

La lumière du ciel nocturne : d'après les recherches spectrographiques du Dufay et Cabannes (août 1933 - avril 1935)

Autor(en): **Cabannes, Jean**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **8 (1935)**

Heft V

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-110537>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La lumière du ciel nocturne

d'après les recherches spectrographiques de DUFAY et CABANNES
(août 1933—avril 1935)

Conférence présentée à la réunion de la Société suisse de Physique à Lausanne
le 4 mai 1935

par Jean Cabannes (Montpellier).

(1. VI. 35.)

I. Introduction.

La luminosité générale du ciel pendant les nuits sans lune nous éclaire plus que l'ensemble des étoiles visibles à l'œil nu. On a longtemps admis sans discussion que cette luminosité provenait intégralement des étoiles faibles. C'était une idée fausse. Il résulte des statistiques stellaires et des mesures photométriques précises de DUFAY¹⁾ qu'au-dessus des couches diffusantes de l'atmosphère la lumière des étoiles invisibles à l'œil nu ne représente que le tiers de la lumière totale du ciel nocturne. Il fallait donc chercher ailleurs l'origine de la part la plus importante de la lumière du ciel, et deux hypothèses se présentaient à l'esprit. On pouvait penser à une diffusion des rayons du soleil dans les espaces interplanétaires, diffusion produite par des électrons, des molécules ou des météorites; on pouvait penser aussi à une luminescence de la haute atmosphère rappelant plus ou moins les aurores boréales.

Lorsqu'on analyse avec un spectrographe la lumière complexe du ciel nocturne, la première radiation qui apparaisse sur plaque orthochromatique est la raie verte de l'oxygène 5577 Å ($^1D_2 - ^1S_0$), dite raie verte des aurores. En 1923, Lord RAYLEIGH obtint en outre, avec des poses comprises entre 50 et 200 heures, deux raies brillantes d'origine inconnue, auxquelles il attribua les longueurs d'onde 4435 et 4210 Å, qui se superposaient à un spectre continu coupé par les raies d'absorption *H* et *K*. A la même époque DUFAY obtenait à Montpellier en quelques dizaines d'heures des spectres continus coupés de raies sombres qu'il identifia avec le spectre solaire. Ainsi, dès le début de 1923, on pouvait attribuer une double origine à la luminosité du ciel nocturne: d'une part des phénomènes atmosphériques avec émission de la raie verte 5577 Å et des deux raies caractéristiques bleue et violette de

Lord RAYLEIGH, qu'on a pris l'habitude de désigner par X_1 et X_2 ; d'autre part une diffusion des rayons du soleil dans l'espace interplanétaire.

Plusieurs observateurs furent tentés par l'importance et peut-être aussi par la difficulté de ces recherches. De 1923 à 1933, Lord RAYLEIGH, DUFAY, Mc LENNAN, SLIPHER et SOMMER obtinrent d'importants résultats. Malheureusement ces efforts de dix ans furent un peu dispersés, et il est regrettable qu'une «réunion du ciel nocturne», analogue à la «réunion de l'ozone atmosphérique» qui eut lieu à Paris en 1929 sous la présidence de FABRY n'ait pas encore groupé tous les observateurs pour discuter les résultats acquis, élaborer un plan de recherches et distribuer le travail suivant les possibilités de chacun.

Pour ma part j'ai pu réunir au Pic du Midi (Pyrénées) en août 1933 quelques physiciens qu'intéressait l'étude du ciel nocturne et qui tous avaient été mes élèves. Nous avons alors décidé, DUFAY et moi, d'entreprendre, avec la collaboration de GARRIGUE et de GAUZIT, une nouvelle série de recherches. Cette collaboration a été féconde et nous avons obtenu en dix-huit mois des résultats nouveaux que je me propose d'exposer ici.

II. Réalisation d'un spectrographe très lumineux.

Le plus important de ces résultats a sans doute été de pouvoir obtenir régulièrement chaque nuit en quelques heures un spectre du ciel nocturne. Il fallait pour cela réaliser un spectrographe d'un type nouveau, spécialement adapté à l'étude du ciel nocturne, à la fois assez dispersif et extrêmement lumineux.

Un problème analogue s'était déjà posé en 1928 pour l'effet Raman, mais les ouvertures relatives (de $F/3$ à $F/4$), qui suffisent pour donner en quelques heures le spectre de diffusion d'un liquide, ne permettent pas de photographier en une nuit le spectre du ciel. Il fallait faire un nouveau bond et atteindre au moins $F/1$.

Pour avoir une dispersion linéaire suffisante avec une telle ouverture numérique, on dispose de deux moyens: soit augmenter la dispersion angulaire, c'est-à-dire le nombre des prismes, soit augmenter la distance focale de l'objectif de chambre, c'est-à-dire toutes ses dimensions.

La première solution présente un grave inconvénient: avec deux prismes, en effet, on double le nombre des réflexions obliques, ce qui affaiblit considérablement la lumière transmise; au minimum de déviation, d'après les formules de FRESNEL, un prisme

d'indice 1,65 ne laisse déjà passer que $\frac{1}{3}$ de la lumière incidente; deux prismes, à peine $\frac{1}{20}$.

La seconde solution présente au contraire le grand avantage de réduire la courbure du champ: il est évident qu'en doublant toutes les dimensions de l'objectif de chambre nous doublons aussi les rayons de courbure de la surface image en chacun de ses points.

L'objectif de mon spectrographe a été calculé et construit par COJAN, directeur technique de la Société générale d'Optique à Paris. Il accompagne un seul prisme extradense ($n_D = 1,6803$; $\nu = 32,1$). La largeur du spectre, de 4340 à 5893 Å, atteint 4,48 mm, avec une dispersion de 150 Å par mm au voisinage de 4340 Å; 400 Å par mm vers 5500 Å et 900 Å par mm vers 6500 Å. Le spectre est réparti sur une surface courbe dont la concavité est tournée vers la lumière, mais la courbure est assez faible pour permettre l'utilisation des plaques ordinaires. La planéité est assurée à $\pm 0,02$ mm près entre 4340 et 6500 Å; à $\pm 0,01$ mm près entre 4340 et 5900 Å.

Par ses dimensions exceptionnelles et sa grande ouverture relative l'objectif de COJAN représente quelque chose de nouveau; comme il a déjà été décrit ailleurs je ne reproduirai ici que ses caractéristiques essentielles: distance focale: $F = 80$ mm; ouverture relative: $F/0,7$; aberration longitudinale calculée: $F/800$ (pour les radiations 6563 et 4340 Å) et $F/4000$ (pour la radiation 4861 Å).

Mais le pouvoir de résolution réel est plus grand que ne le font prévoir les données précédentes. Cet heureux résultat provient certainement de la répartition favorable des intensités dans l'image de la fente et peut-être aussi de ce que les rayons marginaux interviennent peu dans la formation de l'image, l'objectif travaillant en réalité avec une ouverture un peu inférieure à $F/0,7$. Ainsi nous séparons les raies de l'arc au fer 4155–4157, 4459–4462, 5447–5455 Å.

Dans l'étude du ciel nocturne, pour augmenter l'éclairement en chaque point du spectre, nous prenons une fente relativement large (recouvrant un intervalle de 27μ dans le plan du spectre); mais nous réduisons ainsi le pouvoir de résolution du spectrographe. Le domaine spectral que nous avons exploré s'étend de 3800 à 8000 Å. Nous l'avons étudié en deux fois. Une première mise au point suffit pour tout l'intervalle 5000–8000 Å; une seconde, pour l'intervalle 3800–5100 Å. Par une heureuse coïncidence les radiations du ciel ont une origine différente dans l'un et l'autre de ces deux intervalles et les résultats obtenus dans chacun d'eux peuvent être étudiés séparément.

III. Spectre du ciel dans l'intervalle 5000—8000 Å.

En 1929, SLIPHER annonça de Flagstaff la découverte de nouveaux groupes de radiations dans les régions orangée et rouge du spectre, jusqu'alors inexplorées; il mesura les longueurs d'onde des plus importantes d'entre elles (5892, 6315, 6530, 6850, 7270 Å) et leur attribua une origine atmosphérique. Ces résultats furent confirmés par DUFAY et surtout par SOMMER qui obtint en septembre 1929, au mont Wilson, deux photographies sur lesquelles il put mesurer 33 raies entre 5200 et 7300 Å. Une vingtaine de ces raies sont données comme certaines.

Pour contrôler les observations de SOMMER j'ai photographié moi-même quelques spectres sur plaques sensibles au rouge et à l'infrarouge, soit au Pic du Midi (en août 1933), soit à Montpellier (en mai 1934 et en avril 1935). L'étude des clichés au comparateur donna 25 longueurs d'onde entre 5100 et 7800 Å; le dépouillement des courbes enregistrées au microphotomètre fait apparaître un beaucoup plus grand nombre de détails, mais il est difficile de distinguer, parmi les accidents de ces courbes, ceux qui correspondent réellement à une raie spectrale et ceux qui sont dûs à de légers défauts des clichés ou simplement à la distribution irrégulière des grains d'argent. Cependant ma liste de longueurs d'onde est d'accord, en gros, avec celle de SOMMER, et je vois dans cet accord la meilleure justification de nos deux séries de mesures. Les résultats essentiels de mon étude méritent d'être rappelés ici, malgré le caractère provisoire de quelques-uns d'entre eux. Dans l'intervalle spectral 5000—8000 Å on ne voit pas de fond continu, mais seulement un spectre d'émission constitué par un petit nombre de groupes de radiations d'origine atmosphérique. La lumière rouge du ciel nocturne provient donc d'une luminescence des couches élevées de l'atmosphère. Ainsi se trouvent résolues les difficultés auxquelles s'était heurté DUFAY en 1928 lorsqu'il n'envisageait pas autre chose qu'une diffusion de la lumière par des particules interplanétaires. Le ciel était trop rouge pour une diffusion par les molécules d'un gaz raréfié; il n'était pas assez polarisé pour une diffusion par des électrons libres. Mais, si une émission discontinue, d'origine atmosphérique, non polarisée et riche surtout en radiations rouges, vient s'ajouter à la diffusion interplanétaire, tout s'explique aisément et l'une ou l'autre des deux hypothèses de DUFAY (molécules et électrons) peut être reprise en considération.

La raie 5577 Å mise à part, mes spectres d'août 1933 et de mai 1934 sont des spectres de bandes dont la parenté avec les

spectres des aurores boréales est frappante. D'après VÉGARD, les maxima les plus importants des spectres des aurores sont en 5865 (13), 5950 (15), 6300 (28), 6590 (40). Les principaux maxima que nous avons observés dans le ciel, SLIPHER, SOMMER et moi, sont en 5888 (6), 5975 (3), 6314 (10), 6525 (7) et, sur plaques sensibles à l'infrarouge, 7250 et 7400 Å. On sait que VÉGARD a identifié les bandes jaunes, rouges et infrarouges des aurores à certaines bandes du premier système positif de l'azote. Etant donné l'analogie très marquée des deux spectres, j'ai pensé qu'on pouvait aussi chercher dans le ciel nocturne les bandes de ce même système, et j'ai cru y reconnaître avec certitude quelques-unes d'entre elles. On sait combien varient les intensités relatives des bandes d'une même suite dans le premier système positif de l'azote suivant le mode d'excitation et l'on peut s'expliquer ainsi l'écart entre les maxima du ciel et ceux des aurores.

Si l'on pousse plus loin l'identification, on trouve que le spectre du ciel est caractérisé par l'intensité exceptionnelle d'un petit nombre de bandes, ce qui le rapproche des spectres de phosphorescence de l'azote. Les particules lumineuses seraient donc des molécules d'azote très raréfiées préalablement portées au niveau *B* avec un quantum de vibration voisin, soit de 7, soit de 16. Ces molécules émettent les bandes observées dans le ciel, en revenant à l'état métastable *A* avec un quantum de vibration donné par la règle de FRANCK-CONDON.

Cependant, SOMMER avait cru reconnaître, dans le domaine spectral que nous étudions ici, non pas les bandes de l'azote, mais les bandes telluriques de l'oxygène et de la vapeur d'eau. En effet, dans mes spectres comme dans ceux de SOMMER, on trouve une bande d'émission vers 7600 et une autre vers 6900 Å, qui peuvent être identifiées avec les bandes *A* et *B* de l'oxygène. D'autre part nous constatons l'exacte coïncidence (étendue de la bande et position du centre de gravité) des bandes du ciel 7240—6970, 6525 et 5900 Å, qui sont parmi les plus intenses, avec les bandes telluriques *a*, *C* et *D* de la vapeur d'eau. C'est un phénomène très remarquable que l'apparition des raies de FRAUENHOFER dans le spectre du ciel nocturne, soit en absorption dans la partie la plus réfrangible du spectre, soit en émission dans la partie la moins réfrangible. Ainsi la raie *F* apparaît comme une raie sombre interrompant un fond brillant, tandis qu'une bande brillante, étroite et intense, de 5888 à 5906, recouvre exactement les raies *D*.

Si nous admettons la présence, dans la haute atmosphère, des molécules O^2 et H^2O , l'émission des bandes *A* et *B* de l'oxy-

gène et des bandes *a*, *C* et *D* de la vapeur d'eau paraît inévitable parce qu'elle n'exige qu'une très faible excitation. Mais nous ne pouvons pas encore décider définitivement si les fortes bandes 5888 et 6525 du ciel sont les bandes de vibration (1,4,0) et (1,3,1) de la molécule H²O ou les bandes (*A*₁₃ — *B*₁₆) et (*A*₄ — *B*₇) de la molécule N². Peut-être faut-il leur attribuer une double origine ?

Dans mes spectres de mai 1934 les raies rouges de l'atome d'oxygène (³*P*_{0,1,2} — ¹*S*₀) n'apparaissaient pas nettement: il n'y avait pas trace des composantes 6391 et 6364; quant à la composante la plus intense 6300, elle se distinguait mal de la bande large que j'ai déjà signalée plus haut et dont le maximum était voisin de 6314 Å. Ayant repris cette étude en avril 1935, j'ai obtenu, dans la nuit du 5 au 6 avril, avec une pose de 8^H 30^m, un

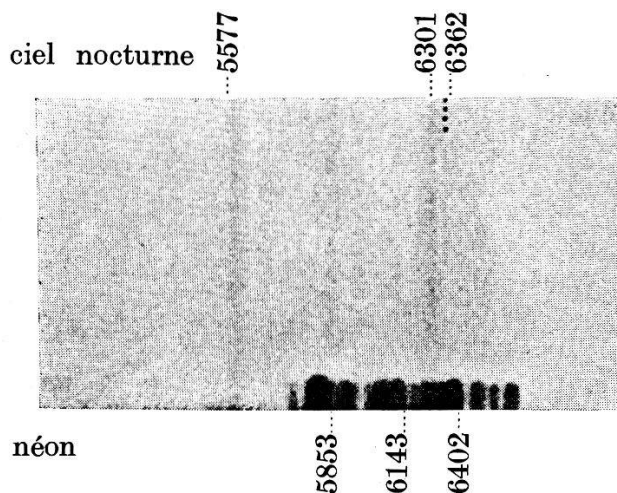


Fig. 1.

spectre où la principale composante du triplet rouge de l'oxygène a pris une intensité remarquable. J'ai pu mesurer avec précision sa longueur d'onde et j'ai trouvé $6301,4 \pm 0,6$ Å. La deuxième composante du doublet apparaît plus faiblement en 6361,7 (détermination moins précise). La troisième composante n'est pas visible. La fig. 1 est une reproduction très agrandie du cliché original sur lequel l'intervalle entre les raies 6300 et 6364 est à peine de 72 μ . Quelques raies du néon, dans le bas de la figure, permettent au lecteur de situer les raies du ciel. Résultat remarquable: dans ce spectre, obtenu sur plaque « hypersensitive Ilford », la raie rouge 6300 est plus intense que la raie verte 5577.

Contrairement à ceux de mai 1934, le spectre d'avril 1935 est essentiellement constitué par les raies vertes et rouges de OI. On y retrouve cependant quelques-unes des bandes primitivement observées; elles sont visibles aussi bien sur les agrandissements contrastés du cliché original que sur la courbe du microphoto-

mètre (fig. 2). La plus intense est la bande 5888—5907. On observe ensuite une émission plus étendue (et très visible sur la fig. 1) de 6230 à 6550: l'intensité globale de cette suite de bandes est peut-être supérieure à celle de la raie rouge de l'oxygène. Au total on distingue une dizaine de bandes dont voici les longueurs d'onde (avec un numérotage des intensités):

5610	5680	5735	5888	6001	6124	6230	6425	6536	6684.
1	1	0	10	2	2	3	3	5	2

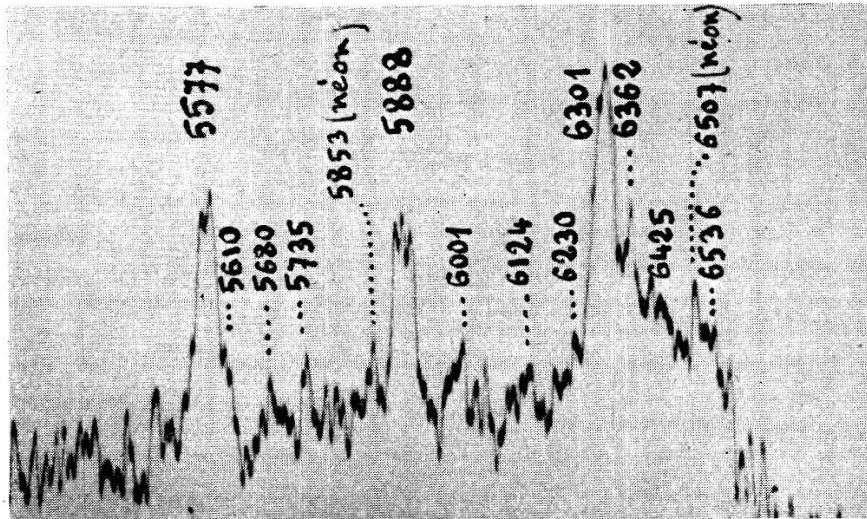


Fig. 2.

Quelques-unes de ces longueurs d'onde diffèrent assez sensiblement des déterminations antérieures, et c'est inévitable; on mesure en effet des impressions faibles et floues sur des clichés à gros grains. Cependant on reconnaît facilement dans ce tableau les bandes précédemment observées par SOMMER et par moi-même.

IV. Spectre du ciel dans l'intervalle 3800—5100 Å.

Cette région spectrale est limitée vers les petites longueurs d'onde par l'absorption du prisme de flint et vers les grandes, par le défaut de sensibilité des plaques « Fulgur » que nous avons adoptées pour profiter de leur très grande sensibilité dans le violet et dans le bleu. Ce n'est pas la première fois que l'on obtient ce spectre du ciel nocturne. En 1928—1929, SOMMER prit 50 clichés à Göttingen avec des poses de 8 heures environ: 18 ne donnèrent rien; 30 donnèrent uniquement la raie verte 5577 Å; mais sur 2 clichés apparurent, entre 3578 et 5577 Å, une quarantaine de raies qui coïncidaient avec les raies faibles observées par VÉGARD dans le spectre des aurores boréales. L'appareil de SOMMER, peu ouvert ($F/4$) ne pouvait être sensible qu'à une illumination exceptionnelle du ciel, produite par une aurore diffuse, mais

les spectres que nous obtenons régulièrement chaque nuit paraissent à première vue presque identiques à ceux de SOMMER. Seules les bandes du système négatif et du deuxième système positif de l'azote sont plus visibles et plus facilement identifiables dans les spectres de SOMMER que dans les nôtres, sans qu'elles y aient cependant la grande intensité relative qu'elles prennent dans les aurores boréales.

La même région spectrale a été plus tard étudiée et décrite par DUFAY qui retrouva les radiations de SOMMER et montra que l'émission de ce spectre est un phénomène constant. Mais les spectrographes de DUFAY, plus lumineux que celui de SOMMER, l'étaient cependant encore beaucoup moins que mon spectrographe actuel; il fallait poser plusieurs nuits (de 21 à 85 heures), tandis que l'on obtient actuellement le spectre du ciel nocturne dans le midi de la France en une seule nuit d'été. Mais DUFAY m'a fait profiter de sa longue expérience, et les résultats que je vais résumer ici ont été obtenus en collaboration avec lui.

Voici d'abord l'aspect général du spectre. Du côté des grandes longueurs d'onde le spectre est assez brusquement arrêté par le défaut de sensibilité des plaques photographiques. Entre 4900 et 4400 Å s'étend un fond continu assez intense auquel se superposent quelques groupements caractéristiques de raies ou bandes d'émission visibles à la loupe. Leurs longueurs d'onde paraissent être:

4838	bande étroite et intense
4719—4669 .	bande large et dédoublée
4616—4575 .	2 raies faibles; la seconde un peu plus intense
4554—4536 .	bande large ou groupe de bandes
4420	le groupe le plus intense, dégradé vers le rouge.

Lorsqu'on va vers les petites longueurs d'onde, l'intensité du fond continu diminue, d'abord lentement de 4400 à 4100 Å, puis beaucoup plus vite lorsqu'on arrive aux radiations très absorbées par le prisme. Au-dessous de 3900 Å il n'y a presque plus de lumière; on peut cependant suivre le spectre au-delà de 3800 Å sur certains enregistrements. Au fond continu qui s'étend de 4400 à 3900 Å se superposent de nouveaux groupements caractéristiques:

4385—4371 . .	raies ou bandes moyennement intenses
4328	raie fine
4279	groupe de bandes
4171	groupe intense, dégradé vers le rouge
4144	bande faible
4073	groupe étendu, moyennement intense.

Une reproduction très agrandie d'un des spectres montre bien l'aspect qu'ils ont à la loupe (fig. 3).

Lorsqu'on étudie les clichés, soit directement au microscope, soit après les avoir enregistrés au microphotomètre, on constate que la plupart des radiations que nous venons d'énumérer sont

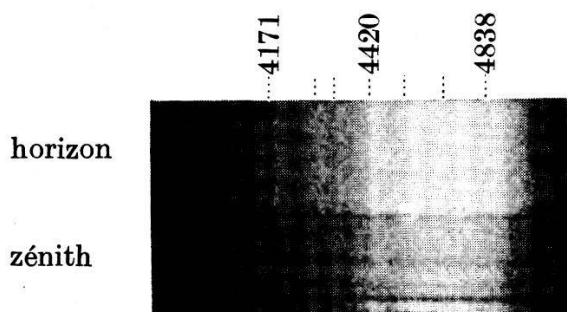


Fig. 3.

en réalité constituées par un certain nombre de raies ou bandes assez rapprochées. On observe en outre, entre ces groupes, des raies ou bandes d'émission plus faibles. Enfin le fond continu est coupé par les raies d'absorption du spectre solaire *F*, *G*, *h*, *H*, *K* (fig. 4).

Nous avons pris plus de cent clichés d'août 1933 à février 1935. Nous avons effectué des mesures au microscope sur 13

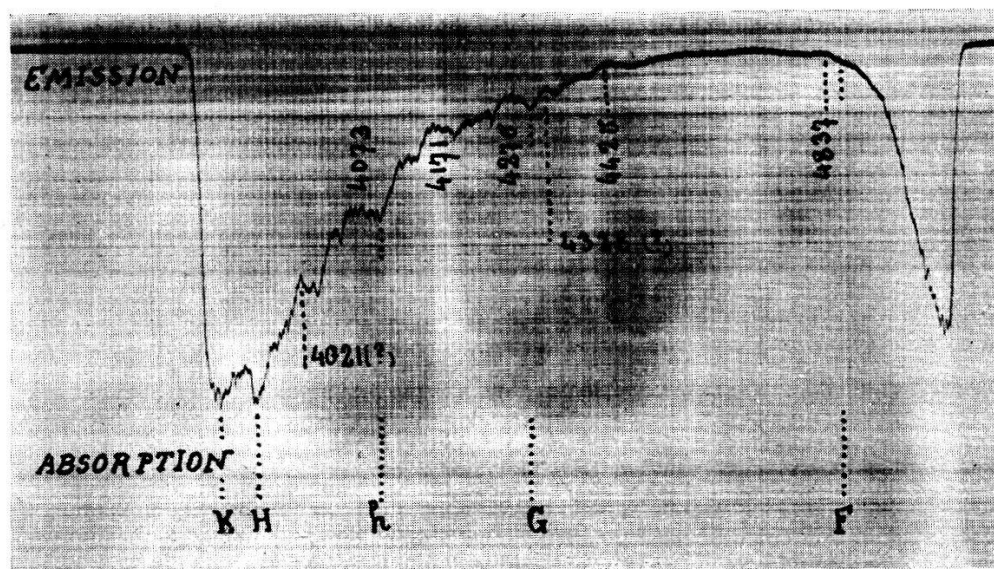


Fig. 4.

d'entre eux, choisis parmi les meilleurs. Cette étude nous a donné 78 longueurs d'onde entre 3900 et 5000 Å. Pour mieux connaître les détails des spectres, nous en avons enregistré un très grand nombre au microphotomètre et nous avons comparé les 34 courbes les meilleures. Nous avons tiré de cette comparaison une liste

*

des longueurs d'onde les plus probables et des intensités moyennes, qui est encore inédite.

Un problème difficile, c'était celui de l'origine des nombreuses radiations émises par le ciel nocturne entre 3000 et 5000 Å. La superposition de plusieurs spectres d'origine différente est un fait certain. Il suffit, pour s'en convaincre, d'observer simultanément le zénith et l'horizon: certaines radiations (généralement des bandes) disparaissent presque complètement au zénith tandis que d'autres (ce sont surtout des raies isolées) conservent une intensité mesurable en tous les points de la voûte céleste.

On sait que, dans la région spectrale que nous étudions ici, la lumière des aurores boréales est caractérisée par l'intensité exceptionnelle des bandes du système négatif et du deuxième système positif de l'azote. A ces bandes s'ajoutent un grand nombre d'autres radiations moins intenses. Or, ce sont ces faibles radiations des aurores qui constituent l'essentiel du spectre du ciel, où les bandes du système négatif et celles du deuxième système positif s'affaiblissent jusqu'à disparaître certaines nuits. Ces bandes auraient donc été difficiles à identifier si nous n'avions pas pu les suivre des spectres de VÉGARD à ceux de SOMMER, puis des spectres de SOMMER aux nôtres. Dans le ciel nocturne, ces bandes sont toujours plus faibles au zénith qu'à l'horizon nord et cette diminution d'intensité est beaucoup plus marquée que pour l'ensemble des autres radiations du ciel. On peut admettre que l'émission des bandes de l'azote qui caractérisent le spectre des aurores boréales est accidentelle dans le ciel et qu'elle a lieu surtout vers le nord: c'est la manifestation d'une faible aurore diffuse.

Dans le ciel nocturne l'excitation est donc insuffisante pour porter la molécule d'azote au niveau C et a fortiori pour l'ioniser. Mais nous avons vu que la partie la moins réfrangible du spectre du ciel était essentiellement constituée par une sélection de bandes du premier système positif de l'azote: les couches élevées de l'atmosphère contiennent donc des molécules d'azote au niveau métastable A . Il était donc naturel de chercher si l'on ne trouverait pas dans le spectre du ciel nocturne un système nouveau de bandes de l'azote, mettant en jeu des niveaux énergétiques moins élevés que les bandes des aurores boréales.

Les bandes X_1 et X_2 de Lord RAYLEIGH retiennent particulièrement l'attention: avec un spectrographe à optique de verre et des plaques photographiques ordinaires, elles apparaissent comme les plus intenses. Suivant la plus récente opinion de KAPLAN, il faut voir en X_1 et X_2 deux des bandes récemment

découvertes par VÉGARD et KAPLAN. Ces bandes de VÉGARD-KAPLAN ont été classées par Herzberg et leurs fréquences sont données par la formule

$$\nu = 49.774,4 + (1.446,46 v' - 13,93 v'^2) - (2.345 v'' - 14,445 v''^2)$$

La première parenthèse montre que l'état initial est l'état métastable A ; si d'autre part on fait $v'' = 1$ dans la seconde parenthèse, on trouve 2331 cm^{-1} , c'est-à-dire la fréquence Raman de l'azote: l'état final est donc l'état normal X de la molécule d'azote. Ce passage du niveau triple métastable A au niveau fondamental simple A est interdit par les règles ordinaires de sélection, c'est-à-dire que la transition $A \rightarrow X$ est peu probable; mais dans les hautes couches de l'atmosphère, où les chocs moléculaires sont

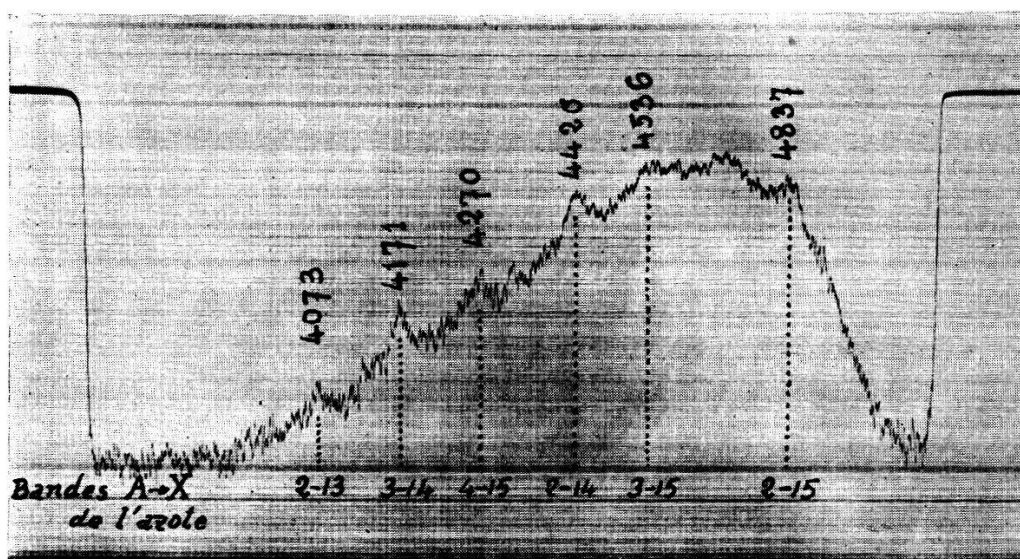


Fig. 5.

rare, les molécules A finissent par retourner à l'état X en émettant les bandes de VÉGARD-KAPLAN, comme les atomes d'oxygène 1S_0 et 1D_2 émettent les raies interdites 5577 et 6300—6364.

Il était intéressant de contrôler l'hypothèse de KAPLAN en utilisant l'ensemble de nos observations sur le spectre du ciel nocturne. Le résultat de ce contrôle est tout à fait remarquable. On trouve dans le ciel toutes les bandes de VÉGARD-KAPLAN dont le quantum initial v' est voisin de 2 et qui appartiennent aux suites $v'' - v' = 10, 11, 12, 13$. La fig. 5 montre l'importance de ces bandes dans nos spectres. Les principales radiations du ciel 4069, 4425, 4838; 4171, 4536; 4270 peuvent être identifiées avec les bandes 2—13, 2—14, 2—15; 3—14, 3—15; 4—15. Elles reçoivent ainsi une explication satisfaisante, et qui paraît définitive.

Pour avoir un accord meilleur il faudrait diminuer de 21 cm^{-1} le terme constant de la formule de HERZBERG, ce qui revient à abaisser de moins 0,003 volts le niveau A de la molécule d'azote que la formule d'HERZBERG fixe à 6,140 électrons-volts. Ce n'est rien, si l'on se rappelle qu'on avait adopté jusqu'ici, pour le niveau A , une valeur supérieure à 8 volts et que la découverte des bandes de VÉGARD-KAPLAN l'a brusquement diminuée de près de 2 volts.

Dans le spectre du ciel nocturne, à côté des bandes de VÉGARD-KAPLAN, nous observons un ensemble de radiations caractéristiques, qui ont plutôt l'aspect de raies que de bandes, et dont l'origine est encore inconnue. Les plus remarquables de ces raies sont les suivantes: 4002, 4014, 4021, 4052, 4299, 4328 et 4719 Å. Or, toutes ces raies se retrouvent dans les spectres des noyaux cométaire où BALDET leur attribue les longueurs d'onde 4002, 4014, 4021, 4052, 4301, 4329 et 4724 Å. D'ailleurs à chacune des 37 raies que donne BALDET comme caractéristiques de noyaux cométaires paraît correspondre une raie du ciel. Nous pouvons donc conclure que le spectre des noyaux cométaires se retrouve dans le ciel dont il constitue un des éléments les plus caractéristiques. Malheureusement nous n'en connaissons pas encore l'origine.

V. Variation annuelle de l'intensité des bandes X_1 et X_2 .

De décembre 1933 à fin janvier 1935, nous avons réussi 68 spectrogrammes, correspondant à autant de nuits claires et sans lune, sur lesquels nous avons pu mesurer l'intensité des bandes X_1 et X_2 . Les variations d'allure fortuite, qu'on constate d'une nuit à l'autre, ne parviennent pas à masquer une variation plus lente et plus régulière dont l'amplitude est aussi plus grande. Les courbes II et III de la fig. 6 font connaître les moyennes mensuelles des intensités des deux radiations X_1 et X_2 . L'époque des minima coïncide assez bien avec les passages de la Terre dans le plan de l'équateur solaire (4 juin et 8 décembre); l'époque des maxima, avec les deux plus grandes latitudes héliographiques du centre du Soleil ($\pm 7^{\circ}21'$ les 6 mars et 7 septembre). L'excitation des hautes couches de l'atmosphère est donc produite par des rayons corpusculaires émis par la zone des taches dont la latitude moyenne est $\pm 15^{\circ}$. Cette variation annuelle peut être rapprochée de celle, beaucoup plus faible, de la brillance du ciel mesurée par photographie en lumière totale (DUFAY, 1924—1925, courbe I). En supposant que le spectre continu ait une intensité constante et que les bandes varient toutes dans le même rapport, la comparaison des amplitudes observées simultanément en lu-

mière totale et sur une des bandes X_1 ou X_2 permet d'évaluer la part qui revient à l'ensemble des bandes d'émission dans la brillance photographique totale du ciel nocturne. On trouve le partage suivant (moyenne annuelle):

diffusion de la lumière du Soleil	0,45
rayonnement des étoiles faibles	0,30
luminescence de la haute atmosphère	0,25

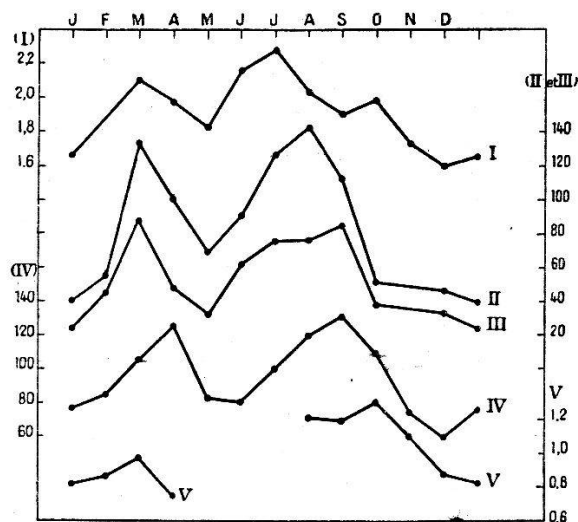


Fig. 6.

I, brillance du ciel nocturne au voisinage du pôle nord mesurée par photographie (1924—1925) (en étoiles de magnitude photographique 5,0 par degré-carré); II, intensité de la radiation 4420 (1934) (en unités arbitraires); III, intensité de la radiation 4173 (1934) (en unités arbitraires); IV, fréquence des aurores de basse latitude (à New-York, en 25 ans); V, intensité de la raie 5577 (à Terling, 1922 à 1928) (en unités arbitraires).

VI. Altitude des couches lumineuses.

Il suffit de placer un prisme à réflexion totale sur une moitié de la fente pour photographier simultanément les spectres venant du zénith et d'un point quelconque de l'horizon. Le rapport $\frac{B_H}{B_Z}$ entre l'intensité à l'horizon nord et l'intensité au zénith est voisin de 2,0 (pour la raie verte 5577) et de 1,5 (pour les bandes de VÉGARD-KAPLAN). Il y a deux explications possibles: ou la lumière est particulièrement intense au nord; ou elle vient d'une couche uniformément brillante, et dans ce cas la mesure du rapport $\frac{B_H}{B_Z}$ peut donner une idée de l'altitude où se produit la luminescence.

Or GARRIGUE, étudiant la raie verte au Pic du Midi, a pu suivre ses variations d'intensité au cours d'une nuit en différents points du ciel. Il trouva que l'intensité à l'horizon nord et l'intensité à l'horizon sud suivent une marche parallèle et que le

rapport $\frac{B_N}{B_S}$ reste voisin de 1,2. Ce n'est qu'exceptionnellement que la raie verte devient beaucoup plus intense à l'horizon nord. Nous avons donc admis, en première approximation, que la répartition de la brillance est uniforme et, dans l'hypothèse d'une couche luminescente mince, nous en avons cherché l'altitude.

En tenant compte autant que possible de la diffusion et de l'absorption de la lumière par les couches basses de l'atmosphère, nous avons été conduits à une altitude comprise entre 200 et 300 km, nettement supérieure à l'altitude la plus fréquente des aurores boréales. La raie verte serait émise un peu plus haut que les bandes bleues, bien que le rapport brut $\frac{B_H}{B_Z}$ soit plus grand pour la raie verte. Cette apparente anomalie provient de ce que l'absorption atmosphérique horizontale est moins importante dans le vert que dans le bleu.

VII. Conclusions.

La variation annuelle de l'intensité des bandes de VÉGARD-KAPLAN a montré que la luminescence du ciel nocturne était excitée par le rayonnement électronique du Soleil. Mais les électrons rapides qui viennent du Soleil n'agissent pas directement. En effet ils enveloppent la Terre à une altitude voisine d'un rayon terrestre (STÖRMER); or la luminescence du ciel a lieu dans des couches beaucoup moins élevées. Il faut donc imaginer, avec DAUVILLIER, une ionisation des plus hautes couches par les électrons à grande vitesse et faire intervenir ensuite les électrons secondaires ainsi libérés. Ces électrons secondaires s'enroulent autour des tubes de force du champ magnétique terrestre et pénètrent dans les couches plus basses qu'ils illuminent.

Leur énergie ne dépasse guère 7 volts, ce qui réduit les possibilités d'excitation aux suivantes: les molécules d'azote sont portées au niveau métastable A avec un quantum de vibration voisin de 2 ou 3 (6,49 ou 6,66 volts) et les molécules d'oxygène sont dissociées en deux atomes normaux (5,09 volts) ou en un atome normal et un atome métastable 1D_2 (7,05 volts). Mais, étant donné la rareté des chocs, la plupart de ces atomes d'oxygène ne se recombineront pas, et de nouveaux électrons vont les porter au niveau métastable 1S_0 . Les molécules excitées sont donc des *molécules* d'azote A et des *atomes* d'oxygène 1D_2 ou 1S_0 . Leur nombre est d'ailleurs faible par rapport au nombre des molécules normales d'azote et des atomes normaux d'oxygène. En effet une excitation électronique de ces états métastables doit faire

apparaître des bandes de l'azote et des raies de l'oxygène qu'on n'observe pas ou qu'on observe très faiblement dans le ciel.

Si donc nous admettons que la probabilité est la même pour qu'un choc électronique donne $N^2(A)$ ou $O(^1S_0)$ à partir d'une molécule d'azote ou d'un atome d'oxygène — ce qui est une hypothèse assez grossière —, le nombre des particules $N^2(A)$ et $O(^1S_0)$ qui vont se former et se détruire, en émettant les bandes de VÉGARD-KAPLAN ou les raies interdites de l'oxygène, est proportionnel au nombre des molécules d'azote et des atomes libres d'oxygène de la couche luminescente. Or il semble résulter des mesures photométriques que l'ensemble des bandes de VÉGARD-KAPLAN est en moyenne 4 fois plus intense que la raie verte 5577, ce qui donne 3 fois plus de molécules d'azote que d'atomes libres d'oxygène. Les $\frac{2}{3}$ de l'oxygène de la couche luminescente seraient donc à l'état atomique. Ce rapport est d'ailleurs un minimum parce que les atomes 1S_0 peuvent aussi revenir *directement* à l'état initial 3P , sans émettre la raie verte.

Nous comprenons maintenant la phosphorescence du ciel nocturne. Dans les couches les plus élevées, où les chocs sont très rares, les molécules métastables d'azote et les atomes métastables d'oxygène reviennent à l'état fondamental en émettant des radiations «interdites». C'est le phénomène de BOWEN, qu'on a observé dans les nébuleuses, les novæ, la couronne solaire et d'une manière générale dans toutes les atmosphères ultrararéfiées. S'il existe des molécules d'oxygène excitées $^1\Sigma$, elles vont émettre de même les bandes telluriques en revenant à l'état fondamental $^3\Sigma$.

Mais, dans les couches plus basses, les chocs peuvent intervenir et produire un second groupe de phénomènes de luminescence. Supposons qu'une molécule $N^2(A_2$ ou $A_3)$ rencontre un atome d'oxygène métastable 1S_0 ou 1D_2 ; elle pourra recevoir du premier une énergie équivalente à 4,18 ou 2,23 électrons-volts; du second, une énergie équivalente à 1,96 électrons-volts. Elle sera donc portée au niveau B avec un quantum de vibration voisin de 18 ou voisin de 7 et elle émettra une sélection des bandes du premier système positif. De même, par choc contre un atome d'oxygène excité, une molécule de vapeur d'eau pourra émettre tout son spectre de vibration. En particulier le choc $O(^1D_2) + H^2O(0,0,0)$ donnera $O(^3P) + H^2O(3,1,1)$, l'énergie acquise par la molécule H^2O étant à peine inférieure à celle que possédait l'atome $O(^1D_2)$. On comprend ainsi comment la bande tellurique α de la vapeur d'eau (6324 Å), si faible en absorption dans le ciel diurne, peut devenir intense en émission dans le ciel nocturne.

Index bibliographique.

- 1) Bulletin de l'Observatoire de Lyon, **10** (1928), p. 1.
 - 2) Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, **198** (1934), p. 306; **198** (1934), p. 1398; **198** (1934), p. 2132; **199** (1934), p. 909; **200** (1935), p. 878; **200** (1935), p. 1504.
 - 3) Journal de Physique, **4** (1933), p. 221; **5** (1934), p. 601; **5** (1934), pp. 523 et 527.
-