 12). — Alors que le spectre solaire ne permet de déceler aucune raie dans cette région par suite de la forte absorption due à l'atmosphère terrestre, les expériences de laboratoire donnent la possibilité d'y trouver 36 raies provenant de la vapeur d'eau.

Régions 3, 4, 5 (Pl. 13, 14, 15). — Dans le spectre solaire, ces régions sont caractérisées par des raies très larges, dues à des groupes de raies de vapeur d'eau. Dans la région 5, les cinq raies, qui ne pouvaient s'interpréter en utilisant les résultats de PLYLER, sont aussi attribuables à la vapeur d'eau.

Région 6 (Pl. 16). — Alors que PLYLER ne mentionne que quatre raies dans cette région, nous en décelons 33. Celles-ci permettent d'interpréter 19 raies sur les 20 observées dans le spectre solaire. La seule raie non interprétée λ 14127,7 Å (7076,4 cm⁻¹) n'apparaît pas nettement sur les enregistrements reproduits planche 16, mais elle se marque mieux sur les courbes obtenues le 19 février 1943.

Régions 7 à 14 (Pl. 17 à 24). — C'est au début de la région 7 que se situe la dernière raie mentionnée par PLYLER (raie n° 45, λ 14233 Å). Au delà de cette limite, nos expériences nous ont permis de mettre encore en évidence 138 raies dues à la vapeur d'eau. En général, celles-ci sont plus larges que les raies qui y correspondent dans le spectre solaire. D'autre part, à partir de la région 9, nous observons plus de raies dans le spectre solaire que dans celui de la vapeur d'eau. Pour la région 12, par exemple, nous comptons 32 raies dans le premier et 12 dans le second. Pour la région 13, nous n'obtenons que quatre raies en laboratoire alors que le spectre solaire en comporte 34. Un enregistrement, pris en laboratoire dans la région 14, n'accuse aucune raie de vapeur d'eau tandis que nous observons 17 raies dans le spectre solaire.

De nombreuses raies de vapeur d'eau seront sans doute encore décelées en augmentant la longueur et la température du tube d'absorption. Nous nous proposons de poursuivre nos expériences à ce sujet dès que les circonstances le permettront.

En général, en passant d'une raie à la suivante, nous trouvons une répartition semblable des intensités dans le spectre du soleil et dans celui de la vapeur d'eau. Deux cas seulement font nettement exception à cette constatation.

Région 1. — Dans le spectre de la vapeur d'eau, les raies $7432,1 \text{ cm}^{-1}$ et $7429,7 \text{ cm}^{-1}$ ont à peu près la même intensité, tandis que dans le spectre solaire, la première raie est nettement plus intense que la seconde.

Région 9. — Dans le spectre de la vapeur d'eau, la raie $6861,8 \text{ cm}^{-1}$ est plus intense que la raie $6863,7 \text{ cm}^{-1}$, tandis que l'inverse se produit pour les raies correspondantes du spectre solaire.

Pour interpréter les renforcements d'intensité observés dans le spectre solaire pour les raies $7432,2 \text{ cm}^{-1}$ ($13451,3 \text{ \AA}$) et $6863,5 \text{ cm}^{-1}$ ($14566,0 \text{ \AA}$), on peut supposer que des raies atomiques se superposent à celles de la vapeur d'eau. Toutefois, jusqu'à présent aucune raie atomique ne correspond à ces longueurs d'onde dans les limites des erreurs de mesure.

Il est intéressant de remarquer que, dans la région étudiée, les observations sur le spectre solaire et les résultats obtenus en laboratoire se complètent pour apporter une contribution à l'étude de la structure fine de la bande de vapeur d'eau ayant son centre à $1,38 \mu$ (*). En effet, vers le centre de cette bande, dans la région fortement absorbée par l'atmosphère terrestre, les expériences de laboratoire permettent de déceler une structure très compliquée, tandis que dans l'aile de la bande, du côté des grandes longueurs d'onde, ce sont les observations solaires qui donnent le plus de détails.

Dès 1933, M. MECKE (65) est parvenu à classer 25 des raies mentionnées par PLYLER. Il y a donc tout lieu d'espérer qu'actuellement la bande à $1,38 \mu$ est suffisamment résolue pour permettre une interprétation théorique des nouvelles raies, à partir du modèle adopté pour la molécule d'eau. Cette étude est particulièrement difficile, car, d'une part, la bande en question résulte d'une intercombinaison (1, 1, 0) et, d'autre part, les interactions entre la vibration et la rotation sont encore très mal connues dans le cas du rotateur asymétrique. Toutefois, malgré la complexité du problème, la dernière publication de D. M. DENNISON (66) dont nous avons eu connaissance permettait d'espérer une interprétation théorique des structures compliquées, observées dans le spectre de vibration-rotation de la vapeur d'eau (*).

(*) Cf. note (§) page 91.

RÉSUMÉ

Nous avons fait construire et mis au point un spectrographe prisme-réseau, auto-enregistreur, permettant d'étudier rapidement et à grande dispersion le spectre infra-rouge de 1 à 25μ .

L'appareil a été conçu non seulement pour effectuer des recherches en astrophysique mais aussi en vue d'entreprendre des travaux de laboratoire sur les structures atomiques et moléculaires.

Le nouvel instrument a tout d'abord été appliqué à l'étude du spectre solaire. Le tableau V donne les longueurs d'onde des 284 nouvelles raies observées entre 13440 et 15293 Å. Le problème de leur identification nous a conduit à reprendre l'étude du spectre d'absorption de la vapeur d'eau dans la région $1,4 \mu$. L'installation utilisée nous a permis de découvrir entre 13440 et 15070 Å, 300 raies dues à la molécule H_2O . Les observations solaires et les expériences de laboratoire se complètent et apportent des résultats originaux relatifs à la structure fine de la bande de vapeur d'eau (1, 1, 0).

Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège.

Le 17 mai 1945.



BIBLIOGRAPHIE

PREMIERE PARTIE

1. S. KYROPOULOS, ZS. f. anorg. Chem., **154**, 308, 1926.
2. K. KORTH, ZS. f. Phys., **84**, 677, 1933.
3. D. C. STOCKBARGER, Rev. Scient. Instr., **7**, 133, 1936.
4. J. STRONG, Phys. Rev., **36**, 1663, 1930.
5. R. W. WOOD, Phil. Mag., **20**, 770, 1910.
6. A. TROWBRIDGE et R. W. WOOD, Phil. Mag., **20**, 886 et 898, 1910.
7. H. M. RANDALL, Science, **65**, 167, 1927.
8. H. M. RANDALL, Rev. Modern Phys., **10**, 72, 1938.
9. H. M. RANDALL et F. A. FIRESTONE, Rev. Scient. Instr., **9**, 404, 1938.
10. J. STRONG, Phys. Rev., **37**, 1661, 1931.
11. M. CZERNY et P. MOLLET, ZS. f. Phys., **108**, 85, 1937.
12. M. CZERNY et P. MOLLET, ZS. f. techn. Phys., **18**, 582, 1937.
13. MOLL, Diss. Utrecht, 1907.
14. O. REINKOBER, ZS. f. techn. Phys., **10**, 263, 1929.
15. S. FAHRENTOLZ, ZS. f. techn. Phys., **17**, 67, 1936.
16. H. GERSHINOVITZ et E. B. WILSON, Journ. Chem. Phys., **6**, 197, 1938.
16. A. BAYLE, Rev. d'Optique, **15**, 231, 1936.
17. S. P. LANGLEY, Ann. of the Smithsonian Inst., vol. I, 1900.
18. F. PASCHEN, Ann. d. Phys., **27**, 537, 1908.
19. Id., Ibid., **29**, 625, 1909.
20. Id., Ibid., **33**, 717, 1910.
21. H. M. RANDALL, Ann. d. Phys., **33**, 739, 1910.
22. A. TROWBRIDGE, Phil. Mag., **20**, 768, 1910.
23. W. W. SLEATOR, Astrophys. Journ., **48**, 125, 1918.
24. C. P. SNOW et A. M. TAYLOR, Proc. Roy. Soc. London, A, **124**, 442, 1929.
25. A. LEVIN et C. F. MEYER, Journ. Opt. Soc. Amer., **16**, 137, 1928.
26. E. F. BARKER et C. F. MEYER, Trans. Faraday Soc., **25**, 912, 1929.
27. ANGSTRÖM et PALMAER, Öfversigt af Kongl. Vet. Akad. Förch., p. 389, 1893.
28. W. BURMEISTER, Verh. d. D. Phys. Ges., **15**, 589, 1913.
29. E. v. BAHR, Verh. d. D. Phys. Ges., **15**, 1150, 1913.
30. J. B. BRINSMADE et E. C. KEMBLE, Proc. Nat. Acad. Amer., **3**, 420, 1917.
31. E. S. IMES, Astrophys. Journ., **50**, 251, 1919.
32. H. M. RANDALL et E. S. IMES, Phys. Rev., **15**, 152, 1920.
33. C. F. MEYER et A. LEVIN, Phys. Rev., **34**, 44, 1929.
34. A. H. NIELSEN et H. H. NIELSEN, Phys. Rev., **47**, 585, 1935.
35. W. B. STEWARD et H. H. NIELSEN, Phys. Rev., **48**, 828, 1935.
36. R. B. BARNES et A. H. PFUND, Bull. Am. Phys. Soc., **5**, 2, 1930; Phys. Rev., **35**, 1434, 1930.
37. R. B. BARNES, Phys. Rev., **36**, 2162, 1931.
38. A. H. PFUND, Journ. Opt. Soc. Amer., **14**, 337, 1927.
39. J. D. HARDY, Phys. Rev., **38**, 2162, 1931.
40. G. K. T. CONN, E. LEE et G. B. B. M. SUTHERLAND, Proc. Roy. Soc. London A., **176**, 484, 1940.

41. A. ADEL, Phys. Rev., **59**, 915 A, 1941.
42. M. CZERNY et A. F. TURNER, ZS. f. Phys., **61**, 792, 1930.
43. M. CZERNY et W. PLETING, ZS. f. Phys., **63**, 590, 1930.
44. R. B. BARNES, Phys. Rev., **35**, 1524, 1930.
45. G. HETTNER et J. BÖHME, ZS. f. Phys., **72**, 95, 1931.
46. A. B. D. CASSIE et C. R. BAILEY, Proc. Roy. Soc. London, A, **138**, 531, 1932.
47. M. DÜHMKE, Phys. ZS., **43**, 33, 1942.
48. A. ADEL, Astrophys. Journ., **84**, 354, 1936.
49. F. A. FIRESTONE, Rev. Scient. Instr., **3**, 163, 1932.
50. E. K. PLYLER et W. W. SLEATOR, Phys. Rev., **37**, 1493, 1931.
51. J. STRONG, Rev. Scient. Instr., **2**, 585, 1931.
52. M. CZERNY et H. RÖDER, Erg. der Ex. Naturwissenschaften, **17**, 70, 1938.
53. LANDOLT BORSTEIN, Physikalisch-chemische Tabellen, **5**, Auflage II, p. 913.
54. E. GUNDELACH, ZS. f. Phys., **66**, 775, 1930.
55. K. KORTH, ZS. f. Phys., **84**, 677, 1933.
56. D. H. FOLLETT, Nature, **135**, 187, 1935.
57. G. ISING, Phil. Mag., **1**, 827, 1926; Ann. d. Phys., **8**, 905 et 911, 1931.
58. W. H. JULIUS, Wied Ann., **56**, 151, 1895; ZS. f. Instrkde, **16**, 267, 1896; Ann. d. Phys., **18**, 206, 1905.
59. R. MÜLLER, Ann. d. Phys., **1**, 613, 1929.
60. P. E. SCHEARIN et E. K. PLYLER, Journ. Opt. Soc. Amer., **28**, 61, 1938.
61. T. VOLK, Wellenlängennormalen im Ultrarot. Dissert. Tübingen, 1914.
62. F. MATOSSI, Erg. der Ex. Naturwissenschaften, **17**, 146, 1938.
63. J. LECOMTE, Cahiers de Physique, n° 17, novembre 1943.

DEUXIEME PARTIE

1. W. DE W. ABNEY, Phil. Trans., **171**, 653, 1880.
2. Id., Ibid., **177**, 457, 1886.
3. W. F. MEGGERS, Astrophys. Journ., **47**, 1, 1918.
4. Id., Publ. of the Alleghany Obs., vol. VI, 1919.
5. K. BURNS, Lick. Obs. Bull. n° 327, 1920.
6. F. S. BRACKETT, Astrophys. Journ., **53**, 121, 1921.
7. H. D. BABCOCK, Astrophys. Journ., **65**, 140, 1927.
8. Id., Nature, **121**, 830, 1928.
9. H. D. BABCOCK et W. P. HOGE, Phys. Rev., **32**, 327, 1928.
10. ST. JOHN, C. E. MOORE, L. M. WARE, E. F. ADAMS, H. D. BABCOCK, Revision of Rowland's Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths. Carnegie Inst. Washington, 1928.
11. H. D. BABCOCK, P.A.S.P., **41**, 274, 1929.
12. H. W. BABCOCK, P.A.S.P., **44**, 323, 1932.
13. H. D. et H. W. BABCOCK, P.A.S.P., **46**, 132, 1934.
14. H. N. RUSSELL, H. D. BABCOCK et C. E. MOORE, Phys. Rev., **46**, 826, 1934.
15. H. D. BABCOCK, C. E. MOORE et C. C. KIESS, Astrophys. Journ., **79**, 59, 1934.
16. C. E. MOORE et H. D. BABCOCK, Astrophys. Journ., **79**, 492, 1934.
17. Id., Id., P.A.A.S., **8**, 120, 1935. (Abstract of the 53rd meeting, décembre 1934.)
18. G. HERZBERG, Nature, **133**, 759, 1934.
19. W. BAUMANN et R. MECKE, Das ultrarote Sonnenspektrum, chez J. A. Barth, Leipzig, 1934.
20. H. D. BABCOCK, P.A.S.P., **46**, 244, 1934.

21. H. W. BABCOCK, P.A.S.P., **47**, 321, 1935.
 22. Id., Ibid., **48**, 206, 1936.
 23. H. D. BABCOCK, C. E. MOORE et W. P. HOGE, *Astrophys. Journ.* **83**, 103, 1936.
 24. C. E. MOORE, *Astrophys. Journ.*, **85**, 79, 1937.
 25. B. EDLEN, Särtryck ur Festskrift Tillägnad Osten Bergstrand, p. 135, 1938.
 26. R. ROOD et R. A. SAWYER, *Astrophys. Journ.*, **87**, 68, 1938.
 27. C. W. ALLEN, *Astrophys. Journ.*, **88**, 125, 1938.
 28. Inst. Ast. Union. — Stockholm Meeting. — Draft Reports, p. 105, 1938.
 29. R. S. RICHARDSON et R. MINKOWSKI, *Astrophys. Journ.*, **89**, 347, 1939.
 30. H. D. BABCOCK et C. E. MOORE, The Mount Wilson-Princeton Infrared Solar Table (en préparation).
 31. M. F. COFFEEN, P.A.S.P., **53**, 232, 1941.
 32. S. P. LANGLEY, *Annals of the Smithsonian Inst.*, vol. I, 1900.
 33. C. G. ABBOT et H. B. FREEMAN, *Smithsonian Misc. Coll.*, **82**, 1, 1929.
 34. H. D. BABCOCK, *The Observatory*, **57**, 261, 1934.
 35. J. W. ELLIS et H. O. KNESER, *ZS. f. Phys.*, **86**, 583, 1933; P.A.S.P., **46**, 106, 1934.
 36. A. ADEL, V. M. SLIPHER et E. F. BARKER, *Phys. Rev.*, **47**, 580, 1935.
 37. A. ADEL et C. O. LAMPLAND, *Astrophys. Journ.*, **87**, 198, 1938; **88**, 182, 1938.
 38. A. ADEL, *Astrophys. Journ.*, **88**, 186 et 200, 1938; **89**, 1 et 320, 1939.
 39. A. ADEL et C. O. LAMPLAND, *Astrophys. Journ.*, **91**, 1 et 481, 1940.
 40. A. ADEL, *Astrophys. Journ.*, **90**, 627, 1939; *Phys. Rev.*, **59**, 944, 1941.
 41. G. B. B. M. SUTHERLAND et G. S. CALLENDAR, *Reports on Progress in Physics*, **9**, 18, 1943.
 42. A. ADEL, *Astrophys. Journ.*, **96**, 239, 1942.
 43. A. ADEL et V. M. SLIPHER, *Astrophys. Journ.*, **84**, 354, 1936.
 44. A. ADEL, V. M. SLIPHER et O. FOUTS, *Phys. Rev.*, **49**, 288, 1936.
 45. A. ADEL, *Phys. Rev.*, **59**, 915, 1941.
 46. Id., *Astrophys. Journ.*, **94**, 451, 1941.
 47. Id., Ibid., **93**, 506, 1941.
 48. Id., Ibid., **93**, 509, 1941.
 49. Id., Ibid., **94**, 375, 1941.
 50. Id., Ibid., **94**, 379, 1941.
 51. Id., Ibid., **94**, 449, 1941.
 51_a. Id., Ibid., **97**, 190, 1943.
 52. W. HARTMAN, *Ast. Abh. der Hamburger St. Band.* 4, n° 1, 1928.
 53. MEGGERS et PETERS, *Sc. Papers of the Bureau of Standards.* Washington, n° 327, 1918.
 54. KÖSTER et LAMPE, *Phys. ZS.*, **35**, 223, 1934.
 55. M. RUSCH, *Ann. d. Phys.*, **70**, 373, 1923; **85**, 581, 1928.
 56. H. M. RANDALL et E. F. BARKER, *Astrophys. Journ.*, **49**, 54, 1919.
 57. Id., Id., Ibid., **49**, 42, 1919.
 58. H. M. RANDALL, *Astrophys. Journ.*, **42**, 195, 1915.
 59. A. D. THACKERAY, *The Observatory*, **63**, 160, 1940.
 60. G. R. HARRISON, M. I. T. *Wavelengths Tables*; John Wiley, New York, 1939.
 61. W. GROTRIAN, *Graphische Darstellung der Spektren*, 1928.
 62. E. F. BARKER et TA-YOU WU, *Phys. Rev.*, **45**, 1, 1934.
 63. E. K. PLYLER, *Phys. Rev.*, **39**, 77, 1932.
 64. A. H. PFUND, *Journ. Opt. Soc. Amer.*, **29**, 56, 1939.
 65. R. MECKE, *ZS. f. Phys.*, **81**, 313, 1933.
 66. D. M. DENNISON, *Astrophys. Journ.*, **89**, 292, 1939.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
AVANT-PROPOS...	3
PREMIÈRE PARTIE.	
SUR LA CONSTRUCTION D'UN SPECTROGRAPHE INFRA-ROUGE, AUTO-ENREGISTREUR, A GRAND POUVOIR DE RÉOLUTION.	
CHAPITRE I. — <i>Quelques particularités de la technique infra-rouge</i> ...	7
§ 1. Moyens de dispersion. ...	7
§ 2. Utilisation de miroirs métallisés ...	9
§ 3. Moyens de détection ...	10
§ 4. Principe technique des spectromètres infra-rouges. Avantages de l'enregistrement automatique ...	10
CHAPITRE II. — <i>Considérations historiques et critiques sur la construction des principaux spectromètres infra-rouges à grand pouvoir de résolution</i> ...	11
CHAPITRE III. — <i>La nouvelle installation pour l'étude de la région spectrale comprise entre 1 et 25 μ</i> ...	18
§ 1. Description générale ...	18
§ 2. L'optique du spectrographe ...	20
a) Le spectrographe à réseau proprement dit ...	20
b) Le miroir elliptique et la pile thermo-électrique ...	21
c) Le monochromateur ...	22
d) Détails concernant les pièces optiques ...	23
§ 3. La construction mécanique ...	24
a) Le support du filament de Nernst ...	24
b) Les supports des miroirs ...	24
c) Le support des tubes d'absorption ...	25
d) Le support et les mouvements de rotation du prisme ...	25
e) Le support et les mouvements de rotation du réseau ...	27
f) Le cylindre enregistreur. ...	28
g) Les boîtes de vitesse principales. ...	29
h) Le support du miroir elliptique et de la pile thermo-électrique ...	30
i) Les fentes ...	30
j) Les cercles gradués et les microscopes de lecture... ..	30
§ 4. La pile thermo-électrique, les galvanomètres et l'amplificateur... ..	31
§ 5. Précautions prises pour l'installation du spectrographe	36
§ 6. Réglage de l'optique... ..	37
a) Réglage du spectrographe à réseau proprement dit	38
b) Réglage du monochromateur et des deux miroirs précédant immédiatement la fente d'entrée	40
c) Réglage du miroir elliptique et de la pile thermo-électrique	41
d) Réglage des grands réseaux à échelottes.. ..	42
e) Réglage des prismes et réalisation expérimentale de la came... ..	42

	Pages.
§ 7. Principe de la mesure d'une longueur d'onde et localisation du « blaze ».	43
§ 8. Étude de l'instrument.	45
a) Les fentes du spectrographe à réseau proprement dit	45
b) Le cercle-réseau	46
c) Correspondance entre la graduation du cercle-réseau et la numérotation du compteur visuel	48
d) Jeu dans les mécanismes	49
e) Choix de la vitesse de rotation du réseau à 576 traits/mm.	50
§ 9. Prise d'un enregistrement — Spectre du soleil de 15141 Å à 15293 Å ...	52
§ 10. Mesure d'un spectrogramme..	56
§ 11. Utilisation du spectrographe dans la région 6 μ	57
§ 12. Les erreurs accidentelles de mesure	57
§ 13. Pouvoir de résolution et largeur de fente effective ...	59
§ 14. Choix du couplage entre le cylindre enregistreur et la deuxième boîte de vitesse..	61
§ 15. Avantages du nouveau spectrographe..	63
§ 16. Quelques applications ...	64

DEUXIEME PARTIE.

ÉTUDE DU SPECTRE DU SOLEIL ET DU SPECTRE D'ABSORPTION DE LA VAPEUR D'EAU DANS LA RÉGION COMPRISE ENTRE 13440 Å ET 15293 Å.

CHAPITRE I. — <i>Importance de l'étude du spectre infra-rouge solaire et principales recherches effectuées à ce sujet</i> ...	67
§ 1. Domaine photographique..	68
§ 2. Domaine de longueurs d'onde plus grandes que 1,35 μ ...	70
CHAPITRE II. — <i>Description de l'installation utilisée et résultats obtenus</i> ...	72
§ 1. Description de l'installation ...	72
§ 2. Résultats de nos observations..	73
§ 3. Comparaison avec les résultats de C. G. ABBOT et H. B. FREEMAN ...	89
§ 4. Comparaison avec les résultats de H. D. BABCOCK et C. E. MOORE ...	89
CHAPITRE III. — <i>Identification des nouvelles raies observées dans le spectre solaire.</i>	90
§ 1. Raies d'origine solaire ...	90
§ 2. Raies d'origine tellurique — Spectre de la vapeur d'eau de 13440 à 15070 Å ...	91
a) Remarque concernant la bande de CO ₂ à 1,43 μ ...	91
b) Tentative d'identification basée sur les résultats de E. K. PLYLER ...	92
c) Nouvelle étude du spectre de la vapeur d'eau dans la région 1,4 μ ...	94
α) Dispositif expérimental..	94
β) Résultats ...	96
d) Identification des raies observées dans le spectre solaire en utilisant nos résultats sur le spectre de la vapeur d'eau ...	99
RÉSUMÉ ...	101
BIBLIOGRAPHIE..	102

TABLE DES PLANCHES

1. Vue d'ensemble du spectrographe.
2. Les dispositifs de commande.
3. Le support du filament de NERNST, les tubes d'absorption et le monochromateur.
4. Un des grands réseaux sur son support.
5. Le support du miroir elliptique et la pile thermo-électrique.
6. Le support du prisme.
7. Le support du réseau.
8. Plan du laboratoire.
9. Plan du spectrographe (projection horizontale).
10. Le coelostat.

	Région	Spectre du soleil Courbes a.	Spectre de la vapeur d'eau Courbes b et c.
11	1	13440 Å - 13593 Å	13440 Å - 13593 Å
12	2	-	13578 - 13730
13	3	13694 - 13842	13694 - 13842
14	4	13835 - 13978	13835 - 13978
15	5	13944 - 14088	13946 - 14088
16	6	14074 - 14220	14074 - 14226
17	7	14200 - 14351	14200 - 14351
18	8	14335 - 14486	14335 - 14486
19	9	14471 - 14622	14471 - 14621
20	10	14605 - 14755	14607 - 14757
21	11	14738 - 14888	14739 - 14889
22	12	14874 - 15023	14873 - 15022
23	13	15007 - 10156	15007 - 15156
24	14	15141 - 15293	-
25	1	13440 - 13593	-

26. Spectre du soleil de 13400 à 15293 Å.
Bologrammes de C. G. ABBOT et H. B. FREEMAN.



PLANCHES

Les photographies reproduites planches 1 à 5
et planche 10 ont été prises par
G. JACOBY,
Spécialiste en Photos Industrielles,
Rue de Sclessin, 16,
Liège.

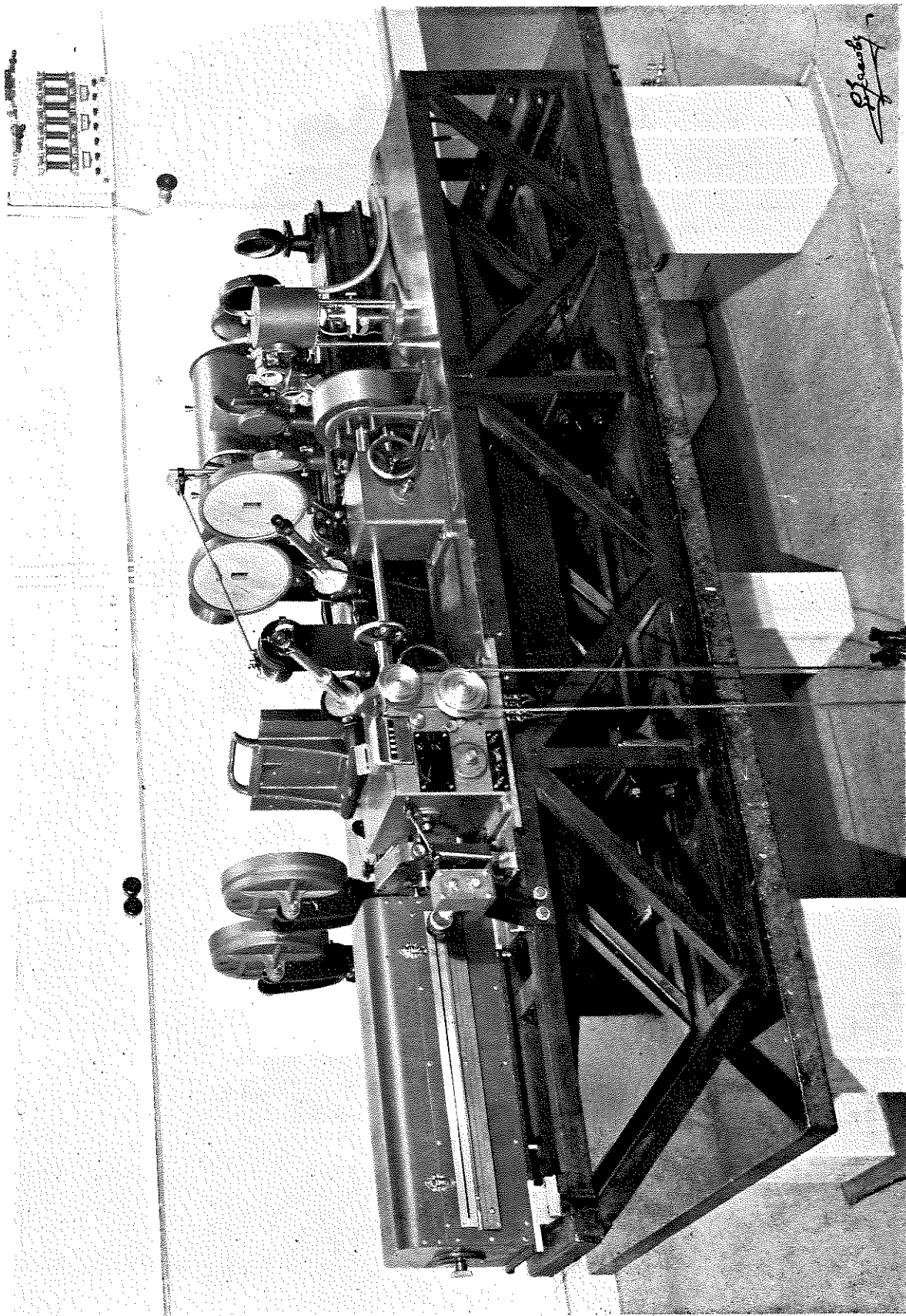


PLANCHE I

Vue d'ensemble du spectrographe.

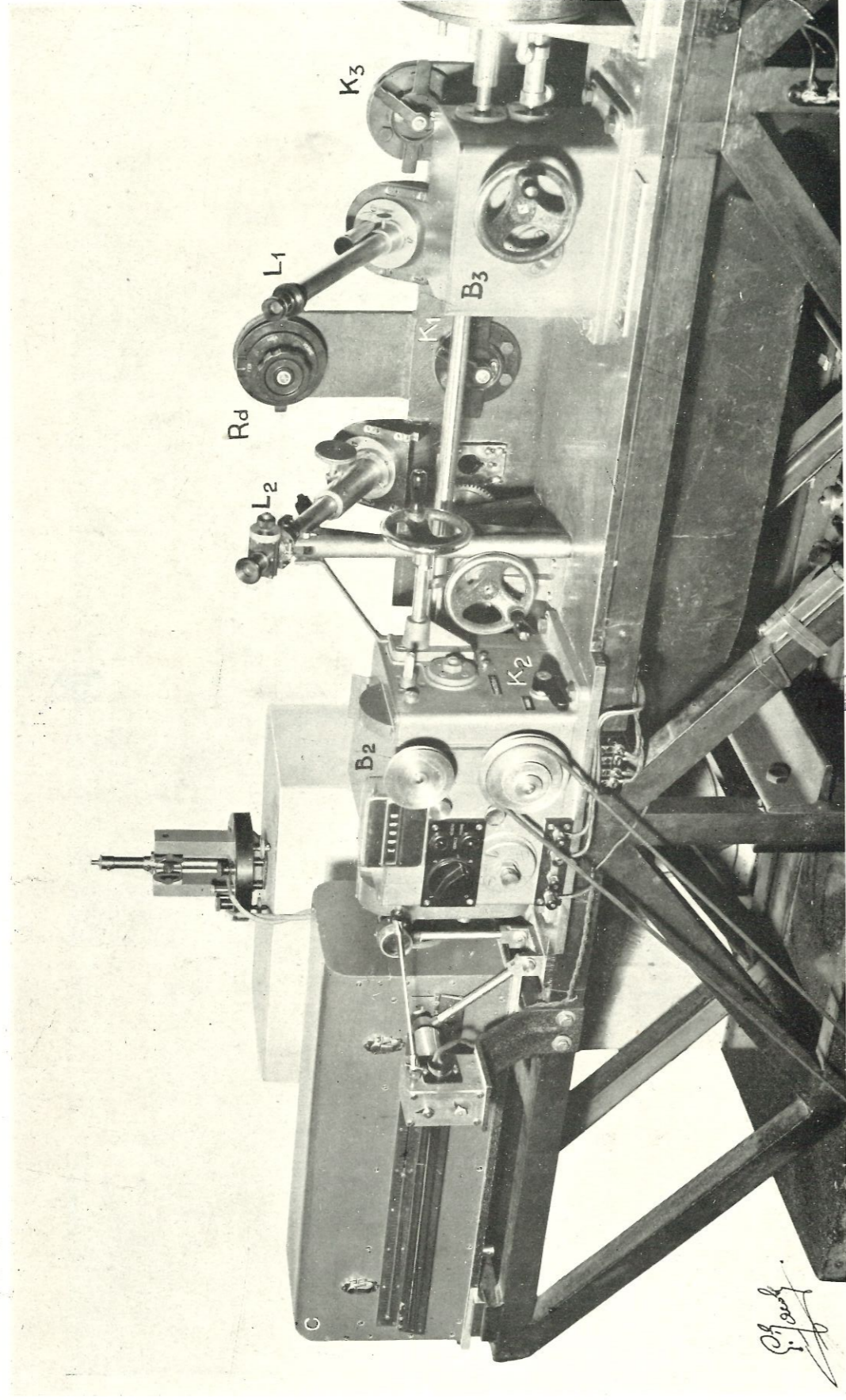


PLANCHE 2

Les dispositifs de commande.

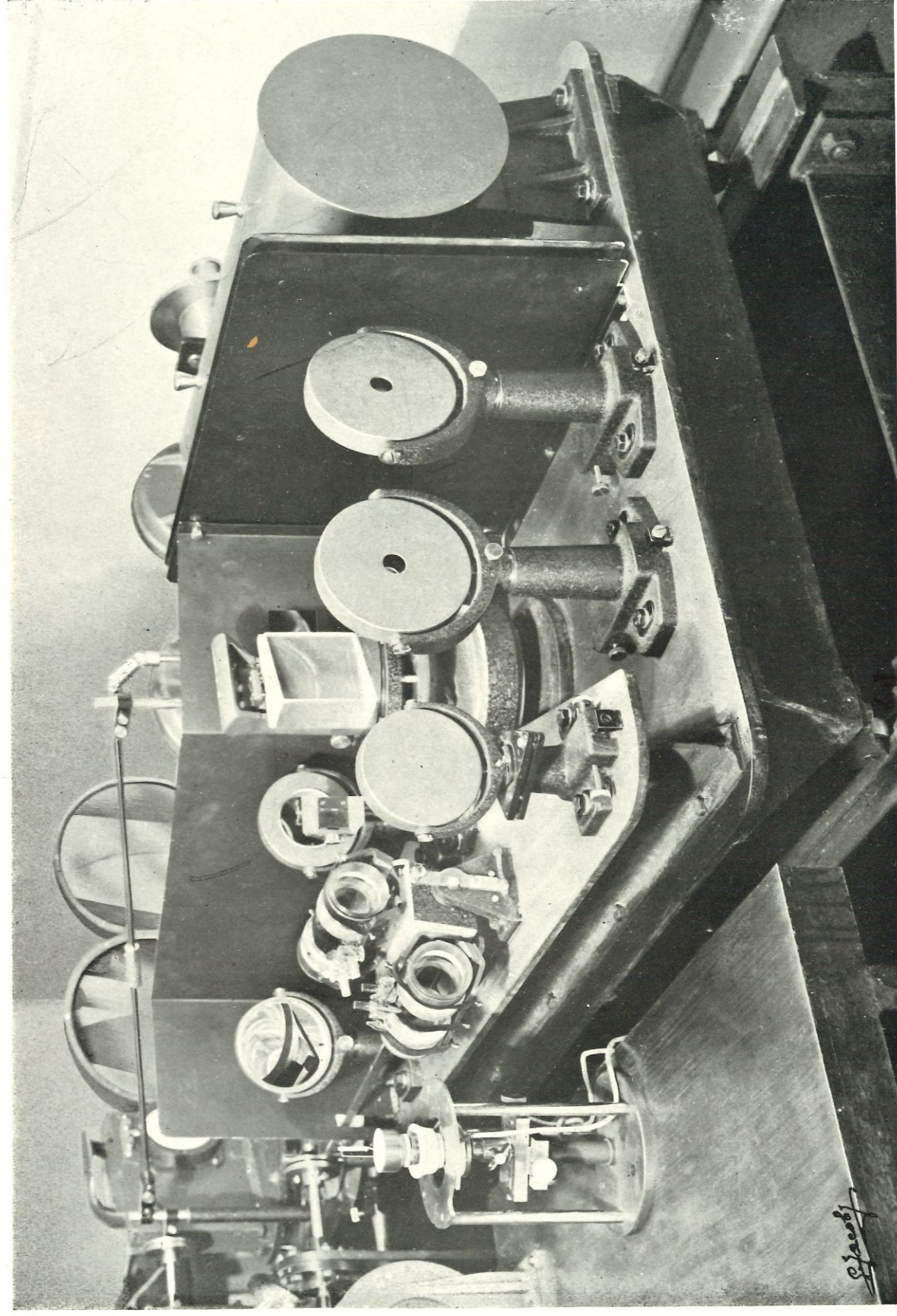


PLANCHE 3

Le support du filament de Nernst, les tubes d'absorption et le monochromateur.

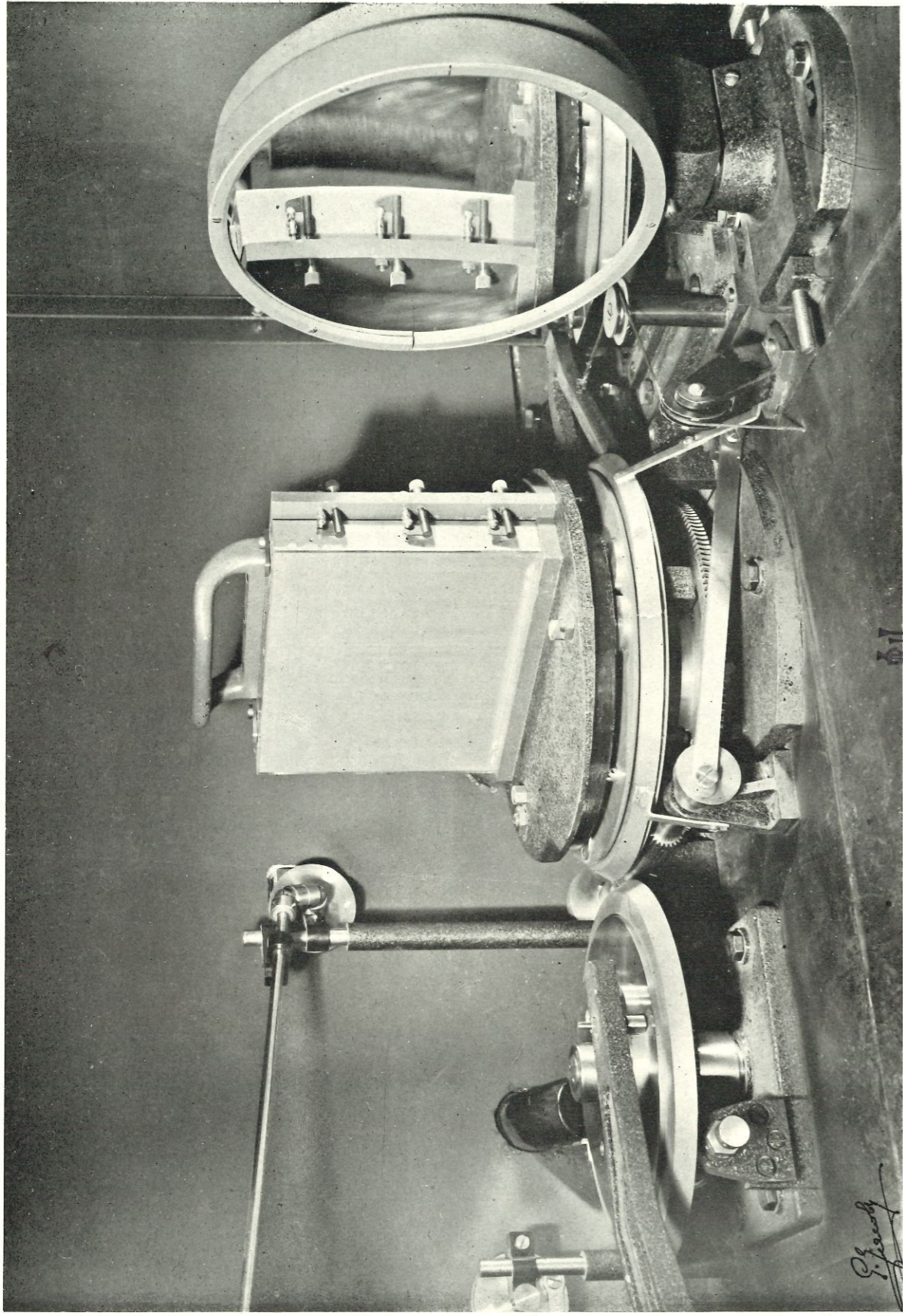


PLANCHE 4

Un des grands réseaux sur son support. — Dimensions du réseau, 225 x 175 mm.

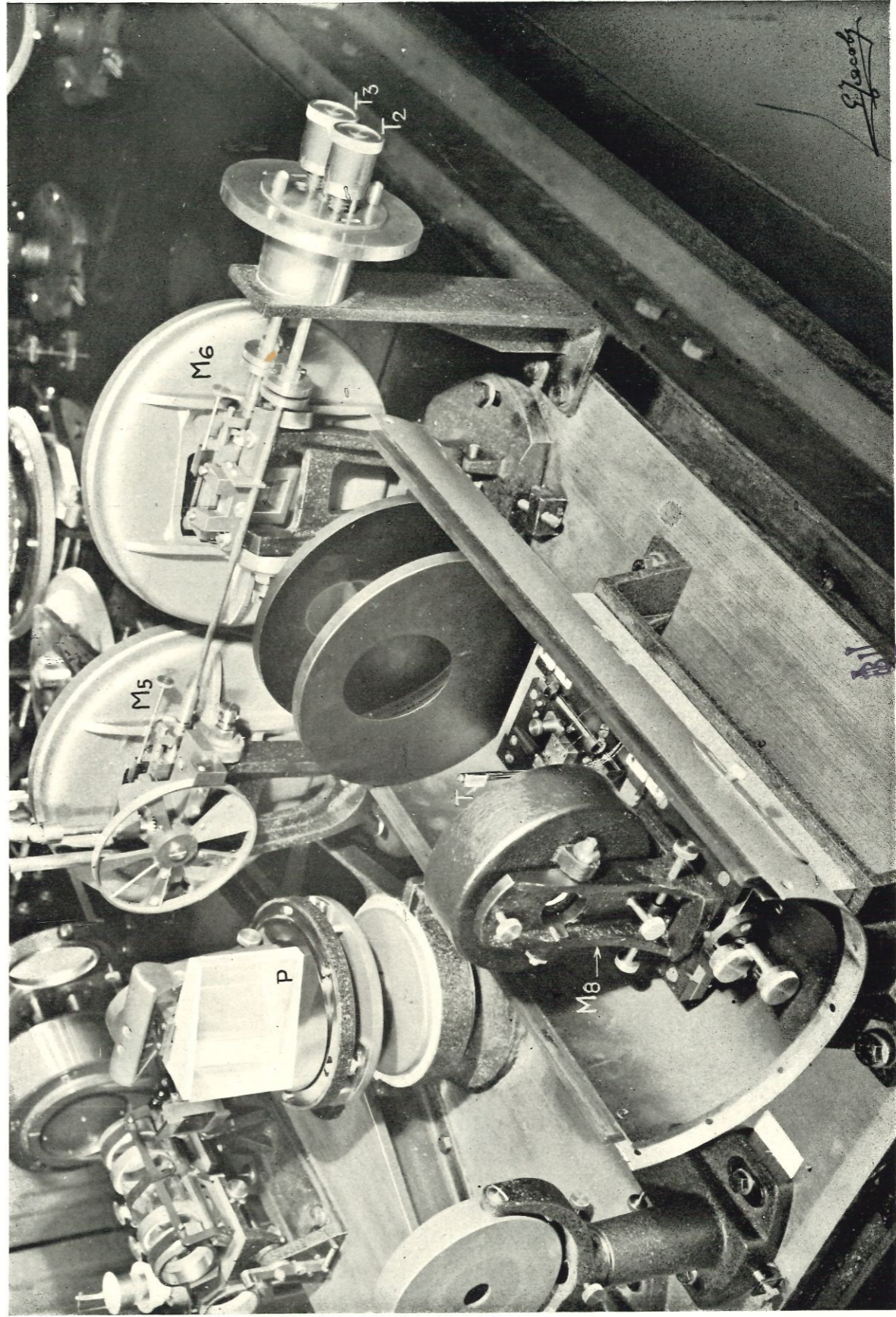


PLANCHE 5

M₈, support du miroir elliptique; T, pile thermo-électrique; P, prisme du monochromateur;
M₅ et M₆, supports des miroirs plans troués; T₂ et T₃, tambours commandant les fentes F₂ et F₃ (cf. Pl. 9).

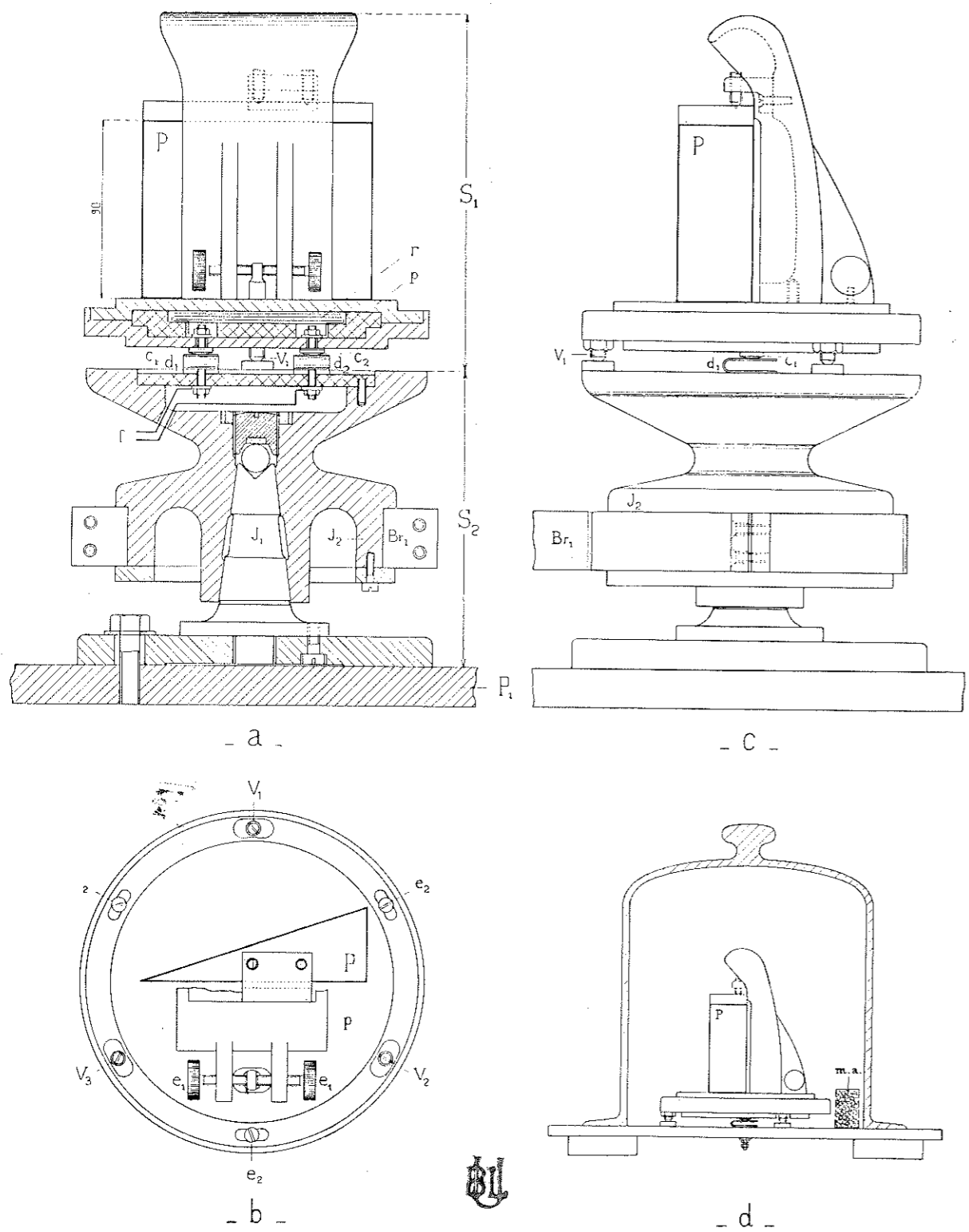


PLANCHE 6
Le support du prisme.

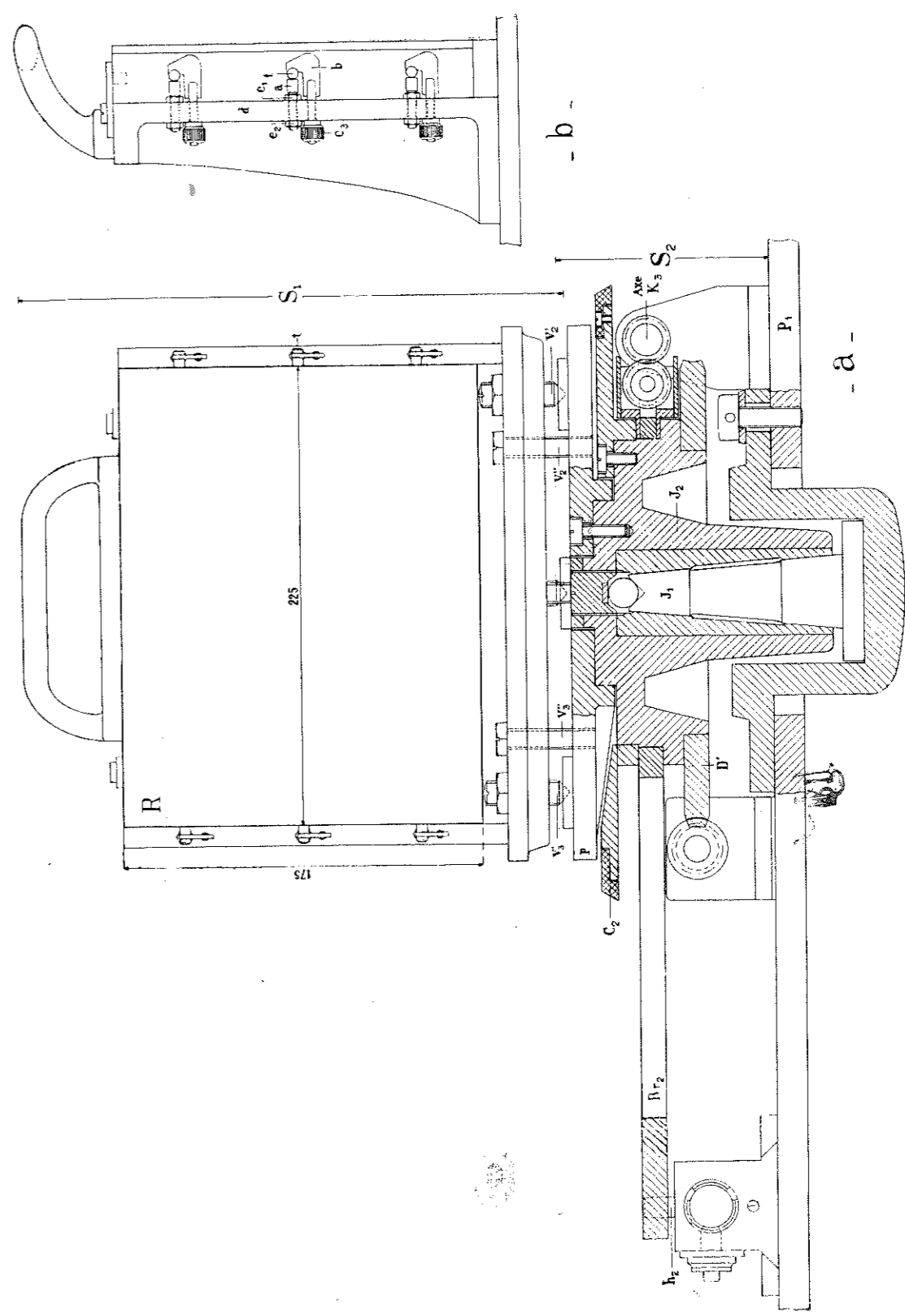


PLANCHE 7
Le support du réseau.

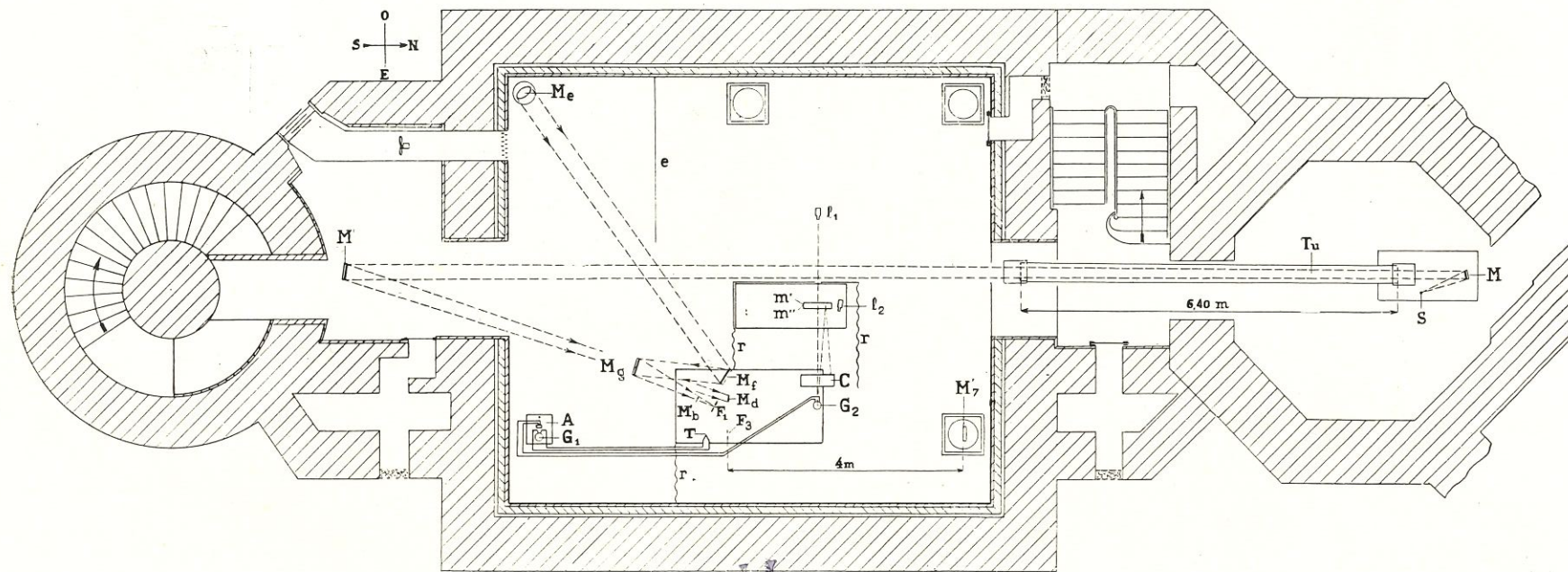


PLANCHE 8

Plan du laboratoire.

T, pile thermo-électrique; G_1 , premier galvanomètre; A, amplificateur; G_2 , deuxième galvanomètre; C, cylindre enregistreur; $M_e M_f M_g F_1$, trajet du faisceau de rayons solaires dans le laboratoire, avant son entrée dans le spectrographe; $S M M' M_d M_b F_1$, trajet du faisceau de rayons provenant de la lampe S, avant son entrée dans le spectrographe; T_u , tube d'absorption utilisé pour obtenir le spectre de la vapeur d'eau.

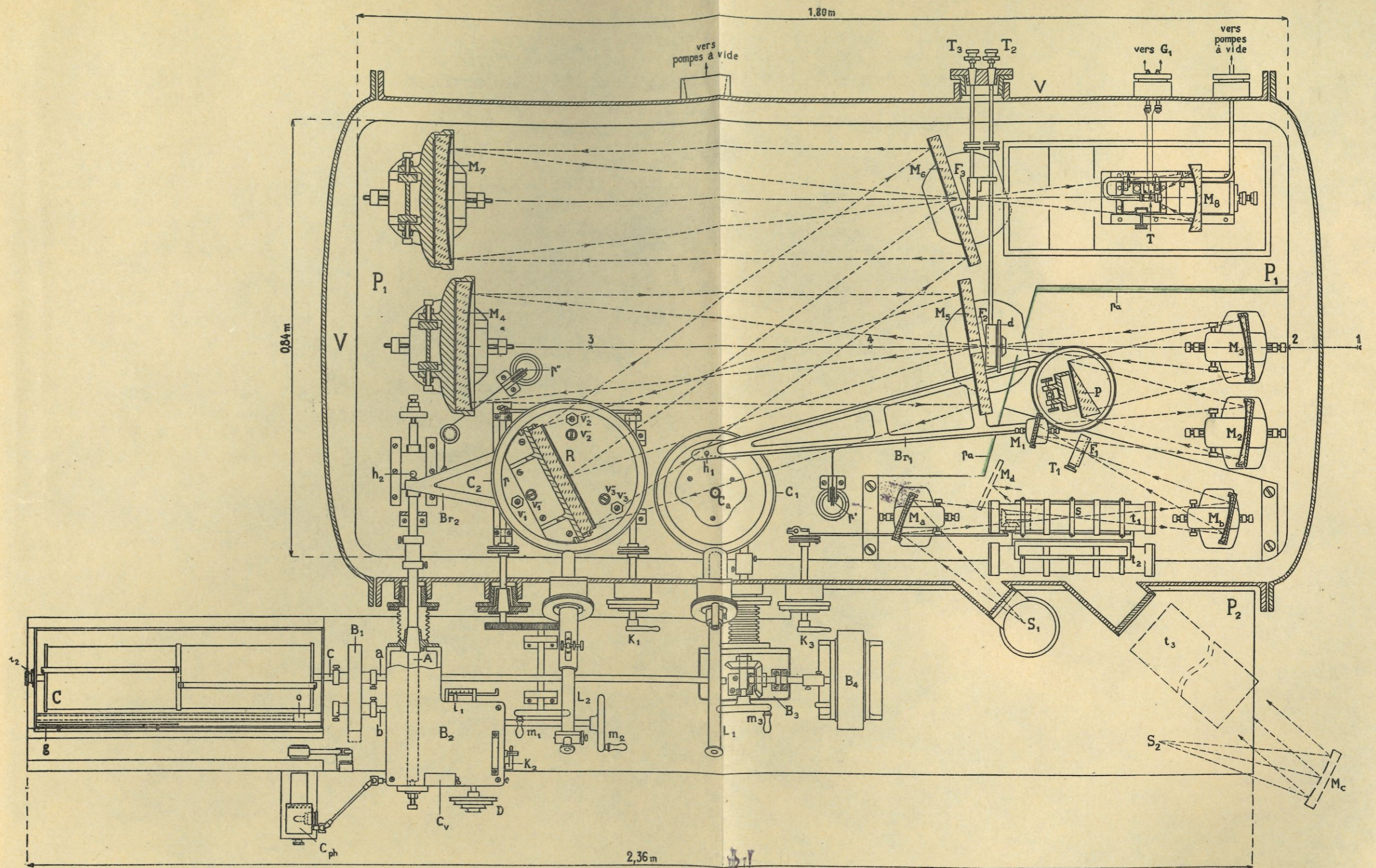


PLANCHE 9

Plan du spectrographe (projection horizontale).

Remarque : Pour simplifier le dessin, nous n'avons pas indiqué le dispositif de commande du disque d placé devant F_2 , de même que la poulie d' de la boîte de vitesse B_2 (cf. fig. 7).

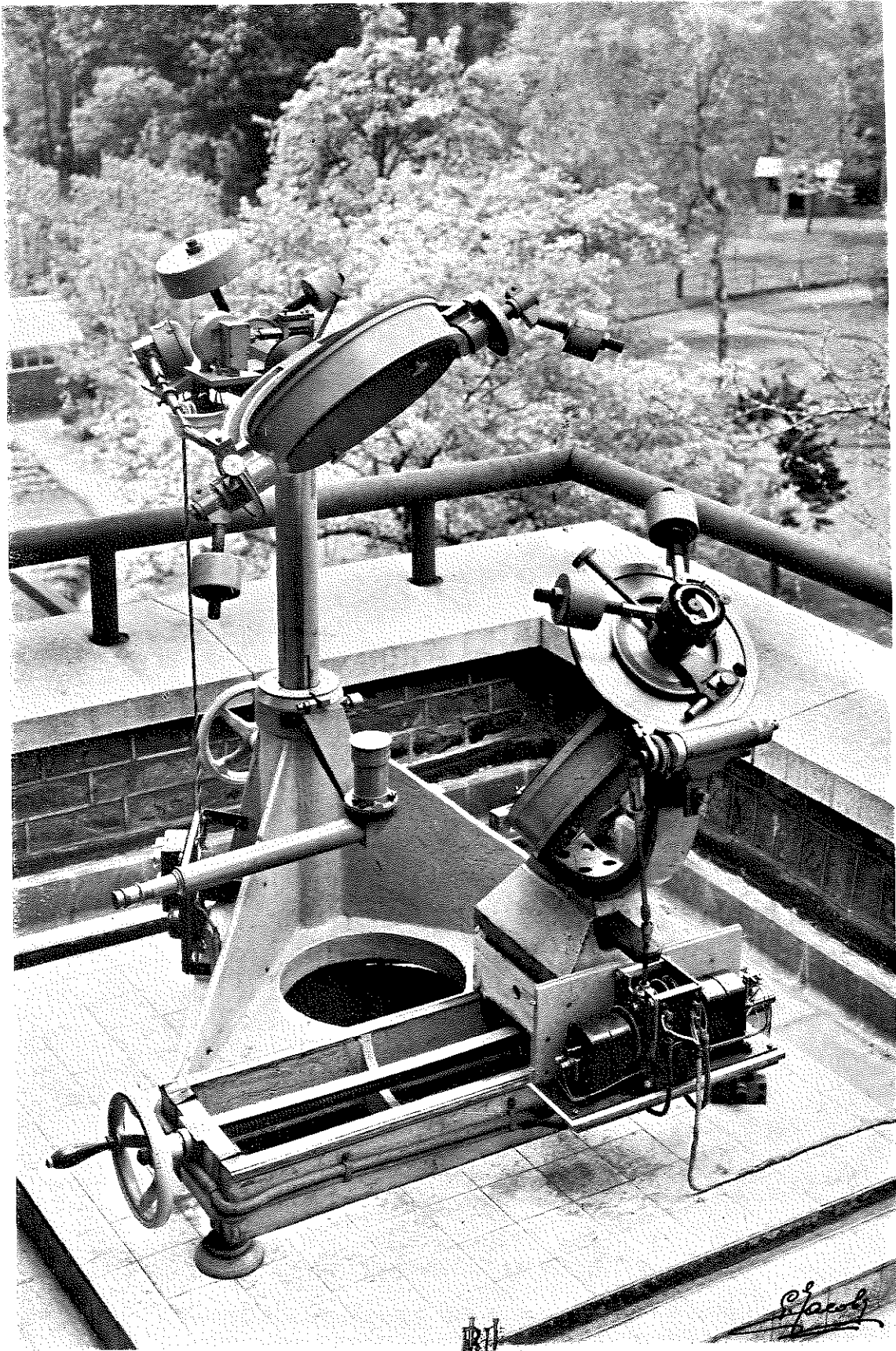



PLANCHE 10
Le coelostat.

Spang

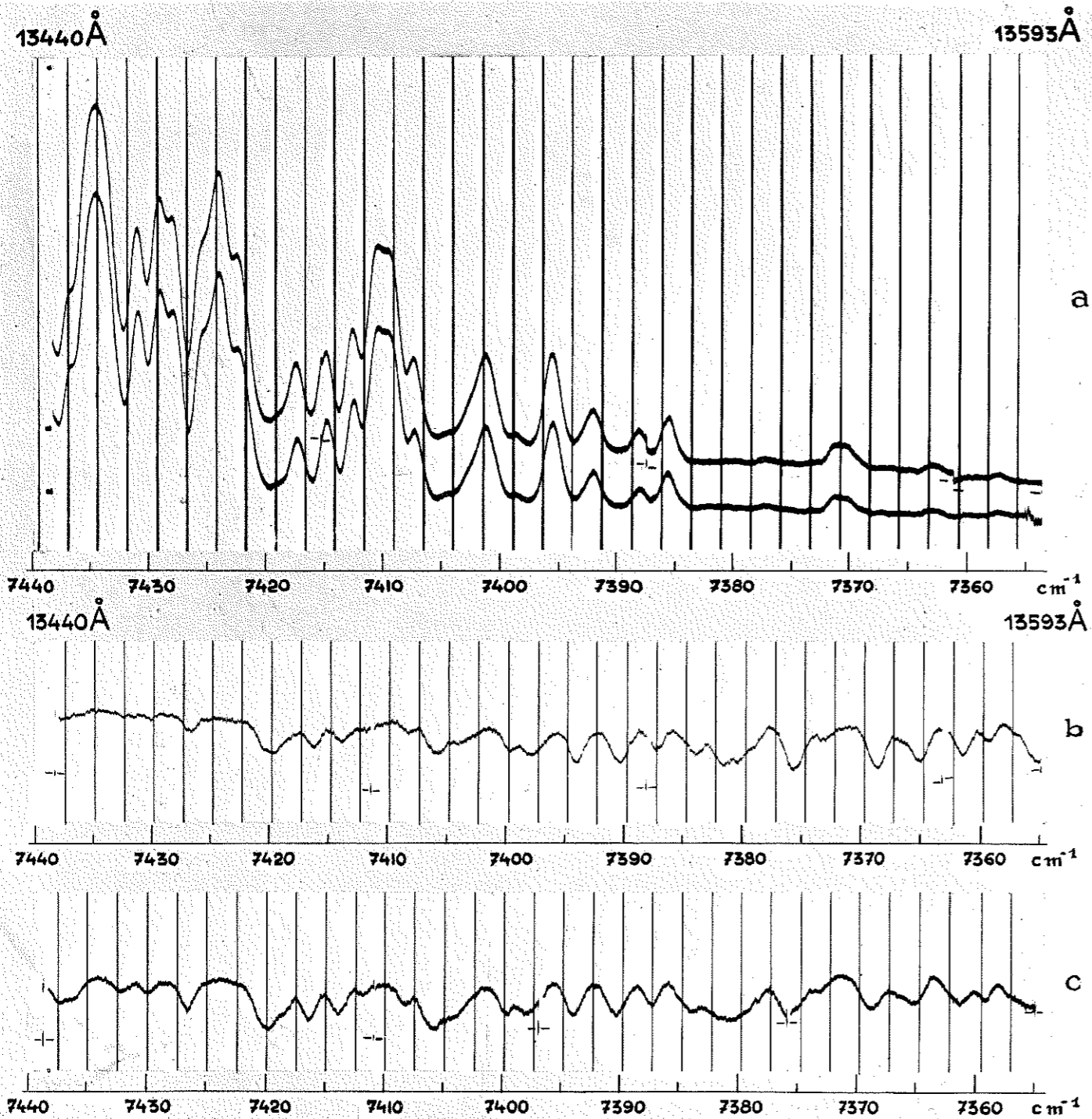


PLANCHE 11 — RÉGION 1

a. — Spectres du soleil obtenus le 8 mars 1943. — Fentes : 0,10 mm. ($0,86 \text{ cm}^{-1}$, 1,6 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,95 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 23^\circ$, $E = 60$; c : Temp. $T_u = 53^\circ$, $E = 68$.

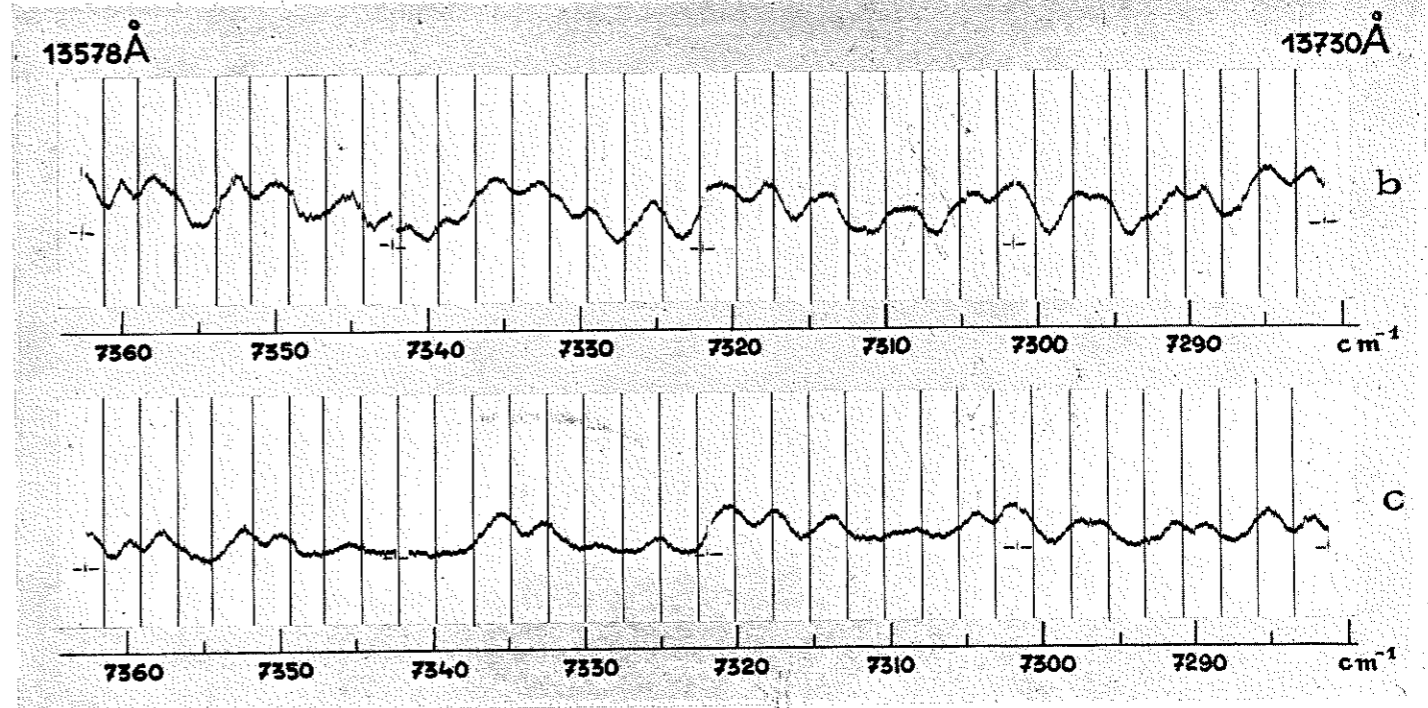


PLANCHE 12 — RÉGION 2

a. — Au cours de différentes séances d'observation, nous avons fait défiler le spectre du soleil sur la pile thermo-électrique, dans la région comprise entre 13570 et 13730 Å. Nous n'avons remarqué, à partir de la position zéro, qu'un faible déplacement constant du spot lumineux sur le cylindre enregistreur.
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,93 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 22^\circ$, $E = 65$; c : Temp. $T_u = 53^\circ$, $E = 68$.

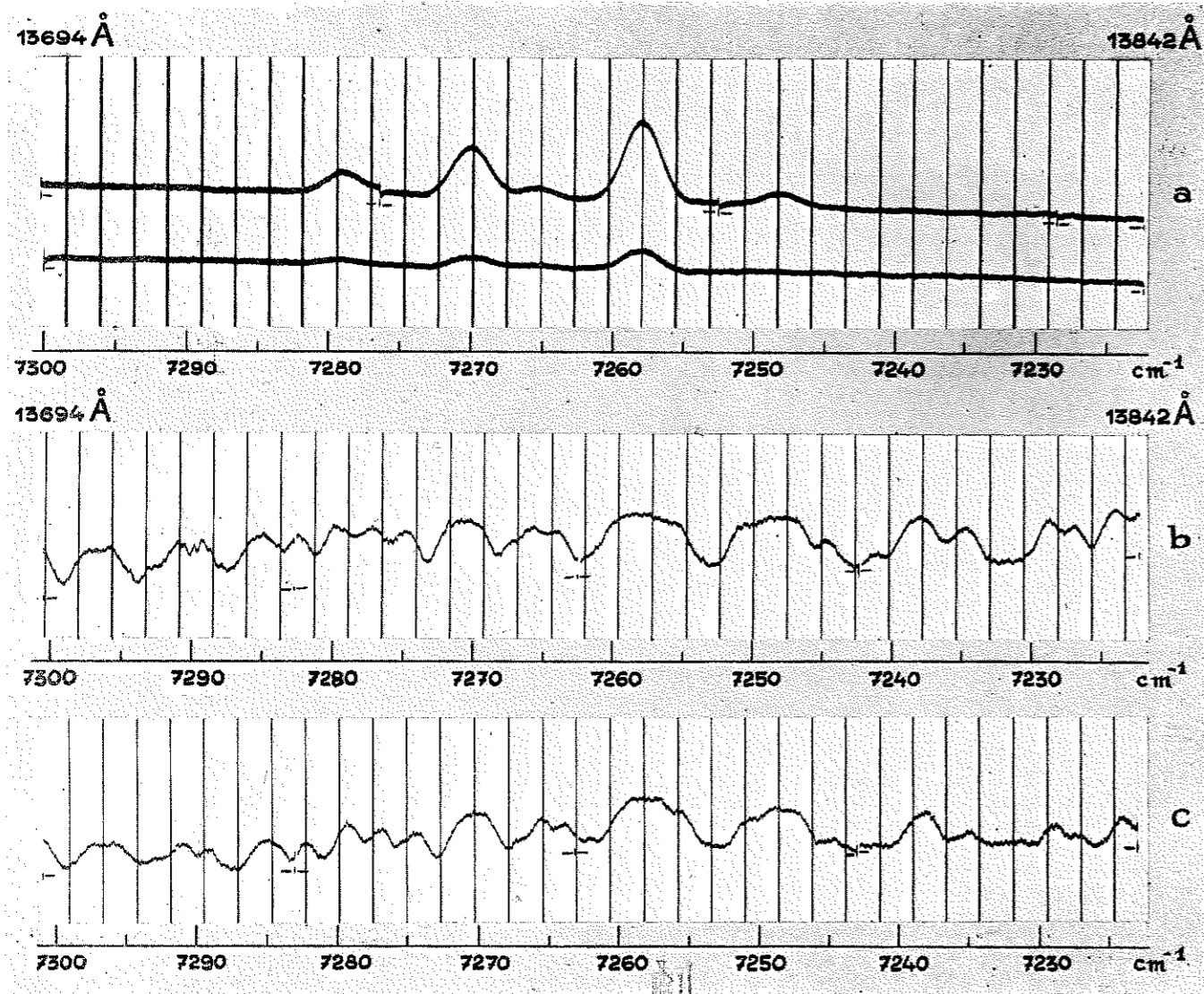


PLANCHE 13 — RÉGION 3

a. — Spectres du soleil obtenus le 10 mars 1943. — Fentes : 0.30 mm. (2.5 cm^{-1} , 4.7 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0.11 mm. (0.95 cm^{-1} , 1.7 Å).
 b : Temp. $T_u = 22^\circ$, $E = 60$; c : Temp. $T_u = 53^\circ$, $E = 68$.

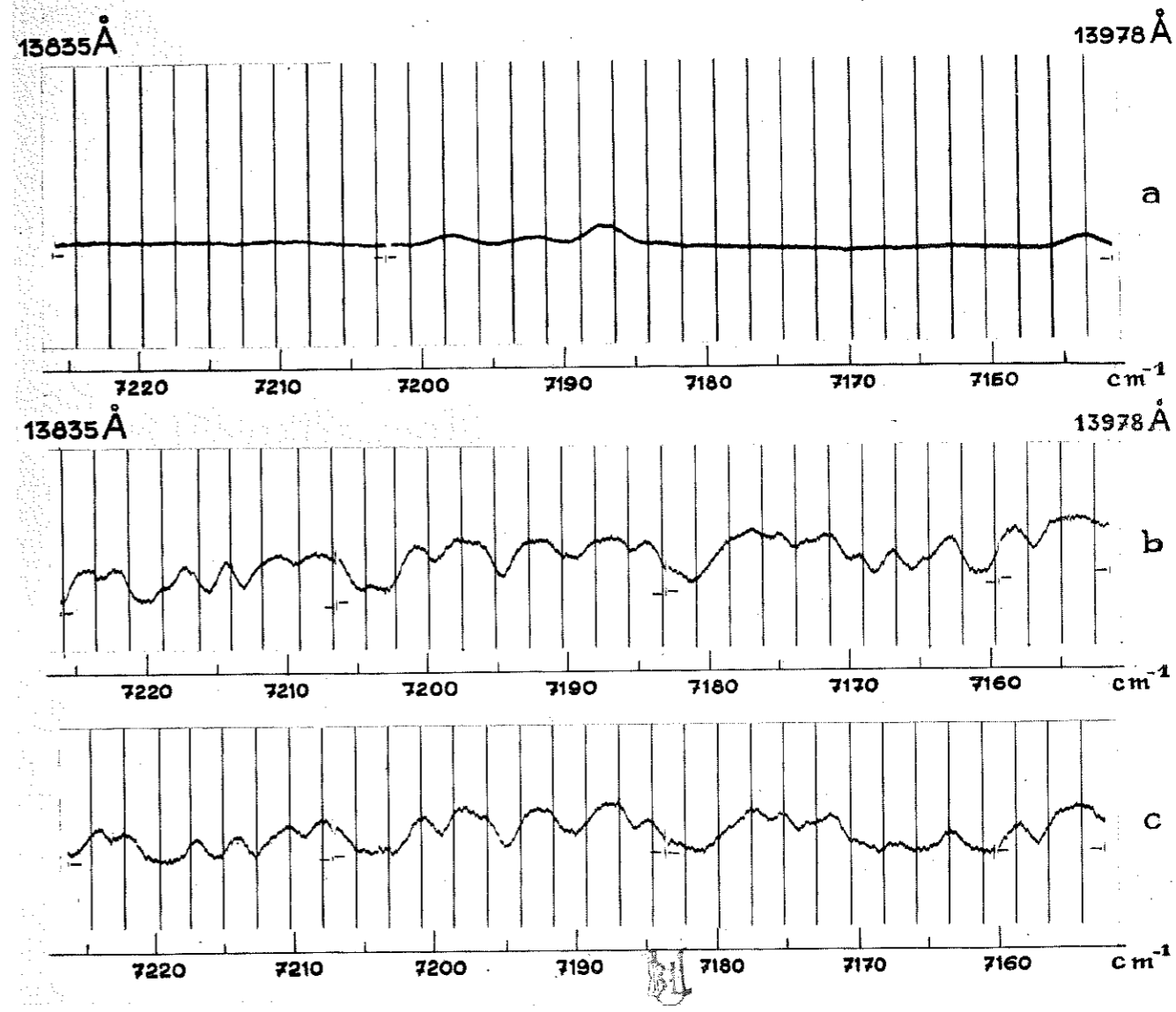


PLANCHE 14 — RÉGION 4

a. — Spectre du soleil obtenu le 15 mars 1943. — Fentes : 0.25 mm. (2.02 cm^{-1} , 3.9 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0.11 mm. (0.95 cm^{-1} , 1.7 Å).
 b : Temp. $T_u = 22^\circ$, $E = 60$; c : Temp. $T_u = 53^\circ$, $E = 68$.

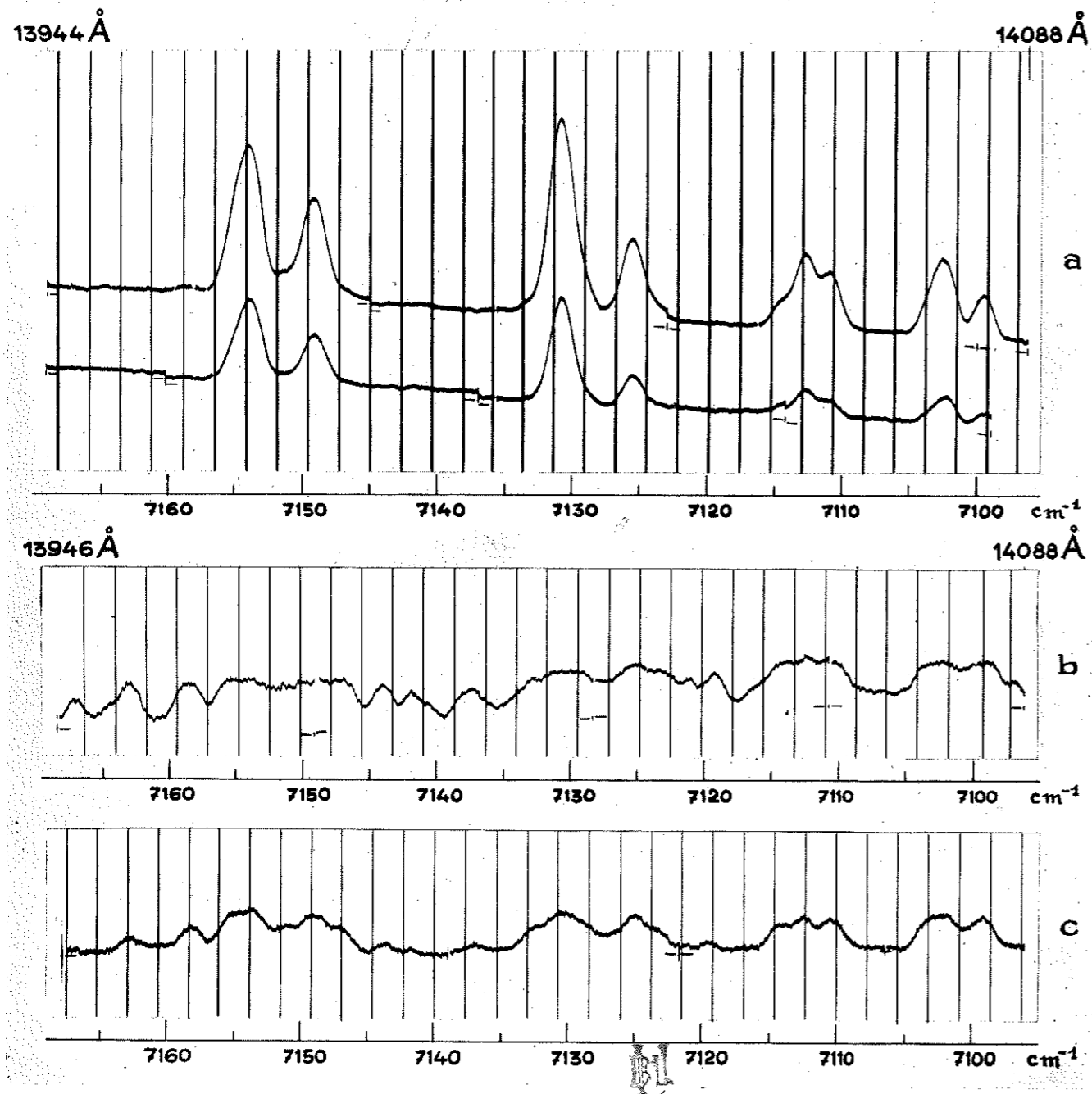


PLANCHE 15 — RÉGION 5

a. — Spectres du soleil obtenus le 22 février 1943. — Fentes : 0,18 mm. ($1,44 \text{ cm}^{-1}$, 2,8 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,88 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 20^\circ$, $E = 63$; c : Temp. $T_u = 60^\circ$, $E = 65$.

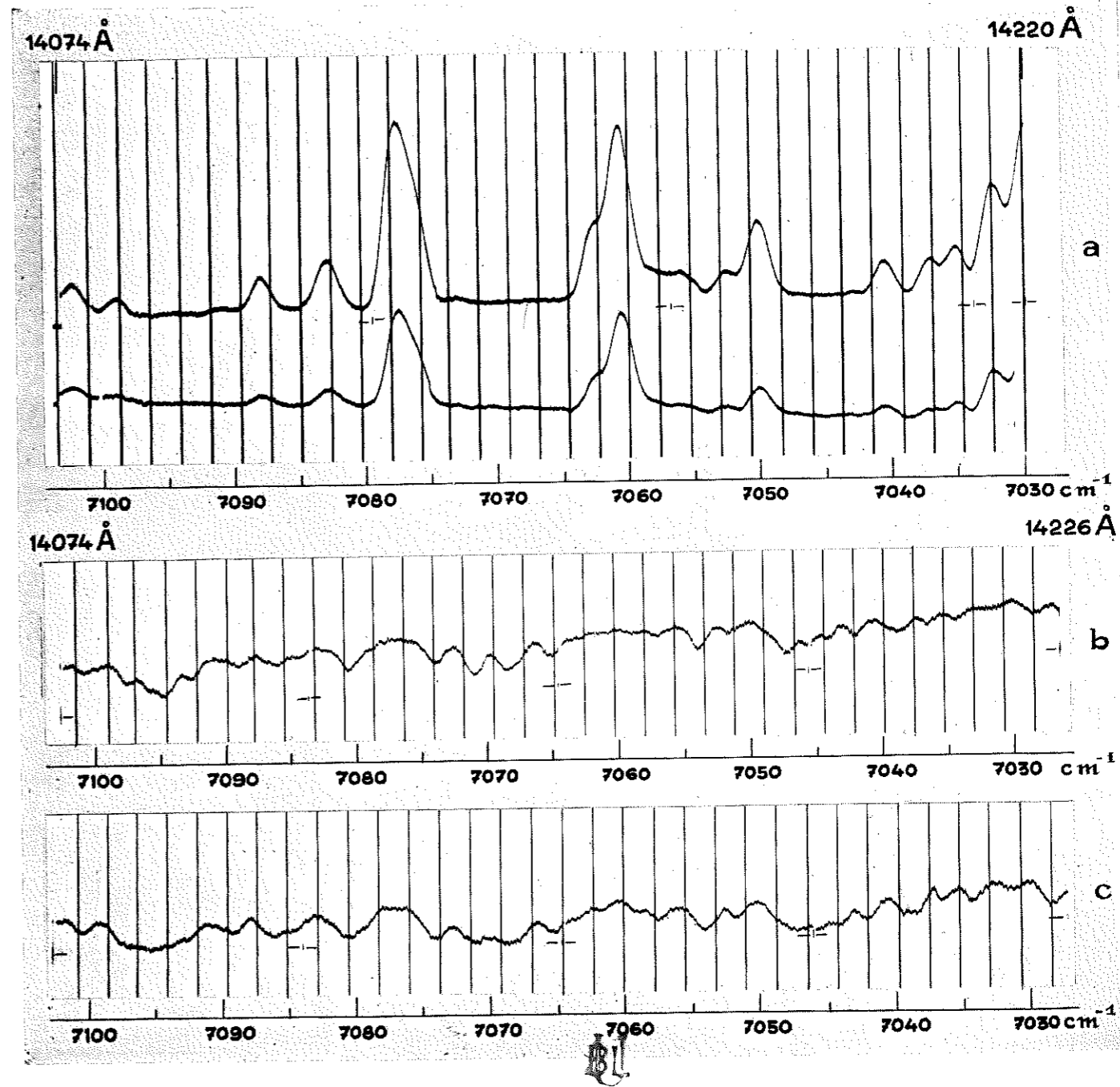


PLANCHE 16 — RÉGION 6

a. — Spectres du soleil obtenus le 25 février 1943. — Fentes : 0,18 mm. ($1,41 \text{ cm}^{-1}$, 2,8 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,86 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 20^\circ$, $E = 63$; c : Temp. $T_u = 60^\circ$, $E = 62$.

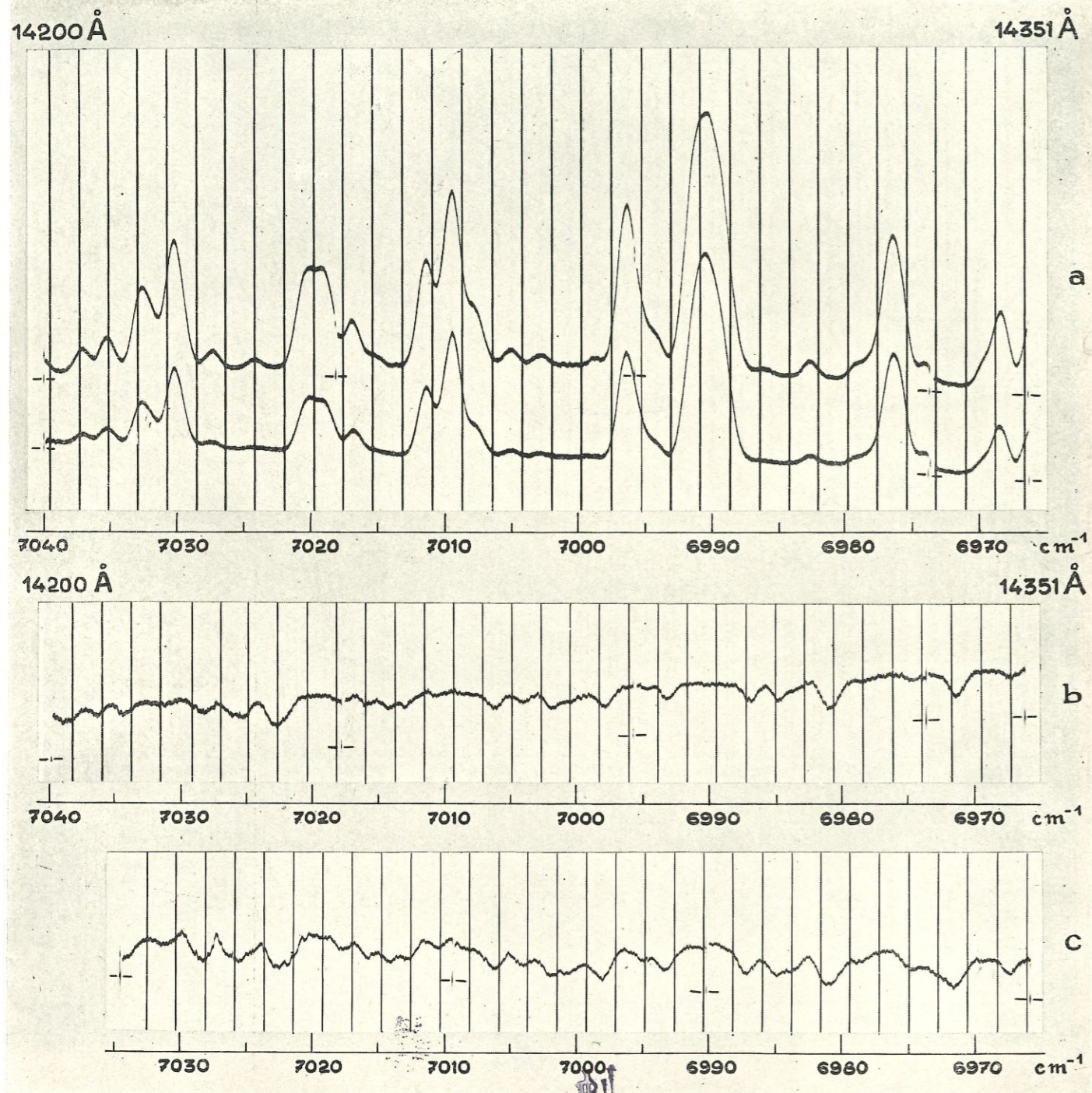


PLANCHE 17 — RÉGION 7

a. — Spectres du soleil obtenus le 20 juin 1943. — Fentes : 0,13 mm. ($0,99 \text{ cm}^{-1}$, 2,03 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,84 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 23^\circ$, $E = 69$; c : Temp. $T_u = 61^\circ$, $E = 58$.

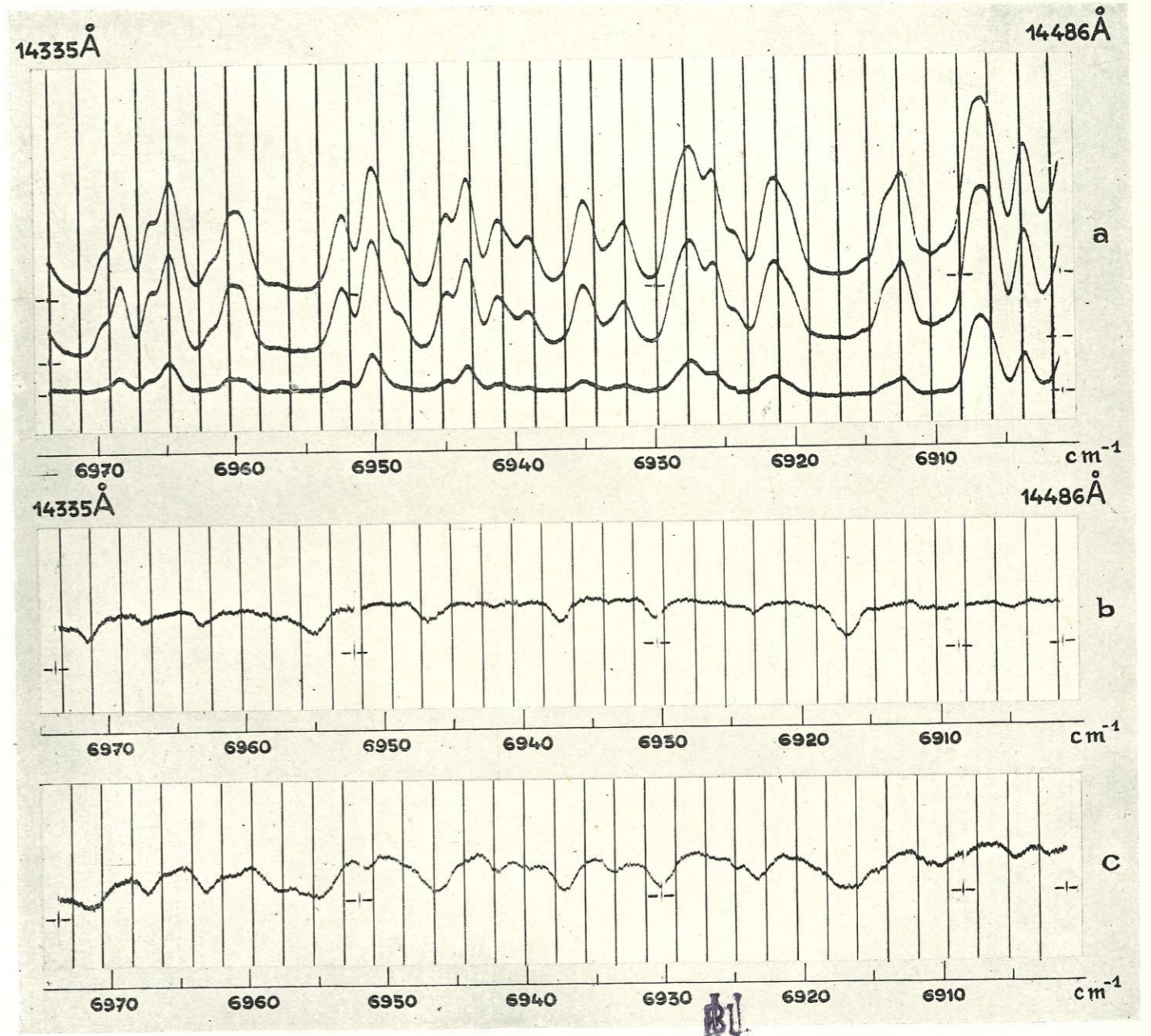


PLANCHE 18 — RÉGION 8

a. — Spectres du soleil obtenus le 19 mai 1943 — Fentes : 0,11 mm. ($0,83 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,83 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 22^\circ$, $E = 76$; c : Temp. $T_u = 73^\circ$, $E = 57$.

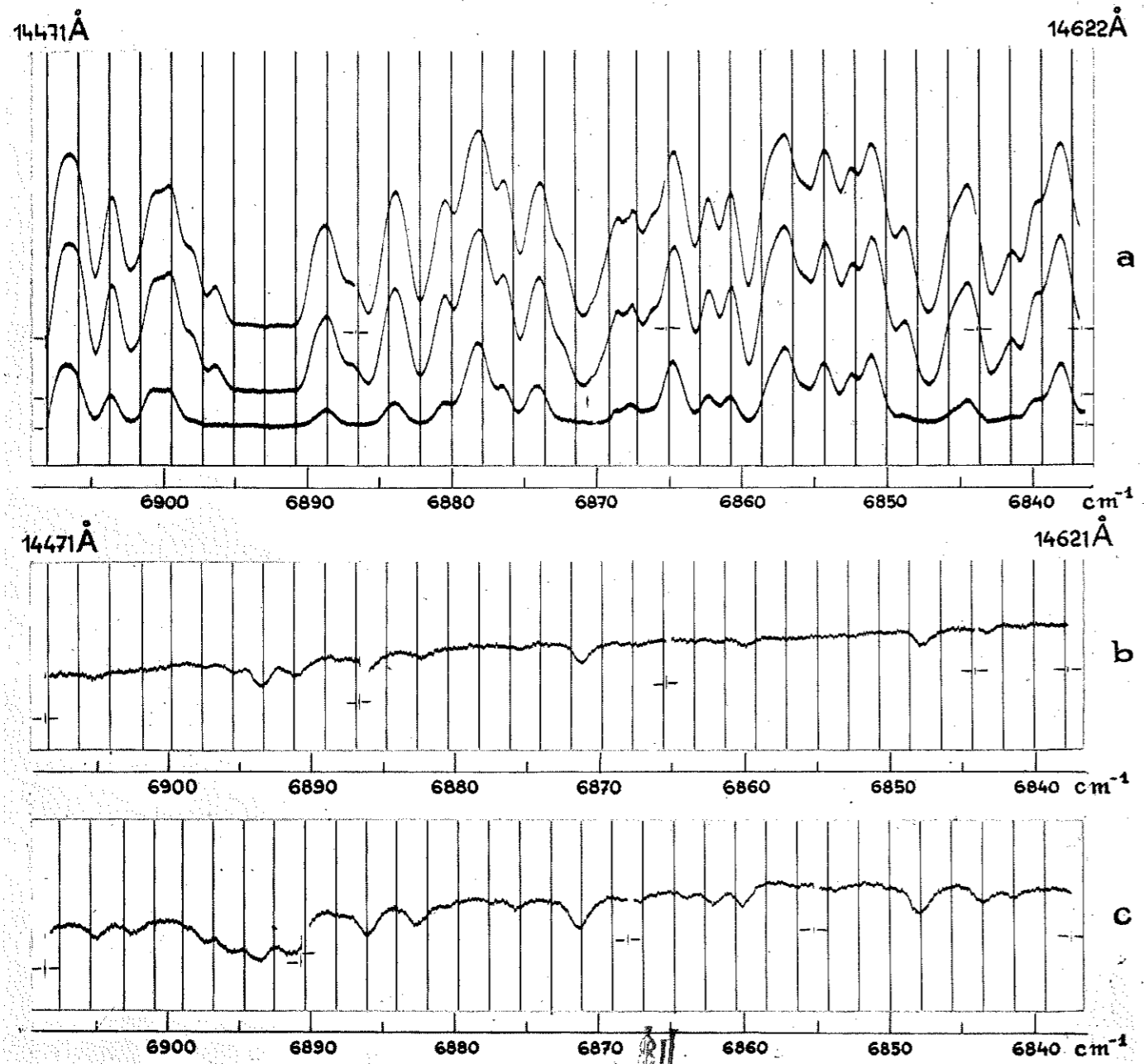


PLANCHE 19 — RÉGION 9

a. — Spectres du soleil obtenus le 19 mai 1943. — Fentes : 0,11 mm. ($0,81 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,81 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 22^\circ$, $E = 76$; c : Temp. $T_u = 73^\circ$, $E = 57$.

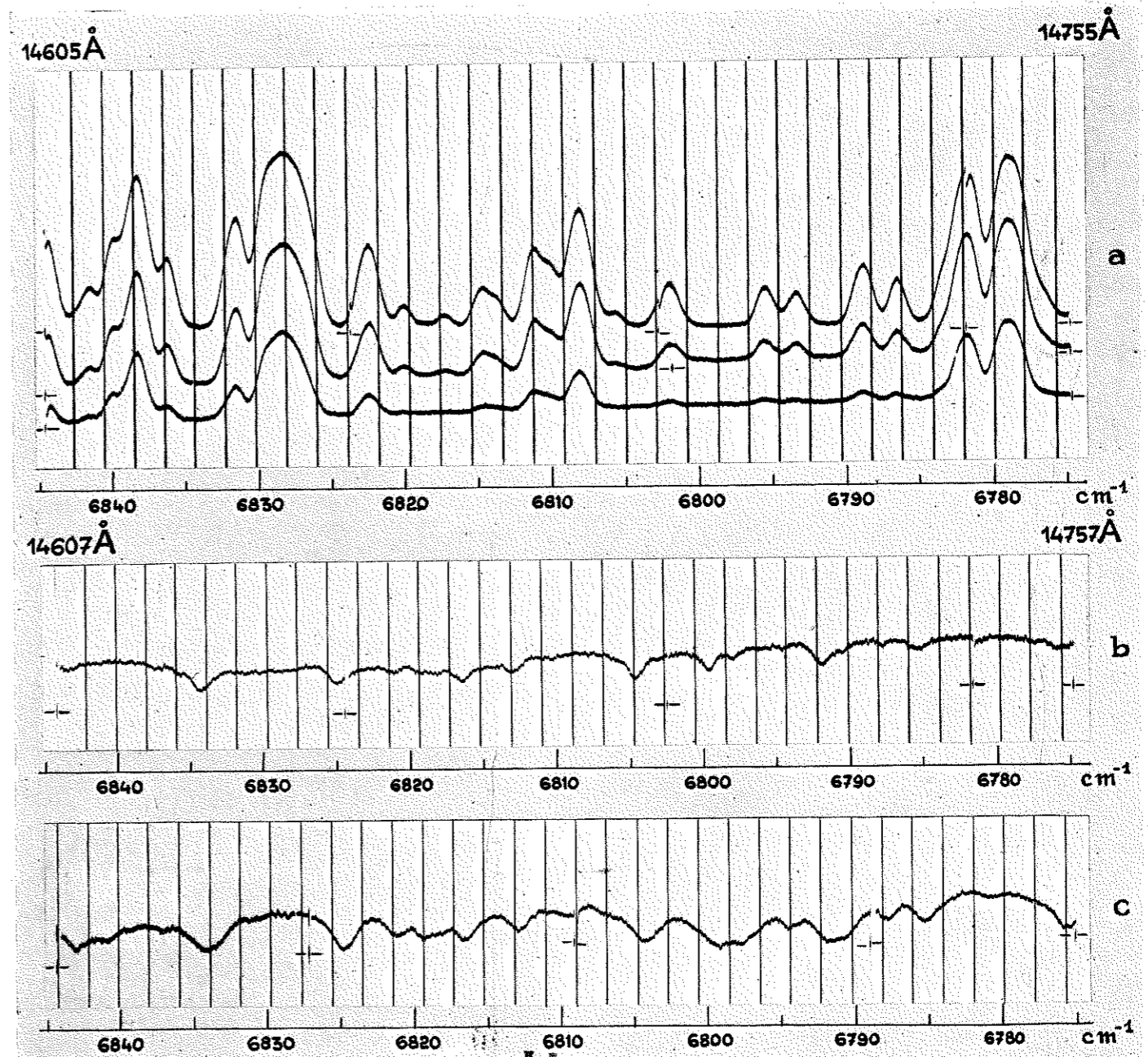


PLANCHE 20 — RÉGION 10

a. — Spectres du soleil obtenus le 17 mai 1943. — Fentes : 0,11 mm. ($0,80 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,80 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 20^\circ$, $E = 78$; c : Temp. $T_u = 86^\circ$, $E = 60$.

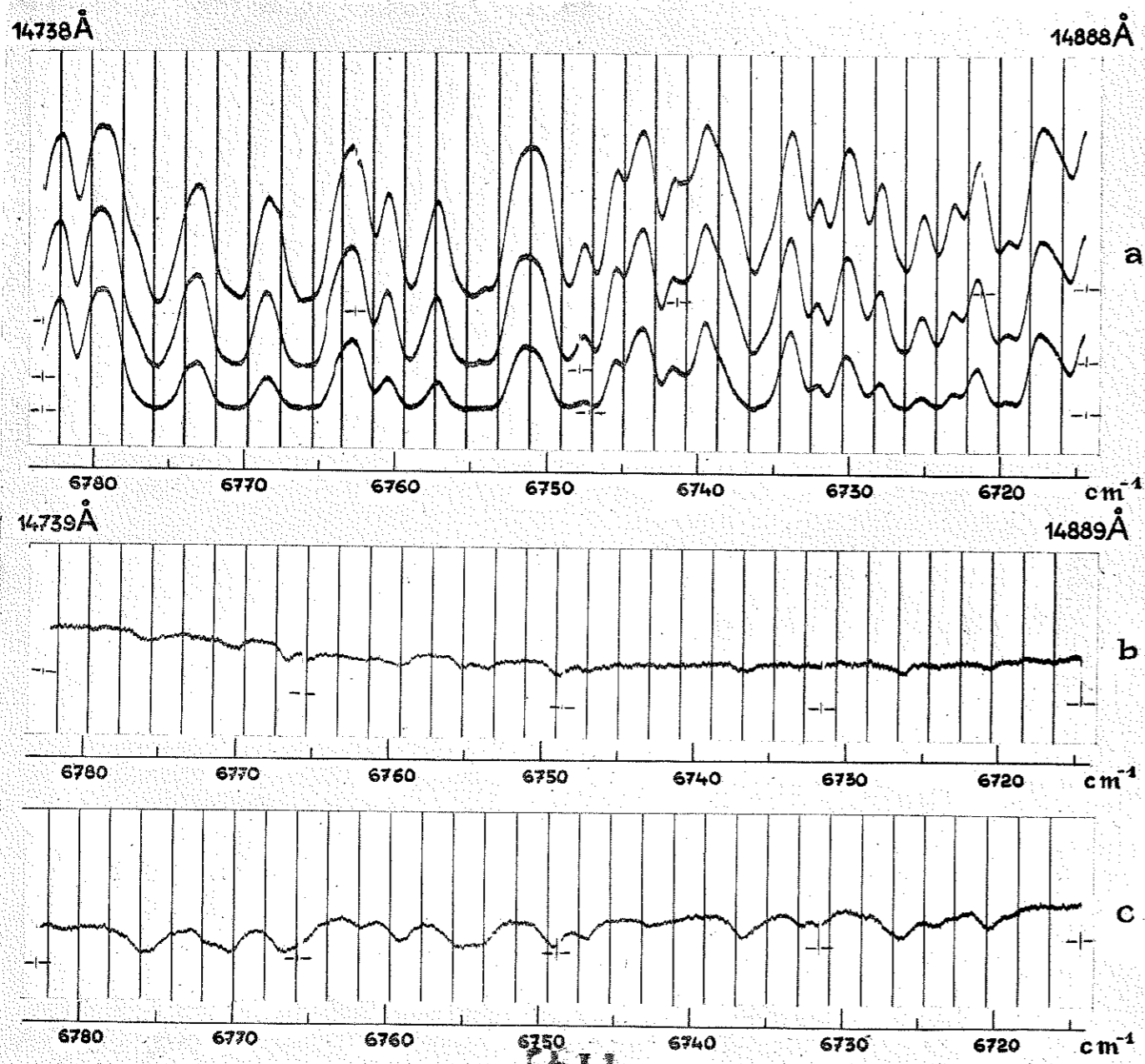


PLANCHE 21 — RÉGION 11

a. — Spectres du soleil obtenus le 18 mai 1943. — Fentes : 0,11 mm. ($0,78 \text{ cm}^{-1}$, $1,7 \text{ \AA}$).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,78 \text{ cm}^{-1}$, $1,7 \text{ \AA}$).
 b : Temp. $T_u = 20^\circ$, $E = 78$; c : Temp. $T_u = 86^\circ$, $E = 60$.

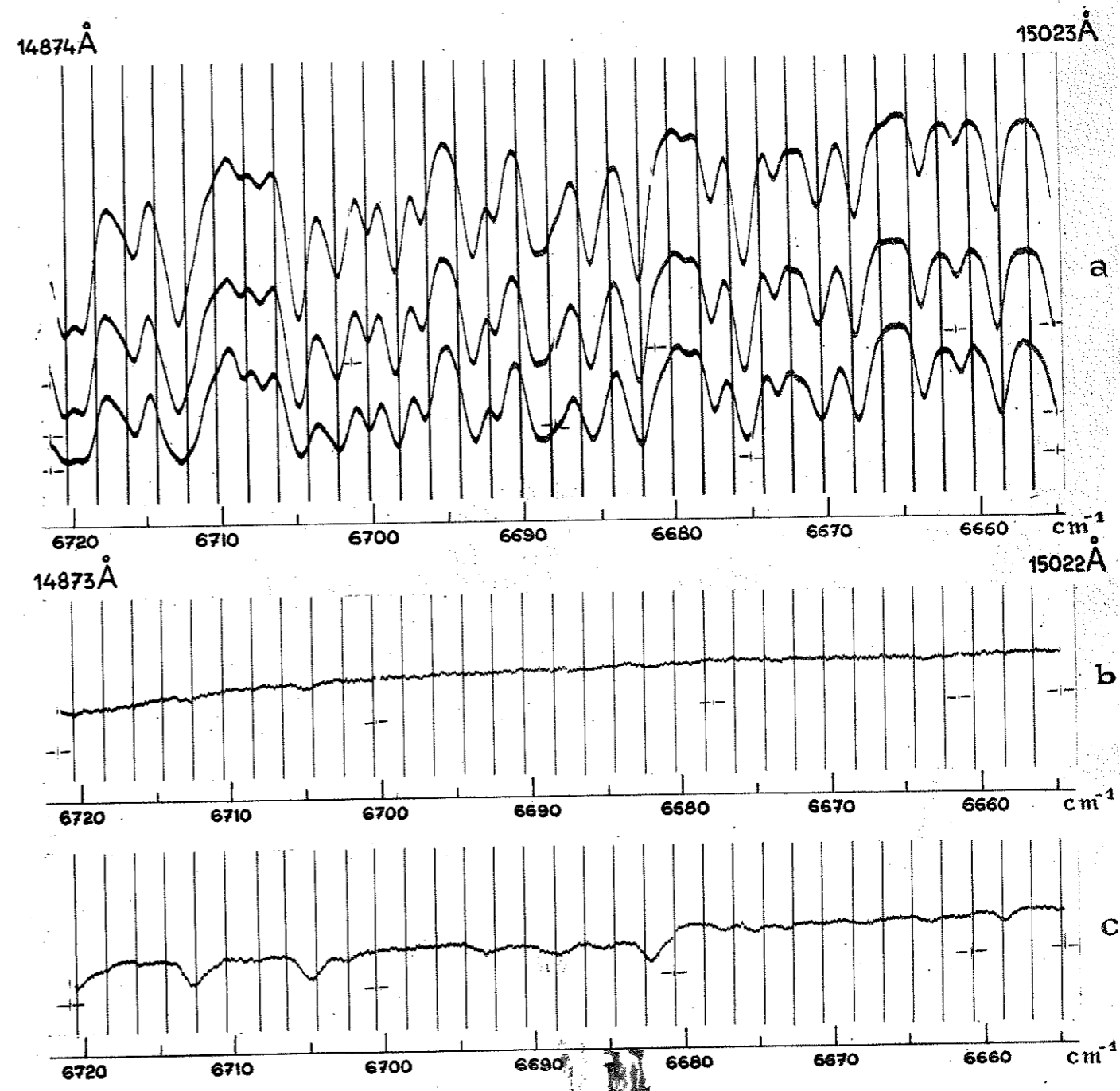


PLANCHE 22 — RÉGION 12

a. — Spectres du soleil obtenus le 18 mai 1943. — Fentes : 0,11 mm. ($0,76 \text{ cm}^{-1}$, $1,7 \text{ \AA}$).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,76 \text{ cm}^{-1}$, $1,7 \text{ \AA}$).
 b : Temp. $T_u = 21^\circ$, $E = 62$; c : Temp. $T_u = 88^\circ$, $E = 60$.

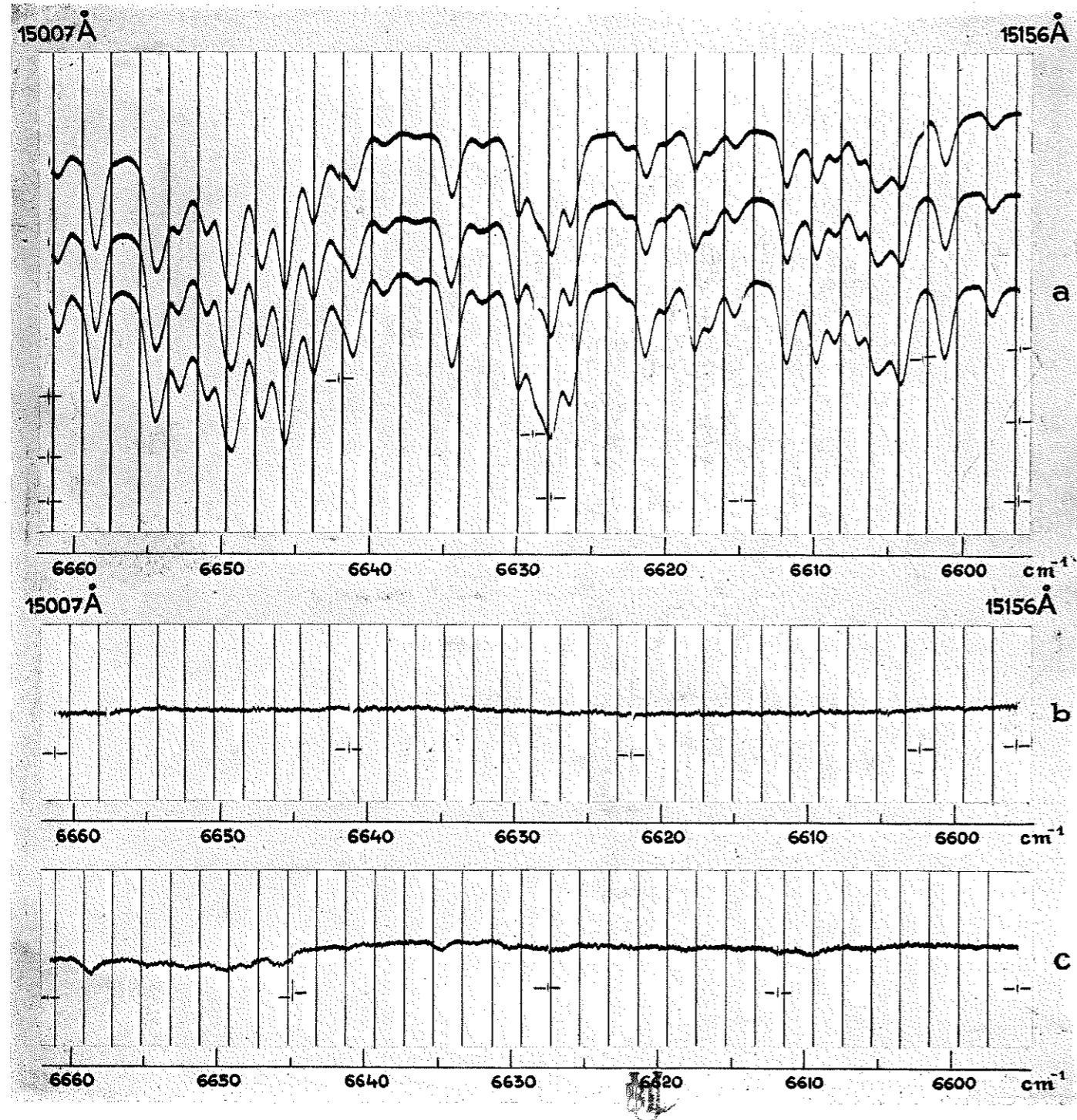


PLANCHE 23 — RÉGION 13

a. — Spectres du soleil obtenus le 17 juillet 1943. — Fentes : 0,10 mm. ($0,68 \text{ cm}^{-1}$, 1,5 Å).
 b et c. — Spectres d'absorption de la vapeur d'eau. — Fentes : 0,11 mm. ($0,75 \text{ cm}^{-1}$, 1,7 Å).
 b : Temp. $T_u = 21^\circ$, $E = 62$; c : Temp. $T_u = 88^\circ$, $E = 68$.

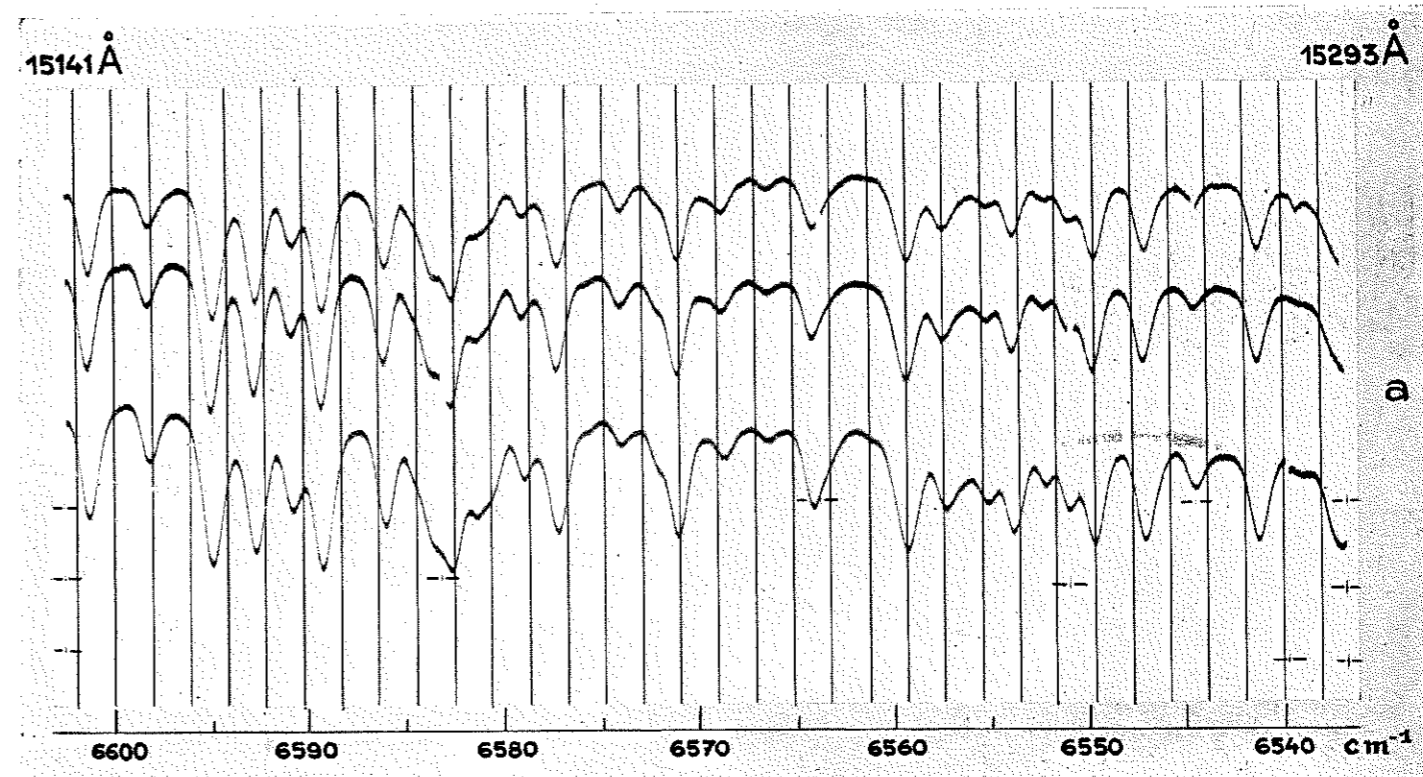


PLANCHE 24 — RÉGION 14

a. — Spectres du soleil obtenus le 14 mai 1943. — Fentes : 0,10 mm. ($0,87 \text{ cm}^{-1}$, 1,5 Å).
 b et c. — En laboratoire, nous n'avons pas observé de raies dans le spectre d'absorption de la vapeur d'eau enregistré entre 15140 Å et 15293 Å, même lorsque la température à l'intérieur du tube s'élevait à 86° .

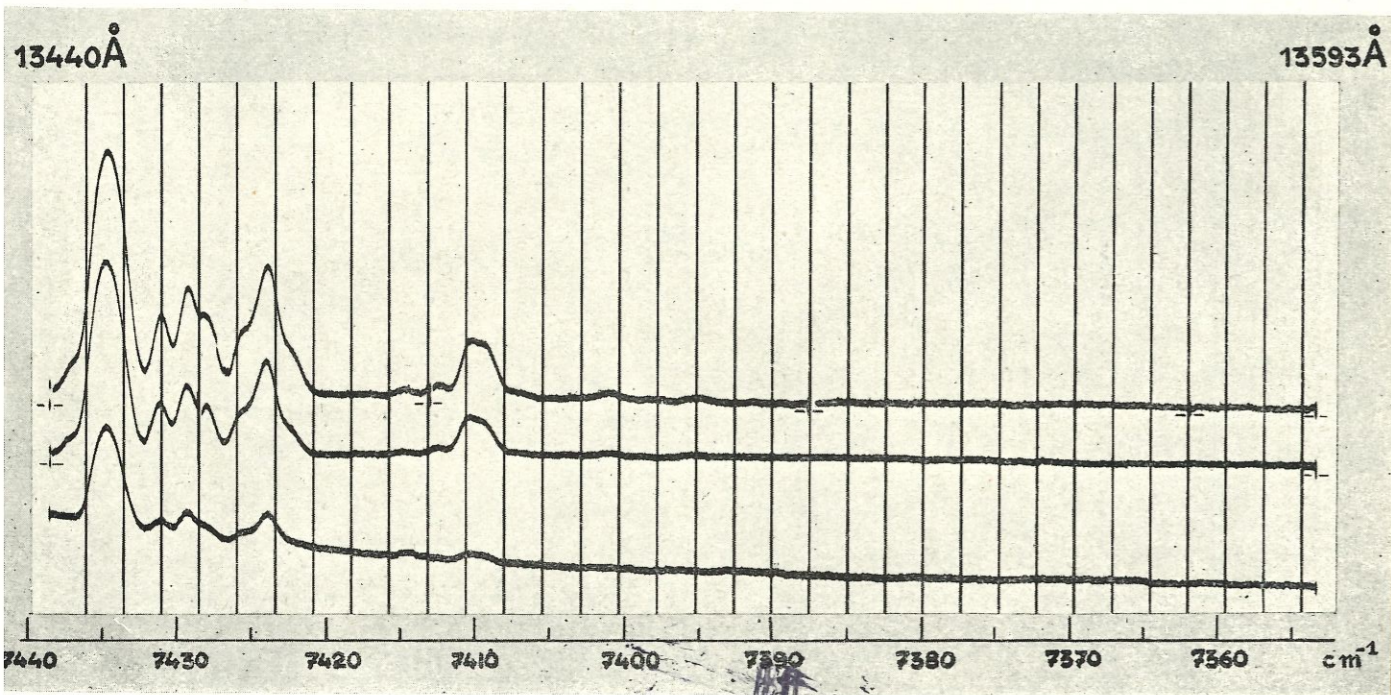


PLANCHE 25 — RÉGION 1

Spectres du soleil obtenus le 26 juillet 1943. — Fentes : 0,10 mm. ($0,86 \text{ cm}^{-1}$, $1,6 \text{ Å}$).

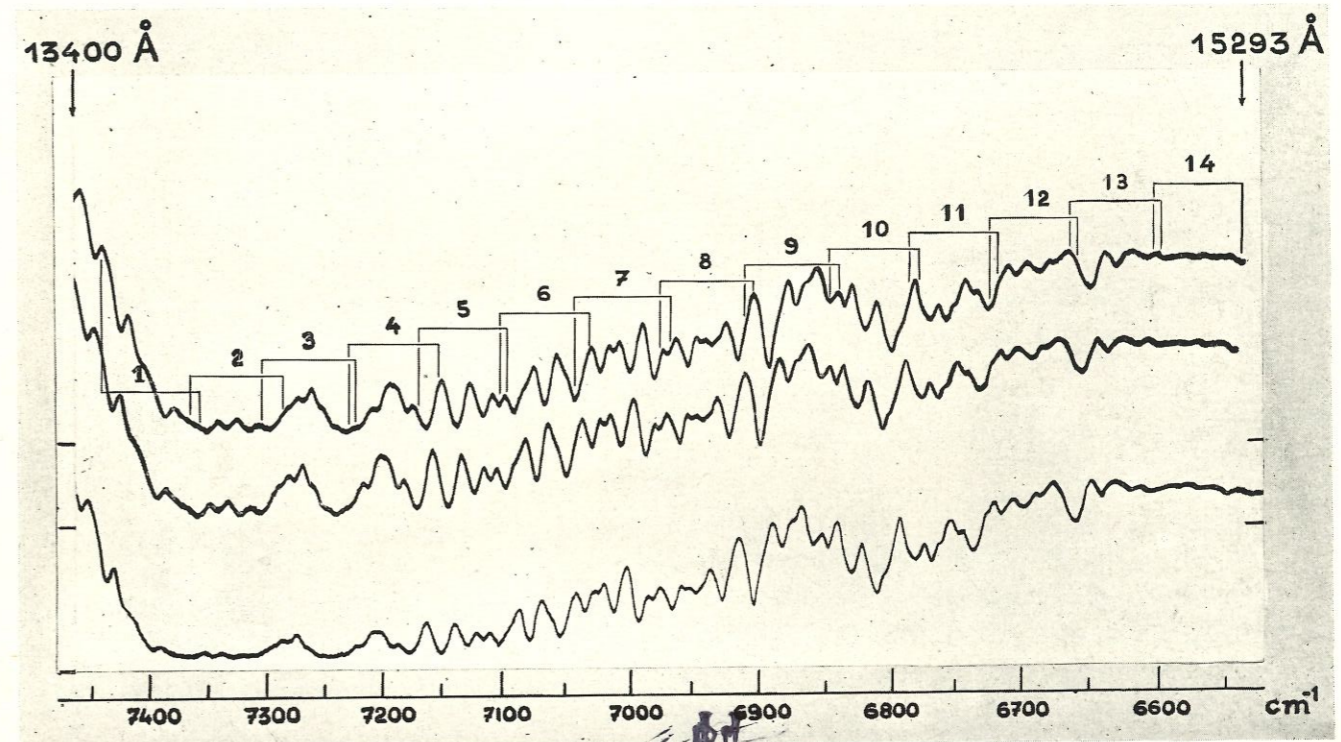


PLANCHE 26

Spectres du soleil.

Bologrammes de C. G. Abbot et H. B. Freeman obtenus à l'Observatoire du Mont Wilson en 1929.

Remarque : Chacune des régions numérotées 1 à 14 correspond respectivement aux enregistrements *a* des planches 11 à 24.

THESES ANNEXES

1. Contrairement aux exposés qu'en donnent certains auteurs, le changement de variables introduit par SCHWARZSCHILD dans la fonction iconal angulaire ne limite pas l'application de cette fonction aux petites ouvertures (cf. SCHWARZSCHILD, *Ast. Mit. der König. St. zu Göttingen*, p. 9, 1905).

*
**

2. La hauteur moyenne de la couche d'ozone atmosphérique peut être déterminée plusieurs fois par jour en effectuant des mesures d'intensité sur les bandes d'absorption de O_3 situées dans l'ultra-violet (3050 et 3110 Å) et dans l'infra-rouge ($9,6\mu$). [Travaux de J. STRONG.]

*
**

3. L'étude, à grande dispersion, de la bande de vibration-rotation de ND_3 , située à $13,4\mu$, permet de préciser les dimensions de la molécule d'ammoniac.
