



**HAL**  
open science

## Sur l'origine des radiations émises par le ciel nocturne dans l'intervalle spectral 5 000-8 000 Å

Jean Cabannes

► **To cite this version:**

Jean Cabannes. Sur l'origine des radiations émises par le ciel nocturne dans l'intervalle spectral 5 000-8 000 Å. Journal de Physique et le Radium, 1934, 5 (12), pp.601-613. 10.1051/jphys-rad:01934005012060100 . jpa-00233282

**HAL Id: jpa-00233282**

**<https://hal.science/jpa-00233282>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## SUR L'ORIGINE DES RADIATIONS ÉMISES PAR LE CIEL NOCTURNE DANS L'INTERVALLE SPECTRAL 5 000-8 000 Å

Par JEAN CABANNES.

(Faculté des Sciences de Montpellier).

**Sommaire.** — Ce travail fait partie d'une série de recherches sur la composition spectrale de la lumière du ciel nocturne entreprises à Lyon, à Montpellier et au Pic du Midi avec la collaboration de MM. Dufay, Garrigue et Gauzit. J'analyse ici la partie la moins réfrangible du spectre, de 5 000 à 8 000 Å. On y trouve un spectre discontinu d'origine atmosphérique, identique à celui des aurores boréales avec prédominance des radiations 5 577 et 6 314 Å, communément appelées raies verte et rouge des aurores. En dehors de la raie 5 577 attribuée à l'atome O I, ce spectre paraît essentiellement constitué par le premier système positif de l'azote, les bandes telluriques de l'oxygène et le spectre de vibration de la molécule H<sub>2</sub>O. J'explique théoriquement les principales particularités de ce spectre.

**1. Introduction.** — Dans une note <sup>(1)</sup> communiquée le 11 juin dernier à l'Académie des Sciences, j'ai déjà publié la liste des radiations que j'ai pu observer dans la lumière du ciel nocturne entre 5 000 et 8 000 Å et donné quelques indications sur leur origine probable. Le lecteur trouvera ici un exposé plus complet de ces observations et une étude critique des résultats qu'on peut en tirer.

Depuis longtemps déjà, la radiation de longueur d'onde 5 577 Å, communément appelée *raie verte des aurores polaires* ou plus simplement encore raie de l'aurore, a été retrouvée et systématiquement étudiée dans la lumière du ciel nocturne. Les premières observations de cette raie datent de Wiechert <sup>(2)</sup> (1802) et elles ont été continuées plus tard par Campbell, Lord Rayleigh, Slipher, Babcock, Mc Lennan et Garrigue.

En 1929, Slipher <sup>(3)</sup> annonça de Flagstaff la découverte de nouveaux groupes de radiations dans les régions orangée et rouge du spectre, jusqu'alors inexploitées ; il mesura les longueurs d'onde des plus intenses d'entr'elles

5892,      6315,      6530,      6850,      7270 Å

et leur attribua une origine atmosphérique. Dufay <sup>(4)</sup> retrouva à Lyon, en 1932, les radiations 5 892 et 6 315 Å et découvrit deux nouvelles raies vertes en 5 316 et 5 662 Å. Mais la précision de toutes ces mesures était insuffisante pour permettre l'identification des raies ou bandes observées.

Les résultats les plus importants jusqu'ici sont ceux de Sommer <sup>(5)</sup> qui obtint au mont Wilson, en septembre 1929, deux photographies sur lesquelles il put mesurer 33 raies entre 5 265 et 7 280 Å. Une vingtaine d'entre elles sont données comme certaines. L'intervalle spectral 5 265-7 280 occupe une longueur de 4,9 mm sur les clichés de Sommer et les raies y sont pointées à 1 μ près, ce qui correspondrait à une précision de 1 Å environ dans la mesure des longueurs d'onde. En réalité,

l'erreur, dans ces mesures, ne paraît pas dépasser un assez petit nombre d'angströms, ce qui est excellent.

**2. Nouvelles observations.** — Il est bien évident que les deux seuls clichés de Sommer étaient insuffisants pour permettre une conclusion définitive sur l'origine des radiations émises. J'ai donc repris ces recherches avec un nouveau spectrographe que J. Cojan, Directeur technique de la Société générale d'Optique à Paris, a bien voulu construire à ma demande pour l'étude du ciel nocturne. Ce spectrographe est plus lumineux, mais un peu moins dispersif que celui de Sommer ; l'étendue spectrale précédemment envisagée, occupe sur les clichés 4,6 mm au lieu de 4,9 mm. L'appareil a déjà été brièvement décrit par Dufay et moi dans une note à l'Académie des Sciences <sup>(6)</sup> ; plus récemment, à l'une des réunions de l'Institut d'Optique de Paris <sup>(7)</sup>, Cojan, après une étude critique des spectrographes à grande luminosité déjà construits en Angleterre et en Amérique, a montré comment il était arrivé à la solution actuelle du problème. Je reviendrai moi-même plus longuement dans un article ultérieur sur la description de mon spectrographe, ses qualités optiques et les services qu'il m'a déjà rendus. Je ne veux indiquer dans cet article que les points essentiels.

Ce spectrographe est caractérisé non seulement par la grande ouverture relative ( $F/0,7$ ), mais encore par les grandes dimensions ( $F = 80$  mm) de l'objectif de chambre. Un seul prisme de 60° en flint extradense ( $n_D = 1,6803$ ,  $\nu = 32,1$ ) donne dans ces conditions une dispersion suffisante et l'on évite dans une certaine mesure la courbure du champ de l'image que ferait apparaître une augmentation de la dispersion *angulaire*. Naturellement, les dimensions du prisme sont grandes (115 mm de hauteur et 205 mm de base), mais la maison Parra-Mantois fournit actuellement sans difficulté de grosses pièces de verre bien homogène. Etant donné ses grandes dimensions, l'objectif de chambre doit être particulièrement bien corrigé : en

effet, les aberrations zonales résiduelles sont proportionnelles à la distance focale et il n'y aurait évidemment aucun intérêt à augmenter la distance focale si l'on diminuait en même temps la netteté de l'image; la netteté doit être aussi bonne qu'avec un objectif de distance focale plus courte. Pour la radiation 6500 Å, l'aberration zonale résiduelle, calculée par Cojan, ne dépasse pas 1/800 de la distance focale, ce qui donne, pour l'image d'une fente infiniment fine éclairée par une lumière rigoureusement monochromatique, une largeur totale de  $F/0,7 \times 1/800 = 1/7$  mm. En réalité, le pouvoir de résolution, limité dans ce spectrographe par les aberrations de l'objectif, est environ cinq fois plus grand (on peut séparer deux raies distantes sur le cliché de 1/30 ou 1/40 de mm); on en conclut que les rayons marginaux n'interviennent pas dans l'éclairage de l'image, ou encore que l'objectif travaille en réalité avec une ouverture *un peu* inférieure à  $F/0,7$ .

L'appareil a été étalonné avec les spectres du fer et du néon. La longueur d'onde  $\lambda$  (en angströms) d'une raie de l'intervalle 5000-8000 Å est donnée en fonction de sa distance  $n$  (en millimètres) à la raie du néon 5853 Å par la formule

$$\lambda = 2137 + \frac{22420}{6,033 - n}.$$

Cette formule donne immédiatement la distance de la raie de l'aurore 5577 à la raie 5853. Dès lors, pour la détermination des radiations du ciel nocturne, il n'est plus nécessaire de superposer chaque fois un spectre de comparaison au spectre à étudier: il suffit de mesurer les distances de chaque nouvelle raie du ciel à la raie de l'aurore pour avoir leurs longueurs d'onde.

Les pointés ont été faits, soit directement sur le cliché avec un comparateur Beaudoin, soit après enregistrement au microphotomètre Zeiss. Sur l'enregistrement, les distances des raies sont multipliées par vingt, mais elles ne peuvent être déterminées qu'à un dixième de millimètre près: la précision des mesures faites sur l'enregistrement paraît donc un peu moins bonne que celle des mesures directes sur le cliché, où l'on arrive à pointer *une raie* à un ou deux microns près. Mais sur l'enregistrement apparaissent des détails que ne donne pas l'étude directe du cliché au microscope et l'on sait mieux ce que l'on pointe. En outre, il est bon de pouvoir comparer d'un coup d'œil les différents spectres obtenus au cours de différentes nuits, pour justifier, par exemple, l'existence d'une raie douteuse, et cette comparaison exige des enregistrements très amplifiés. En définitive, sur 70 raies observées et mesurées de 5015 et 8330 Å, je n'en ai obtenu que 25 au comparateur; ce sont, il est vrai, les plus importantes et les plus sûres.

A partir de la formule donnée plus haut, en admettant que la précision des pointés et la largeur occupée par chaque raie restent constantes dans tout le spectre, il est facile de calculer, pour chaque région du spectre, l'erreur commise dans la mesure des longueurs d'onde

et le plus petit intervalle spectral résoluble. On trouve que l'incertitude des mesures passe de quelques angströms à quelques dizaines d'angströms du vert à l'infrarouge. Quant au pouvoir de résolution, il varie dans le même intervalle de 5 à 40 Å environ.

Telles sont les conditions dans lesquelles j'ai pris cinq clichés. Le premier (P.15) a été obtenu au Pic du Midi, en collaboration avec Dufay, sur plaque crypta Guillemot, en 16 h. 55 m., du 17 au 20 août 1933. On sait que les plaques crypta sont sensibles aux radiations du proche infrarouge jusque vers 9000 Å: la plus grande longueur d'onde mesurée sur le cliché P. 15 est 8330 Å. Ces plaques sont d'ailleurs caractérisées par trois maxima de sensibilité vers 4500, 5550 et 7500 Å, avec une énorme diminution de la sensibilité de 5900 à 6200: j'ai cependant obtenu sur le cliché P. 15 les principales radiations rouges émises par le ciel dans l'intervalle de faible sensibilité, ce qui montre combien ces radiations sont intenses.

Les autres poses ont été faites à Montpellier sur plaques hypersensitives Ilford, sensibles au vert, au jaune et au rouge. En voici l'énumération:

|      |                      |                         |
|------|----------------------|-------------------------|
| M.51 | du 11 au 12 mai 1934 | durée de pose: 6 h 30 m |
| M.52 | du 12 au 13 mai 1934 | 6 h 30 m                |
| M.53 | du 13 au 15 mai 1934 | 12 h 45 m               |
| M.54 | du 15 ou 16 mai 1934 | 6 h 15 m.               |

Toutes ces photographies ont été prises par très beau temps. C'est le cliché M.52 qui a fourni le meilleur spectre.

Etant donné que l'objectif photographique à cause de ses aberrations donne, d'une fente infiniment fine, une tache de diffraction de largeur finie, on augmente l'intensité lumineuse en chaque point de cette tache en prenant une fente relativement large. J'ai adopté une largeur de 0,2 mm: le collimateur ayant une distance focale de 600 mm, cette largeur est réduite à 27 $\mu$ . dans le plan focal de l'objectif de chambre.

**3. Résultats.** — Le simple examen des spectres à la loupe donne des renseignements intéressants: *on ne voit pas de fond continu mais seulement un petit nombre de groupes de raies ou bandes d'émission.* Sur plaques crypta apparaissent à première vue, outre la raie verte 5577, deux fortes bandes dans l'extrême rouge vers 7250 et 7400 Å et une bande plus faible vers 5670. Sur plaque hypersensitive, la raie 5577 est suivie, du côté des grandes longueurs d'onde, de la faible bande 5670, puis d'un premier groupe de deux bandes vers 5890-5975, enfin d'un second groupe de deux bandes vers 6315-6525. Les radiations visibles les plus intenses dans le ciel ont pour longueurs d'onde 5577 et 6314; on sait que ce sont aussi les deux radiations caractéristiques verte et rouge des aurores boréales découvertes, la première par Angström en 1867, la seconde par Zöllner en 1876. Il existe d'ailleurs entre elles une remarquable différence d'aspect: *seule la radiation 5577 apparaît comme une*

raie fine. Toutes les autres radiations sont floues, et le contraste est frappant.

Pour obtenir des spectrogrammes avec des poses aussi courtes j'ai dû développer les plaques à fond dans un révélateur à base de soude caustique. Cependant, dans l'examen sommaire à la loupe, les principales raies ou bandes n'apparaissent que très faiblement sur le voile chimique général. Aussi faut-il insister ici sur les bons résultats que m'a donnés, malgré l'imperfection des clichés, leur enregistrement au microphotomètre Zeiss.

La figure 1 reproduit une partie d'un enregistrement du spectre M.53, fait en mai. J'y ai inscrit les longueurs d'ondes des principales radiations. Les distances entre les raies spectrales sont exactement multipliées par 20 sur l'enregistrement original ; en outre, pour la reproduction, cet enregistrement a été agrandi environ 1,7 fois. On y voit apparaître de nombreux détails que ne donnait pas l'examen direct du cliché au microscope.

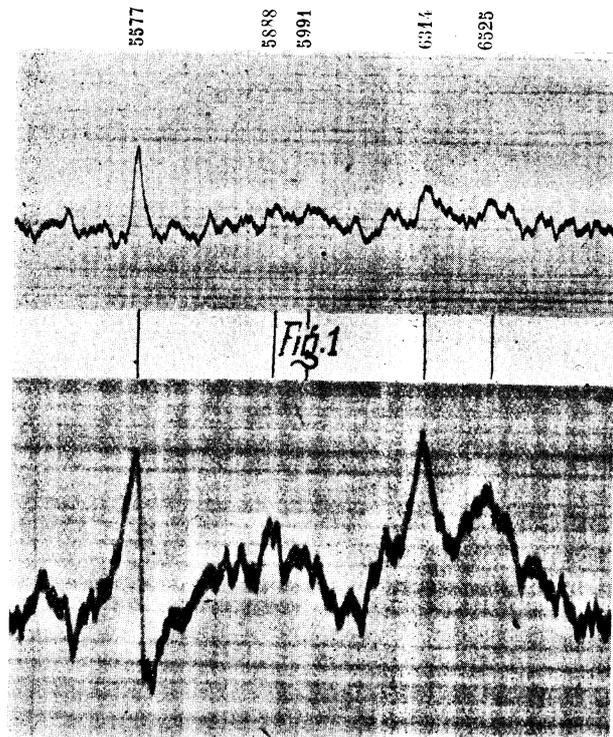


Fig. 2.

On peut encore accentuer les principaux détails en enregistrant les clichés avec une moindre amplification (7, par exemple, au lieu de 20) et en agrandissant davantage l'enregistrement obtenu. C'est ainsi qu'on est arrivé à la figure 2, à partir d'un nouvel enregistrement du spectre M.53, fait en octobre. Les raies caractéristiques verte et rouge du ciel et des aurores y sont très belles. Les deux enregistrements ont été faits dans des conditions de sensibilité ana-

logues ; la fente du microphotomètre éclairait dans le spectre une intervalle de 25 $\mu$  (fig. 1) et de 30 $\mu$  (fig. 2).

Parmi les accidents des courbes enregistrées, certains sont dus à de légers défauts du cliché ou à la distribution irrégulière des grains d'argent réduit ; mais la comparaison de plusieurs courbes obtenues dans des conditions variées à partir d'un même spectre, et celle de courbes provenant de différents spectres, montrent généralement assez bien, parmi ces accidents, ceux qui proviennent réellement d'une raie spectrale.

TABLEAU I.

Radiations observées dans l'intervalle 5000-8400 Å.

| MICROSCOPE | ENREGISTREMENT | MICROSCOPE | ENREGISTREMENT | MICROSCOPE | ENREGISTREMENT |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
|            | 5016 2         |            | 5821 3         |            | 6703 2)        |
|            | 5039 2         | 5839 {     | 5861 5)        |            | 6739 2)        |
|            | 5062 2         | 5890 {     | 5888 6)        | 6758 {     | 6773 2)        |
|            | 5083 4         |            | 5949 3)        |            | 6802 2)        |
|            | 5124 0         |            | 5958 0)        |            | 6877 2)        |
| 5160       | 5153 0         | 5975 {     | 5991 3)        | 6914       | 6907 4)        |
|            | 5185 0         |            | 6041 0)        | 6980       | 6966 4)        |
|            | 5217 0         |            | 6073 2)        |            | 7042 2)        |
|            | 5253 3)        | 6113 {     | 6091 2)        |            | 7096 2)        |
|            | 5290 0)        |            | 6124 2)        |            | 7134 4)        |
|            | 5324 0         |            | 6166 0)        | 7250 {     | 7240 5)        |
| 5344       | 5343 4         |            | 6200 2)        |            | 7278 5)        |
|            | 5382 0         |            | 6223 0)        |            | 7362 2)        |
|            | 5410 1)        | 6285 {     | 6269 3)        | 7445 {     | 7405 10)       |
|            | 5440 3)        |            | 6300 4)        |            | 7462 5)        |
| 5475       | 5475 0)        |            | 6314 10)       |            | 7530 3)        |
| 5509       | 5505 4)        | 6341       | 6349 3)        |            | 7608 5)        |
| 5532       | 5532 0         |            | 6407 1)        |            | 7633 0)        |
| 5577       | 5577 20        | 6470       | 6468 4)        | 7750       | 7750 3)        |
| 5639       | 5646 3)        | 6516       | 6525 7)        |            | 7865 1)        |
| 5698       | 5698 2)        | 6585       | 6583 5)        |            | 7930 2)        |
|            | 5739 2         |            | 6607 0)        |            | 8010 4)        |
| 5770       | 5775 5         | 6662       | 6663 0)        |            | 8140 2)        |
|            |                |            |                |            | 8330 4)        |

L'examen direct des clichés au microscope et leur étude au microphotomètre ont donné les longueurs d'onde contenues dans le tableau I. Elles diffèrent très peu de celles que j'avais déjà publiées (1), après une première étude. J'y ai grossièrement numéroté les intensités de 0 à 20. Une accolade réunit les radiations qui forment un groupe caractéristique. Les groupes les plus intenses sont indiqués par une double accolade.

Le tableau II montre la concordance de mes mesures avec celles de Sommer. Les radiations les plus intenses ont été trouvées au mont Wilson en 1929 et à Montpellier en 1934 avec des longueurs d'onde assez voisines. Il y a cependant quelques différences notables entre les deux séries de résultats : les raies 5646-5698 Å ont été données par Sommer en 5682-5716 ; d'autre part je ne trouve pas chez Sommer les raies 6269, 6802, 7134 auxquelles j'ai attribué les intensités 3, 2 et 4. Enfin je n'observe pas la forte raie 6860 (6) de Sommer. Mais la différence la plus importante est relative à la radiation rouge des aurores polaires. Sommer donne les longueurs d'onde 6298 (7) et

6363 (2) qui sont celles de l'atome d'oxygène  $^3P_2$  —  $^1D_2$  et  $^3P_1$  —  $^1D_2$ . Or je ne trouve rien en 6363; quant à la raie 6300, à laquelle j'attribue un peu arbitrairement l'intensité 4, elle se distingue mal sur mes clichés d'une bande large et plus intense dont le maximum est en 6314. Ce maximum, dont j'ai pu déterminer la longueur d'onde avec soin à partir de la raie 5577, est bien visible sur les figures 1 et 2.

TABLEAU II. — *Comparaison des mesures actuelles et des mesures de Sommer.*

| CABANNES   | SOMMER  | CABANNES   | SOMMER | CABANNES   | SOMMER |
|------------|---------|------------|--------|------------|--------|
| 5016 2     |         | 5821 3     | 5816 4 | { 6703 2 } |        |
| 5039 2     |         | { 5861 5 } | 5857 0 | { 6739 2 } | 6721 0 |
| 5062 2     |         | 5888 6     | 5888 9 | { 6773 2 } | 6761 4 |
| 5083 4     |         | { 5919 3 } | 5936 2 | 6802 2     |        |
| 5124 0     | 5130 3  | 5938 0     |        | { 6877 2 } | 6860 6 |
| 5153 0     |         | 5991 3     | 5992 3 | { 6907 4 } |        |
| 5185 0     |         | 6041 0     |        | { 6966 4 } | 6940 2 |
| { 5217 0 } |         | { 6073 2 } |        | 7042 2     |        |
| { 5253 3 } | 5265 1  | 6091 2     | 6090 0 | 7096 2     |        |
| { 5290 0 } |         | { 6124 2 } | 6115 2 | 7134 4     |        |
| 5324 0     | 5314 1  | 6166 0     |        | { 7200 5 } |        |
| 5343 4     |         | { 6200 2 } | 6207 2 | { 7278 5 } | 7280 4 |
| 5382 0     | 5360 2  | { 6223 0 } | 6229 3 | { 7362 2 } |        |
| { 5410 1 } |         | 6269 3     |        | 7405 10    |        |
| { 5440 3 } | 5448 2  | { 6300 4 } | 6298 7 | 7462 5     |        |
| { 5475 0 } | 5477 2  | 6314 10    |        | { 7530 3 } |        |
| 5505 4     | 5508 1  | { 6349 3 } | 6363 2 | 7608 5     |        |
| 5532 0     | 5539 0  | 6407 1     | 6421 2 | { 7633 0 } |        |
| 5577 20    | 5577 10 | { 6468 4 } | 6479 4 | 7750 3     |        |
|            | 5620 0  | { 6525 7 } | 6528 7 | 7865 4     |        |
| { 5646 3 } | 5622 2  | { 6583 5 } | 6582 3 | 7930 2     |        |
| { 5698 2 } | 5716 3  | 6607 0     |        | 8010 4     |        |
| 5739 2     |         | 6663 0     | 6663 4 | 8140 2     |        |
| 5775 5     | 5775 2  |            |        | 8330 3     |        |

Il est particulièrement important de comparer le spectre du ciel nocturne à celui des aurores polaires. Nous avons pour cela une analyse spectroscopique déjà ancienne de la lumière des aurores boréales par Gyllenskiöld (8) et des observations beaucoup plus récentes de Végard (9) et de Végard et Harang (10). Dans le tableau III, en regard des radiations du ciel nocturne, on trouvera celles des aurores. Les premières sont dans les colonnes C; les secondes dans les colonnes G (Gyllenskiöld) et VH (Végard et Harang).

La région 6800-7200 Å ne paraît pas avoir été étudiée par Végard: il mesura les longueurs d'onde inférieures sur plaques panchromatiques, les longueurs d'onde supérieures sur plaques sensibles à l'infrarouge et négligea l'intervalle en question. Mais, cet intervalle mis à part, le tableau III montre l'identité des radiations émises par le ciel et par les aurores boréales. Une analyse spectrale approfondie n'était d'ailleurs pas nécessaire pour établir la parenté des deux spectres dans le jaune et dans le rouge. Une rapide inspection des spectres du ciel révèle un petit nombre de groupes caractéristiques retrouvés par les différents chercheurs:

|                    |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Slipher . . . . .  | 5892 | »    | 6315 | 6530 | 6850 | 7270 | »    |
| Sommer . . . . .   | 5888 | »    | 6300 | 6528 | 6863 | 7280 | »    |
| Dufay . . . . .    | 5892 | »    | 6315 | »    | »    | »    | »    |
| Cabannes . . . . . | 5888 | 5975 | 6314 | 6525 | »    | 7250 | 7400 |

Or, d'après Végard les maxima les plus importants du spectre des aurores sont situés vers

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 5865 | 5950 | 6300 | 6590 |
| (13) | (15) | (28) | (40) |

Ils semblent bien coïncider avec les groupes de bandes trouvés dans le spectre du ciel.

TABLEAU III.

*Comparaison du ciel nocturne et des auréoles boréales.*

| C    | G    | VH      | C    | G    | VH        | C    | G      | VH     |
|------|------|---------|------|------|-----------|------|--------|--------|
| 5253 | 5264 | 5241 3  | 6041 | 6038 |           | 6802 |        |        |
| 5290 | 5300 |         | 6073 |      | 6058 1    | 6877 |        |        |
| 5324 |      |         | 6091 |      | 6108 1    | 6707 |        |        |
| 5343 | 5353 |         | 6124 | 6122 | 6126 1    | 6966 |        |        |
| 5382 | 5377 |         | 6166 |      |           | 7042 |        |        |
| 5410 | 5410 |         | 6200 |      | 6185 1    | 7096 |        |        |
| 5440 | 5449 |         | 6223 |      |           | 7134 |        |        |
| 5475 | 5482 |         | 6269 |      |           | 7200 |        | 7243 2 |
| 5505 | 5510 |         | 6300 | 6306 | 6302 3    | 7278 |        |        |
| 5532 | 5539 |         | 6314 |      | [6318]    | 7362 | 7352 3 |        |
| 5577 | 5577 | 5577    | 6349 |      | 6367 2    | 7405 |        |        |
| 5646 |      |         | 6407 |      | 6398 1    | 7462 | 7483 4 |        |
| 5698 |      |         | 6468 | 6451 | 6440/55 1 | 7530 |        |        |
| 5739 |      |         | 6525 |      | 6513/36 1 | 7608 |        |        |
| 5775 | 5776 | 57510   | 6583 | 6574 | 6577      | 7633 |        |        |
| 5821 |      | 58331   | 6607 |      | 6608      | 7750 | 7727 4 |        |
| 5861 |      | 58671   | 6663 |      | 6660/90 1 | 7865 | 7867 4 |        |
| 5888 |      | 58911   | 6703 |      |           | 7930 |        |        |
| 5919 |      |         | 6739 |      |           | 8010 | 8035 2 |        |
| 5958 | 5948 | [5975]1 | 6773 |      | 6758 2    | 8140 | 8143 2 |        |
| 5991 |      |         |      |      |           |      |        |        |

Les nombres entre crochets, qui avaient été donnés antérieurement par Végard, ne se retrouvent pas dans l'article (10) de Végard et Harang.

Cette parenté des deux spectres est d'ailleurs beaucoup plus lointaine dans le bleu et le violet où l'intensité du système négatif des bandes de l'azote, qu'on ne retrouve que très affaiblies dans le ciel, donne au spectre des aurores un caractère particulier.

#### 4. Origine atmosphérique de la lumière rouge du ciel nocturne.

— De 1922 à 1925, au cours de ses premières recherches sur la lumière du ciel nocturne (12), Dufay obtint une dizaine de spectrogrammes montrant tous, de 3000 à 4800 Å, un spectre continu coupé par les raies sombres de Fraunhofer. Il en conclut que la lumière du ciel nocturne était due à une diffusion des rayons du soleil par des particules interplanétaires; des mesures de polarisation confirmaient cette manière de voir.

D'autre part, opérant avec des plaques photographiques sensibilisées à l'érythrosine, Dufay enregistra régulièrement la raie verte 5577 et put faire sur cette raie de bonnes mesures photométriques: il trouva qu'elle transporte de 0,2 à 0,3 de l'énergie trans-

portée par le rayonnement continu entre 4962 et 6000 Å, et qu'elle intervient pour une valeur comprise entre 0,06 et 0,09 dans la brillance visuelle du ciel nocturne. Mais Dufay n'aperçut à cette époque aucune autre raie ou bande d'émission.

Pendant un certain nombre de mesures photométriques ou visuelles à travers des filtres colorés permettaient déjà de penser que la lumière rouge du ciel n'avait pas la même origine que le spectre bleu observé par Dufay. Isolant avec des filtres, d'une part le rouge, d'autre part la raie verte 5577, Lord Rayleigh (11) trouva une certaine corrélation entre les variations d'intensité, d'une nuit à l'autre, de la lumière rouge et de la raie verte : le coefficient de corrélation était de 0,70. Il y avait là l'indice d'une excitation commune et la première preuve de l'origine atmosphérique des radiations rouges du ciel nocturne.

Pendant ce temps Dufay (12), au cours d'une longue série de recherches photométriques très précises, comparait la répartition des intensités dans la lumière du ciel nocturne et dans celle du ciel lunaire, et trouvait la première beaucoup plus riche en radiations rouges, comme le montre le tableau suivant :

|                    |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| Longueur d'onde... | 4300 | 4700 | 5350 | 5500 | 6400 |
| Ciel nocturne      |      |      |      |      |      |
| Ciel lunaire       | 1,00 | 1,05 | 1,70 | 2,10 | 2,78 |

Ce qui élève les rapports 1,70 et 2,10, c'est, comme l'avait déjà remarqué Dufay, la présence de la radiation 5577, que laissent passer partiellement les deux filtres, surtout le second. Quant au dernier rapport 2,78 qui est encore plus élevé, il révèle une anomalie dont l'explication la plus simple est celle d'une émission sélective particulièrement intense dans le rouge, qui se superposerait à la diffusion des rayons du Soleil par les particules interplanétaires. Effectivement sur mes spectres, pourtant peu dispersés, le fond continu n'apparaît pas; il est donc faible vis-à-vis du spectre discontinu.

La parenté de ce spectre discontinu avec celui des aurores polaires est une nouvelle preuve de son origine atmosphérique. N'y aurait-il pas cependant quelques raies d'origine plus lointaine? Öhman a examiné les conditions d'émission par le calcium interstellaire et conclut à la possibilité d'observer le doublet 7293-7326 Å du calcium ionisé; je l'ai cherché dans mes spectres : on y trouve bien une raie 7278 assez voisine de la première composante de ce doublet, mais il n'y a rien dans le ciel vers 7326 Å. Dufay a pensé aussi aux raies D du sodium répandu dans la galaxie; on les a observées dans certaines étoiles lointaines de la classe B; or il n'est pas possible d'identifier avec les raies D du sodium la large bande 5888 qu'on observe dans mes spectres; elle a certainement une autre origine et ne peut que masquer les raies D, si elles existent. Dufay avait d'ailleurs remarqué que les variations d'intensité de la radiation 5892 dans le ciel

nocturne témoignaient en faveur de son origine atmosphérique.

Cette émission discontinue d'origine atmosphérique, que nous avons récemment observée dans le bleu, Dufay et moi, et que je retrouve, plus intense encore dans le rouge, résoud peut-être les difficultés auxquelles s'était heurté Dufay en 1928 lorsqu'il n'envisageait pas autre chose qu'une diffusion de la lumière du Soleil par des particules interplanétaires. Le ciel nocturne 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 ou électrons) peut être reprise en considération.

Admettons, par exemple, dans l'hypothèse d'un gaz interplanétaire, que la couleur du ciel nocturne serait identique à celle du ciel diurne si la diffusion moléculaire des rayons du Soleil intervenait seule. Dufay a calculé, pour différents intervalles spectraux, le rapport entre l'intensité réelle du ciel nocturne et celle du ciel diurne; il a trouvé :

|               |           |           |           |           |           |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| λ limites     | 3800-4600 | 4350-5300 | 4900-5800 | 4800-6000 | 6150-7000 |
| λ moyen       | 4300      | 4700      | 5350      | 5500      | 6400      |
| Ciel nocturne |           |           |           |           |           |
| Ciel diurne   | 1,00      | 1,15      | 1,70      | 1,80      | 4,10      |

On en conclut que, dans le rouge, le spectre discontinu d'origine atmosphérique est au moins trois fois plus intense que le spectre continu d'origine interplanétaire.

**5. Le premier système positif des bandes de la molécule d'azote dans la lumière du ciel nocturne.** — La figure 3 rappelle sommairement les états électroniques de la molécule d'azote, leur potentiel d'excitation et les transitions correspondant aux principaux systèmes de bandes (13).

Le premier groupe positif (ou mieux premier système positif) apparaît entre 5000 et 15000 Å dans la lumière positive d'un tube de Geissler; on le retrouve dans la phosphorescence de l'azote actif; les bandes sont dégradées vers les courtes longueurs d'ondes. L'émission de ce premier système positif accompagne la transition B → A. Le niveau B est triple, mais nous n'insistons pas ici sur cette complication. Soit donc  $v'$  et  $v''$  les quanta de vibration d'une molécule à l'état initial B et à l'état final A, la formule de Birge

$$\nu = 9518,6 + (1718,40 v' - 14,437 v'^2) - (1446,46 v'' - 13,929 v''^2)$$

permet de calculer les nombres d'ondes  $\nu$  relatifs aux têtes de bande les moins réfrangibles.

Le tableau IV donne la longueur d'onde dans le vide ( $\lambda_0 = 1/\nu$ ) des têtes de bande observées au laboratoire

entre 5 000 et 9 000 Å. Pour chaque valeur de  $v'$  les bandes soulignées sont les plus intenses d'après la loi de Franck-Condon; j'ai ajouté au tableau quelques bandes (entre crochets) qui n'ont pas encore été obtenues au laboratoire. La disposition adoptée fait immédiatement connaître les bandes émises à partir de chaque quantum initial  $v'$  (sur une même ligne du tableau) et la place qu'occupent dans le spectre les différentes suites  $\Delta v = 6, 5, 4, \dots$  (chaque colonne représentant une suite de bandes).

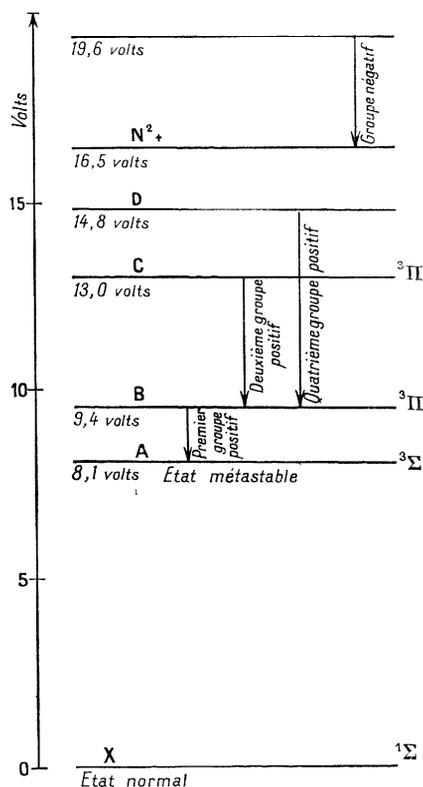


Fig. 3.

On voit que ces bandes, très nombreuses et réparties assez uniformément, seront difficiles à mettre en évidence dans un spectre aussi complexe et aussi peu dispersé que mes spectres du ciel nocturne. Mais la difficulté est encore plus grande qu'il ne paraît à première vue. En effet la répartition des intensités, dans les suites de bandes du premier système positif de l'azote, varie tellement suivant le mode d'excitation qu'on n'a pu reconnaître l'identité des différents spectres obtenus au laboratoire qu'avec de longues poses et une grande dispersion. A plus forte raison sera-t-il difficile de retrouver en toute certitude les bandes de l'azote dans le ciel.

1° On sait qu'une décharge électrique non condensée fait apparaître dans la lumière positive les bandes 11-6 et 10-5 de la suite  $\Delta v = 5$ , peu intenses; les

bandes 12-8, 11-7, 10-6, 9-5, 8-4, 7-3, 6-2 et 5-1 de la suite  $\Delta v = 4$ , intenses de 12-8 à 9-5; enfin les bandes 12-9, 11-8, 10-7, 9-6, 8-5, 7-4, 6-3, 5-2 et 4-1 de la suite  $\Delta v = 3$ , très intenses de 9-6 à 5-2. Avec une faible dispersion on observera donc un groupe vert assez faible, avec maximum vers 5 440 Å; un groupe jaune intense, de 5 750 à 6 070, avec maximum vers 5850; et un groupe rouge plus intense et plus étendu, de 6 250 à 6 700.

TABLEAU IV.

Têtes des bandes du premier système positif de l'azote.

| $v'$ | $\Delta v \rightarrow$ | 6           | 5           | 4           | 3           | 2           | 1           |
|------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1    |                        |             |             |             |             |             | 8914        |
| 2    |                        |             |             |             |             |             | <b>8725</b> |
| 3    |                        |             |             |             |             | 7755        | 8544        |
| 4    |                        |             |             | 6187        | 6789        | <b>7506</b> | 8371        |
| 5    |                        |             | 5633        | 6127        | <b>6705</b> | 7388        | 8207        |
| 6    |                        |             | 5593        | 6070        | <b>6623</b> | 7275        | 8049        |
| 7    | 5154                   | 5554        | 6013        | <b>6545</b> | 7166        | 7896        |             |
| 8    | 5126                   | 5516        | <b>5959</b> | <b>6468</b> | 7052        |             |             |
| 9    | 5099                   | 5478        | <b>5906</b> | 6395        |             |             |             |
| 10   | —                      | 5442        | <b>5854</b> | 6322        |             |             |             |
| 11   | 5054                   | 5407        | <b>5804</b> | 6253        |             |             |             |
| 12   | 5031                   | 5473        | <b>5755</b> | 6185        |             |             |             |
| 13   |                        | 5339        | <b>5707</b> | [6118]      | [6582]      |             |             |
| 14   |                        | 5307        | <b>5661</b> | [6053]      | [6496]      |             |             |
| 15   |                        | 5275        | <b>5615</b> | [5990]      | [6412]      |             |             |
| 16   |                        | 5244        | <b>5571</b> | [5929]      | [6330]      |             |             |
| 17   |                        | 5214        | <b>5527</b> | [5869]      | [6252]      |             |             |
| 18   |                        | <b>5184</b> | <b>5484</b> |             |             |             |             |
| 19   |                        | <b>5155</b> |             |             |             |             |             |
| 20   |                        | <b>5127</b> |             |             |             |             |             |

2° Fowler et Lord Rayleigh ont montré que le spectre de phosphorescence de l'azote actif était constitué par une sélection de bandes du premier système positif de l'azote. En réalité on y trouve bien toutes les bandes de ce système, mais un petit nombre d'entre elles apparaissent avec une remarquable intensité; ce sont les bandes 12-6 et 11-5 de la suite  $\Delta v = 6$ ; 12-7, 11-6 et 10-5 de la suite  $\Delta v = 5$ ; 12-8, 11-7 et 10-6 de la suite  $\Delta v = 4$ ; enfin, d'une part 12-9, 11-8 et 10-7, d'autre part 7-4 et 6-3 de la suite  $\Delta v = 3$ . Dans un spectre peu dispersé on observera donc un intense groupe vert avec maximum vers 5 400 Å, un groupe jaune avec maximum vers 5 800 et un groupe rouge avec deux maxima vers 6 250 et 6 624. A basse température la sélection est encore plus nette; l'on ne trouve plus pour  $v'$  que les valeurs 12, 11 et 6, ce qui diminue la largeur des groupes vert, jaune et rouge et déplace leurs maxima vers les petites longueurs d'onde.

3° Si, comme l'ont fait Lord Rayleigh (14) puis McLennan (15), on ajoute un gaz inerte à l'azote actif, la répartition des intensités dans le spectre de l'azote change encore. On observe un déplacement des maxima vers l'infrarouge d'autant plus grand que la pression partielle de l'azote est plus réduite. Le quantum initial  $v'$ , primitivement égal à 12, 11 ou 10, apparaît avec des

valeurs de plus en plus faibles, 10, 9, 8 et 7. Lorsqu'on ajoute de l'hélium, par exemple, la bande jaune la plus intense est d'abord 5804, puis 5855, enfin 5906; dans le rouge, le maximum principal passe de 6252 à 6469. Un mélange contenant 0,17 d'azote et 0,83 d'hélium émet surtout les bandes 5407, 5804, 5855 et 6322 Å.

Il s'agit maintenant de comparer le spectre du ciel nocturne à celui de la molécule d'azote. Trouve-t-on dans le ciel les bandes de l'azote? Dans l'affirmative, y trouve-t-on autre chose que les bandes de l'azote? La recherche se poursuivra de la manière suivante: on cherchera d'abord les radiations du ciel dont la longueur d'onde coïncide avec celle d'une bande de l'azote, compte tenu de l'imprécision des mesures dans le ciel et de l'incertitude sur la position réelle du centre de gravité des bandes de l'azote.

On contrôlera ensuite l'identification des bandes observées à la fois dans le ciel et au laboratoire en étudiant leurs intensités relatives dans les deux spectres; enfin, si certaines radiations du ciel échappent à cette classification, l'on en cherchera l'origine.

On sait que le spectre des aurores polaires est essentiellement constitué par la raie 5577 de l'atome d'oxygène et les principales bandes négatives de la molécule d'azote (3914, 4278 et 4709 Å). On a donc été conduit à y chercher aussi les bandes positives de l'azote; la présence du deuxième groupe positif paraît nettement établie (3160, 3371, 3578, 3806, 4058 et 4346 Å), et l'on peut alors admettre avec Végard que la partie jaune, rouge et infrarouge du spectre des aurores est due surtout au premier groupe positif. Or la ressemblance est frappante, de 5000 à 8000 Å, entre le spectre du ciel et celui des aurores. Il est donc légitime de chercher dans le spectre du ciel le premier groupe positif de l'azote, malgré les conclusions de Sommer qui trouve une toute autre origine aux radiations émises par le ciel nocturne entre 5000 et 7000 Å.

Supposons qu'on puisse attribuer à la molécule d'azote les groupes intenses et caractéristiques du ciel nocturne qui ont été observés en 5890-5975, 6315, 6525, 7270 et 7400 Å. Dans le premier de ces groupes sont comprises les bandes de l'azote

$$5929 (16-13), \quad 5869 (17-14), \quad 5990 (15-12) \quad (\Delta v=3)$$

et

$$5906 (9-5), \quad 5854 (10-6), \quad 5959 (8-4) \quad (\Delta v=4).$$

Avec le second groupe coïncident les bandes

$$6330 (16-14) \quad (\Delta v=2) \quad \text{et} \quad 6322 (10-7) \quad (\Delta v=3).$$

Avec le troisième, les bandes

$$6582 (13-11), \quad 6496 (14-12) \quad (\Delta v=2)$$

et

$$6545 (7-4), \quad 6468 (8-5), \quad 6395 (9-6), \quad 6623 (6-3) \quad (\Delta v=3).$$

Avec le quatrième et le cinquième, les bandes

$$7275 (6-4), \quad 7505 (4-2), \quad 7388 (5-3) \quad (\Delta v = 2).$$

La loi théorique de Franck-Condon sur la probabilité des transitions électroniques, vérifiée par des expériences de laboratoire, va nous permettre de contrôler ces attributions possibles. En effet nous connaissons a priori, par application de cette loi, l'intensité relative des bandes émises à partir d'un quantum de vibration initial  $v'$  et nous pouvons essayer de retrouver cette répartition dans le ciel,

Nous venons de voir que les radiations caractéristiques du ciel nocturne pouvaient être identifiées avec les bandes 17-14, 16-14 et 16-13, 15-12, 14-12, 13-11 ou les bandes 10-7 et 10-6, 9-5 et 9-6, 8-5 et 8-4, 7-4, 6-4 et 6-3, 5-3, 4-2, ce qui donne, pour le quantum initial de la molécule d'azote à l'état  $B$  dans le ciel, les valeurs  $v' = 17, 16, 15, 14, 13$  ou  $v' = 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4$ .

Or la présence de la bande 5869 (17-14) entraîne celle de la bande 5527 (17-13) avec une intensité plus grande encore: cette dernière bande coïncide peut-être avec la bande 5505 du ciel. De même, à partir du quantum  $v' = 16$ , nous devons trouver avec une intensité décroissante les bandes 5571 (16-12), 5929 (16-13) et 6330 (16-14); il est inutile de chercher la première qui est cachée par la forte raie 5577, mais il reste à expliquer pourquoi, dans le ciel, la bande 6314 est plus intense que 5919. A partir du quantum  $v' = 15$ , la bande 5615 (15-11) devrait être plus intense que la bande 5990 (15-12), mais elle est peut-être elle aussi plus ou moins cachée dans mes spectres par la raie 5577; la bande 5275 (15-10) serait dans le ciel en 5253. Avec la bande 6496 (14-12) doivent apparaître 6053 (14-11) et surtout 5661 (14-10): cette dernière bande se confondrait avec la radiation observée dans le ciel en 5646, mais au voisinage de 6053 on ne voit rien dans le ciel qu'une émission faible et douteuse en 6041.

En résumé rien n'empêche d'attribuer une bonne part de la lumière du ciel nocturne à des molécules d'azote  $B$  ayant un quantum initial  $v'$  compris entre 17 et 14, mais cette hypothèse n'explique ni la grande intensité du groupe 6315, ni la présence des groupes 7270 et 7400.

Avec un quantum initial compris entre 10 et 5, on retrouve la bande 7270 (attribuable d'ailleurs à la vapeur d'eau, comme nous le verrons plus loin) et la bande 7400 (qui ne peut guère avoir d'autre origine que l'azote); la présence de 9-5 et de 9-6 entraîne alors celle de 9-4 qu'on observerait dans le ciel en 5475; la présence de 6-3 et de 5-3 entraîne celle de 6-2 et de 5-2 qu'on observerait peut-être en 6073 et en 6703.

Nous avons donc le choix entre trois hypothèses: émission par des molécules d'azote à l'état  $B$  ayant un quantum initial de vibration compris entre 17 et 14; émission par des molécules ayant un quantum compris entre 10 et 5; émission simultanée par les deux sortes de molécules. Seule cette troisième hypothèse rend bien compte des faits observés. Parmi les nombreuses radiations émises par le ciel et identifiables avec des bandes de l'azote, on remarque un petit nombre de groupes caractéristiques, comme 5890-5975 et 6315-6525: on peut penser que ces groupes intenses appa-

raissent là où des bandes  $v' = 17, 16, 15, 14$  se superposent à des bandes  $v' = 10, 9, 8, 7, 6, 5$ , et cette double origine peut expliquer leur exceptionnelle intensité. Les principaux groupes d'émission dans le spectre du ciel nocturne, entre 5000 et 8000 Å, feraient partie du premier système positif de l'azote et leur intensité résulterait de la superposition de bandes appartenant à deux suites différentes.

On peut construire un graphique donnant, pour chaque quantum  $v'$ , la somme des nombres qui mesurent dans le ciel les intensités des bandes obtenues à partir de ce quantum initial (fig. 4). Ces nombres ont été pris dans le tableau I; lorsqu'une radiation pouvait être attribuée à deux transitions différentes, comme la bande 6315 aux deux transitions 16-14 et 10-7, j'ai affecté un peu arbitrairement la moitié de l'intensité à chacune des deux bandes correspondantes, c'est-à-dire, dans le cas actuel, 5 à la bande 16-14 et 5 à la bande 10-7. Les intensités ayant été indiquées de cette manière sur le graphique, nous pouvons construire, en nous aidant des points obtenus, une courbe régulière  $C_1, C_2$  qui montre que la plupart des molécules d'azote excitées à l'état  $B$  ont un quantum de vibration, soit voisin de 15, soit voisin de 7.

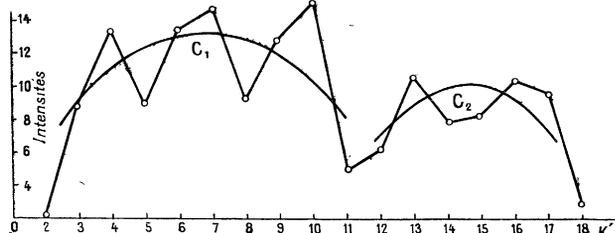


Fig. 4.

Cette répartition des intensités dans le spectre émis par l'azote de la haute atmosphère distingue ce spectre de celui que donne une décharge électrique et rappelle plutôt, par l'intensité exceptionnelle d'un petit nombre de bandes, les spectres de phosphorescence de l'azote. Ce n'est d'ailleurs pas le spectre de phosphorescence ordinaire qu'on trouve dans le ciel, mais plutôt celui de l'azote très dilué dans un gaz inerte ( $v'$  voisin de 7) ou celui qu'a obtenu récemment Kaplan (16) en étudiant au phosphoroscope la lumière qu'émet un tube à azote parcouru par un courant électrique aussi faible que possible ( $v'$  voisin de 16). Les particules lumineuses dans le ciel sont des molécules d'azote très raréfiées et préalablement portées au niveau  $B$  avec un quantum de vibration voisin de 15 ou de 7.

Nous venons de classer ainsi une cinquantaine de bandes du ciel nocturne sur 70 observées. Mais les attributions que nous venons de faire ne sont peut-être pas à l'abri de toute critique. D'une part, en effet, les bandes 6-3 et 8-4 qui devraient apparaître avec une grande intensité sont douteuses et peut être cachées par une émission plus intense d'origine différente.

D'autre part, les radiations du ciel 6 525 et 7 405, que nous avons identifiées avec les bandes 7-4 et 5-2 de l'azote, ont une intensité anormale dont il faut chercher l'origine ailleurs. Nous sommes ainsi conduits à reprendre l'hypothèse de Sommer sur la présence dans le ciel nocturne, comme bandes d'émission, des bandes telluriques de la vapeur d'eau et de l'oxygène.

6. Les bandes de la vapeur d'eau dans le spectre d'émission du ciel nocturne. — Le spectre de vibration de la molécule d'eau est aujourd'hui bien connu; Mecke et ses collaborateurs (17) paraissent avoir réussi à classer définitivement les plus importantes des bandes de ce spectre. On sait que l'énergie

de vibration d'une molécule angulaire  $\begin{matrix} O \\ \diagup \quad \diagdown \\ H \quad H \end{matrix}$  est complètement définie par 3 nombres quantiques  $v^\sigma, v^\pi, v^\delta$ ; nous la représenterons par le symbole  $(v^\sigma, v^\pi, v^\delta)$ , le symbole  $(0, 0, 0)$  représentant le niveau énergétique normal. Les bandes d'absorption de la vapeur d'eau accompagnent le passage du niveau normal au niveau plus élevé  $(v_\sigma, v_\pi, v_\delta)$ . Le zéro d'une bande a pour fréquence

$$\omega = v_\sigma \cdot \omega_\sigma + v_\pi \cdot \omega_\pi + v_\delta \cdot \omega_\delta,$$

avec

$$\begin{cases} \omega_\sigma = 3795 - 39(v_\sigma + v_\pi) \\ \omega_\pi = 3670 - 70(v_\sigma + v_\pi) \\ \omega_\delta = 1515 - 20(v_\sigma + v_\pi + v_\delta). \end{cases}$$

TABLEAU V. — Bandes de vibration de la molécule H<sup>2</sup>O. (Bandes telluriques.)

| LONGUEUR D'ONDE | NIVEAU FINAL |
|-----------------|--------------|
| 6,269 μ         | (0, 0, 1)    |
| 3,168           | (0, 0, 2)    |
| 2,663           | (1, 0, 0)    |
| 1,875           | (1, 0, 1)    |
| 1,379           | (1, 1, 0)    |
| 1,135           | (1, 1, 1)    |
| 0,942           | (1, 2, 0)    |
| 0,906           | (3, 0, 0)    |
| 0,823           | (1, 2, 1)    |
| 0,796 (faible)  | (3, 0, 1)    |
| 0,723           | (1, 3, 0)    |
| 0,699           | (3, 1, 0)    |
| 0,652           | (1, 3, 1)    |
| 0,632 (faible)  | (3, 1, 1)    |
| 0,595           | (1, 3, 2)    |
| 0,592           | (1, 4, 0)    |
| 0,573 (faible)  | (3, 2, 0)    |

(3, x, 1)  
(3, x, 0)  
(1, x, 1)  
(1, x, 0)

Jusqu'ici ce spectre a été observé dans la diffusion et dans l'absorption de la lumière. Le spectre de diffusion (spectre Raman) de la vapeur d'eau montre les bandes du premier ordre (0, 1, 0) et (0, 0, 1) relatives aux deux vibrations symétriques  $\pi$  et  $\delta$  dites de valence et de déformation, les règles de sélection laissant prévoir la difficulté d'y observer la vibration

antisymétrique  $\sigma(1, 0, 0)$ . Dans le spectre d'absorption visible et infrarouge on a, au contraire, peu de bandes symétriques, bien que, la molécule étant angulaire, ces bandes n'y soient pas interdites: on ne trouve, comme bandes symétriques, que  $(0, 0, 1)$  et  $(0, 0, 2)$ . (Voir tableau V).

Parmi les bandes de vibration de la vapeur d'eau, celles qui nous intéressent ici sont les bandes telluriques comprises entre 5 000 et 10 000 Å. Dans l'intervalle 10 000-7 000 Å du spectre solaire, qui contient 2 226 raies de Fraunhofer, 1 132 de ces raies sont d'origine tellurique et toutes celles-ci peuvent être attribuées à la vapeur d'eau, sauf 54 raies de la molécule d'oxygène au voisinage de 7 600 Å. Mecke a classé les 326 raies les plus intenses de la vapeur d'eau dans les bandes 9 420, 9 060, 8 227 et 7 227 Å.

Dans l'intervalle 7 000-5 700 Å, si l'on met à part les bandes de l'oxygène, il reste 825 raies telluriques attribuables à la vapeur d'eau. Mecke a classé les 359 raies les plus intenses dans les bandes 6 934, 6 524, 6 324, 5 952 et 5 924 Å. Les deux dernières de ces bandes forment ensemble ce qu'on a appelé la *bande de la pluie*. Mecke n'a pas encore poussé son étude au-dessous de 5 900 Å.

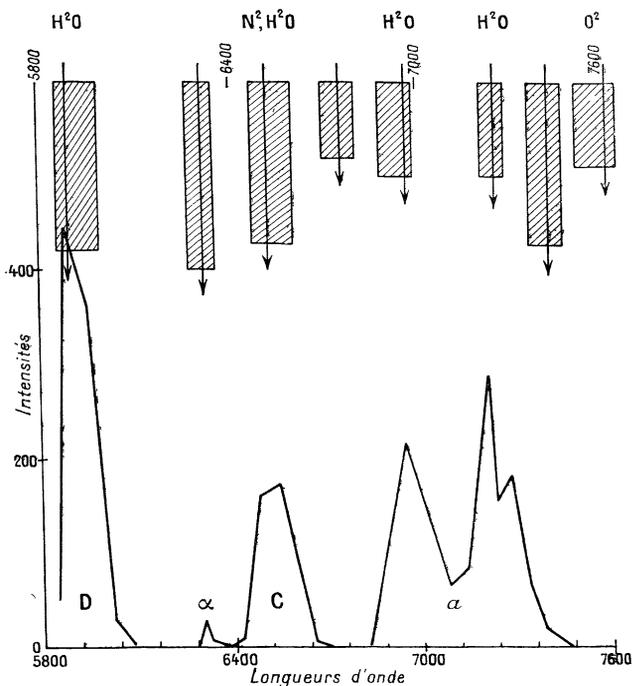


Fig. 5.

La figure 5, tirée d'un des mémoires de Mecke, représente le nombre de raies de la vapeur d'eau qu'on rencontre dans chaque intervalle de 50 angstroms entre 5 800 et 10 000 Å. Ce graphique donne une idée de l'aspect qu'auraient les bandes telluriques de

la vapeur d'eau avec un spectrographe à faible pouvoir de résolution. Dans le tableau suivant j'ai indiqué, pour chaque bande du spectre visible, les raies extrêmes et la raie zéro; j'y ai indiqué ensuite approximativement les limites de la bande telles qu'on les observe dans le spectre solaire avec un spectroscopie à prisme insuffisant pour la résoudre; enfin, dans les deux dernières colonnes, j'ai inscrit l'intensité de la bande d'absorption et rappelé le niveau énergétique final qui lui correspond :

|        |                  |           |     |           |
|--------|------------------|-----------|-----|-----------|
| a..... | { 7304-7227-7177 | 7330-7160 | + 5 | (1, 3, 0) |
|        | { 7107-6990-6906 | 7020-6920 | + 4 | (3, 1, 0) |
| C..... | 6594-6524-6436   | 6600-6430 | + 2 | (1, 3, 1) |
| α..... | 6353-6324-6287   | » »       | - 2 | (3, 1, 1) |
| D....  | { 6018-5952-5883 | 6000-5850 | + 5 | (1, 3, 2) |
|        | { 6006-5924-5847 |           |     |           |
| δ..... | 5799-5730-5670   | 5780-5670 | - 2 | (1, 4, 0) |
| ζ..... | » » »            | 5480-5420 | - 2 | (3, 2, 0) |

On remarquera que je n'ai pas introduit dans le tableau les bandes infrarouges de la vapeur d'eau 8 270 Å (forte) et 7 960 Å (faible) qui produisent dans le spectre solaire une intense absorption de 8 560 à 7 840 Å avec maximum vers 8 140 Å. En effet, le ciel nocturne et l'aurore boréale n'ont pas encore été suffisamment étudiés dans cette région peu dispersée et l'attribution des bandes qu'on y observe reste douteuse.

Mais, dans le jaune et le rouge, la comparaison des spectres du ciel nocturne et des aurores polaires avec celui de la vapeur d'eau peut être poussée plus loin. Nous avons indiqué (fig. 5) par des hachures les grandes bandes d'émission du ciel nocturne et marqué par une flèche le centre de gravité de chaque bande. On observera qu'à chaque bande de la vapeur d'eau correspond très exactement une bande du ciel. Le tableau de correspondance est le suivant :

|        | VAPEUR D'EAU | CIEL NOCTURNE | AURORE BORÉALE |
|--------|--------------|---------------|----------------|
| a..... | { 7330-7160  | { 7278-7200   | 7243           |
|        | { 7020-6920  | { 6966-6877   |                |
| C..... | 6600-6430    | 6607-6468     | 6608-6440      |
| α..... | 6350-6290    | 6349-6269     | 6304           |
| D....  | 6000-5850    | 5990-5861     | 5975-5867      |

Peut-on attribuer une autre origine à chacune des bandes du ciel que nous faisons ici correspondre aux bandes telluriques de la vapeur d'eau? Nous savons déjà que, dans le groupe 5990-5861 Å, il y a sans doute les bandes 6013 (7-3), 5959 (8-4), 5906 (9-5), de l'azote et probablement aussi 5869 (17-14), 5929 (16-13), 5990 (15-12); mais la présence de ces bandes ne suffit pas à expliquer le maximum très net observé en 5888 Å: si en effet ce maximum provenait uniquement de la transition 9-5 de la molécule d'azote, on devrait retrouver avec la même intensité dans le ciel la bande produite par la transition 9-4 qui est aussi probable que la précédente.

De même il n'est pas absurde de considérer comme une bande de l'eau le groupe du ciel dont le maximum

est en 6314. Sans doute la bande tellurique de l'eau (3, 1, 1) qui a précisément son zéro en 6324 est l'une des moins intenses dans le spectre solaire, mais nous savons que les intensités relatives des bandes peuvent être bien différentes en émission et en absorption, et la bande 6324, faible dans le spectre d'absorption du ciel diurne, peut être fortement émise par le ciel nocturne. En effet l'intensité d'une bande ne dépend pas seulement de la probabilité de la transition correspondante  $x \rightleftharpoons y$  mais aussi du nombre des molécules qui se trouvent à l'état initial. Dans le ciel diurne, toutes les molécules absorbantes étant à l'état  $x(0, 0, 0)$ , l'intensité d'une bande d'absorption ne dépend que de la probabilité de la transition  $x \rightarrow y$ , et il se trouve que la transition  $x(0, 0, 0) \rightarrow y(3, 1, 1)$  est une des moins probables. Mais supposons que, dans la haute atmosphère, une excitation extérieure porte d'abord la plupart des molécules d'eau à l'état  $y(3, 1, 1)$ : c'est évidemment la bande  $y(3, 1, 1) \rightarrow x(0, 0, 0)$  qui sera émise avec le plus d'intensité par le ciel nocturne.

Nous verrons plus loin qu'il existe aussi, dans la même région spectrale 6315 Å une bande tellurique de la molécule d'oxygène. Il est difficile de faire la part des molécules d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau, mais il est possible que ces trois espèces de molécules interviennent, et même les atomes d'oxygène avec la raie 6303 Å ( $^3P_2 - ^1D_2$ ).

Le groupe suivant du ciel nocturne 6607-6468 coïncide aussi avec une bande de la vapeur d'eau. On peut y voir sans doute les bandes de l'azote 6623 (6-3) et 6545 (7-4), mais on ne s'expliquerait pas la différence entre les intensités des bandes correspondantes 6607 et 6525 dans le ciel si l'on n'admettait en 6525 une émission d'origine différente superposée à la première: or le centre de la bande tellurique C de la vapeur d'eau est précisément en 6525.

A la bande 6966-6877 du ciel nocturne, qu'on n'a pas encore observée dans les aurores boréales, on ne peut guère attribuer d'autre origine que la transition (3, 1, 0)  $\rightarrow$  (0, 0, 0) de la molécule H<sub>2</sub>O; on ne connaît pas de bande de l'azote dans cette région. En 7278-7200, il y a sans doute superposition de la bande (1, 3, 0) de l'eau et de la bande (6-4) de l'azote.

En résumé je retrouve, après Sommer, dans la lumière émise par le ciel les principales bandes telluriques de la vapeur d'eau  $a, C, \alpha, D$ . Peut-être faut-il y voir aussi les bandes telluriques moins intenses  $\delta$  et  $\zeta$ , mais dans ces régions spectrales il semble bien qu'on doive surtout chercher autre chose, comme les bandes l'azote  $\Delta v = 5$  entre 5324 et 5532 Å, d'un côté de la raie verte 5577, et, de l'autre côté, entre 5646 et 5775 Å, la suite  $\Delta v = 4$  de l'azote et les bandes de l'oxygène.

Le meilleur argument en faveur d'une émission par les molécules de vapeur d'eau est l'exacte coïncidence (étendue de l'intervalle et centre de gravité) des bandes 6966-6877, 6607-6468 et 5990-5863 du ciel nocturne avec les bandes  $a, C$  et  $D$  de la vapeur d'eau.

7. Les bandes telluriques de l'oxygène dans le spectre d'émission du ciel nocturne. — L'émission de ces bandes accompagne le retour à l'état stable  $^3\Sigma(v'' = 0)$  de la molécule métastable  $^1\Sigma(v' = 0, 1, 2, 3, 4)$ . Les bandes d'absorption correspondantes ont été mesurées dans le spectre solaire et classées par Dicke et Babcock (<sup>18</sup>); chacune d'elles a deux maxima d'intensité, l'un correspondant aux branches  $P$  et  $PQ$ ; l'autre, aux branches  $R$  et  $RQ$ . J'indique dans le tableau ci-après les longueurs d'onde des limites de chaque bande, celles des maxima d'intensité et celle du zéro. Les bandes sont dégradées vers l'infrarouge.

| BANDE            | $v'$ | LIMITÉ | MAX. P | ZÉRO | MAX. R | LIMITÉ |
|------------------|------|--------|--------|------|--------|--------|
| A.....           | 0    | 7700   | 7632   | 7620 | 7608   | 7590   |
| B.....           | 1    | 6950   | 6897   | 6884 | 6875   | 6870   |
| $\alpha$ .....   | 2    | 6320   | 6295   | 6288 | 6279   | 6270   |
| $\alpha'$ .....  | 3    | 5830   | 5804   | 5797 | 5789   | 5780   |
| $\alpha''$ ..... | 4    | 5400   | »      | 5384 | »      | 5380   |

Les longueurs d'onde limites ne sont données qu'à titre d'indication. Pour les zéros j'ai pris les longueurs d'onde dans le vide  $\lambda_0 = 1/\lambda$ : il est bien inutile de les ramener à la valeur internationale, étant donné l'incertitude de mes mesures sur le ciel nocturne.

Mes spectres confirment l'opinion de Sommer qui a reconnu la présence de ces bandes dans le spectre d'émission du ciel nocturne. Le ciel émet en effet une bande intense vers 7600 où j'ai cru distinguer trois maxima en 7633 (0), 7608 (5) et 7530 (3); il est difficile de ne pas voir dans cette radiation autre chose que la bande 7628 (3-1) de l'azote, et la coïncidence est très bonne avec la bande A de l'oxygène. Plus loin, j'ai trouvé dans le ciel une bande intense au voisinage de 6900 Å avec trois maxima en 6966 (4), 6907 (4) et 6877 (2); le premier a déjà été attribué à la vapeur d'eau; dans les deux autres, on retrouve les maxima de la bande B de l'oxygène: peut-être la bande 6875 (3-0) de l'azote se superpose-t-elle au dernier. La bande  $\alpha$  se retrouve dans mes spectres en 6300 (4) et 6261 (3). La bande  $\alpha'$  se confond peut-être avec la bande du ciel 5775 (5), trop intense pour pouvoir être uniquement attribuée à l'azote (11-7). Quant à la bande  $\alpha''$ , sa présence est encore douteuse dans nos spectres du ciel. Sommer pensait la trouver en 5360 dans ses spectres.

8. Tableau récapitulatif. — Il est commode de grouper les résultats de cette discussion un peu longue en un tableau donnant, à côté de chaque radiation du ciel, son origine probable: ce sera le tableau VI.

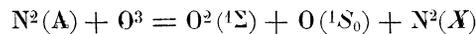
9. Conclusion. — Au cours de cette analyse, nous avons observé trop de coïncidences entre les radiations émises par le ciel d'une part et les bandes de l'azote, de l'oxygène et de la vapeur d'eau d'autre part pour ne pas conclure à la présence de ces bandes dans la lumière du ciel. La raie 5577 mise à part, le spectre d'émission au ciel nocturne, dans l'intervalle 5000-8000 Å, paraît



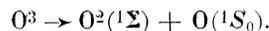
la haute atmosphère doit donc faire intervenir les molécules d'azote métastables  $A$  et les molécules d'ozone à l'état normal. On voit ainsi que le problème est double : comment les molécules  $N^2(A)$  et  $O^3$  ont-elles été formées ? quelles actions vont-elles subir ?

La formation de deux molécules d'ozone à partir de trois molécules d'oxygène, n'exige pas au total un très gros apport d'énergie : 70 grandes calories, c'est-à-dire environ 3,03 volts. Mais il a fallu dissocier au préalable les molécules d'oxygène, et la dissociation  $O_2(^3\Sigma) \rightarrow O(^3P) + O(^1D_2)$  exige 7,05 volts. C'est, à peu de choses près, l'énergie nécessaire à la production des molécules métastables  $N^2(A)$ , Nous admettons qu'une même cause extérieure a excité les molécules d'azote et dissocié les molécules d'oxygène, donnant ainsi naissance à  $N^2(A)$  et  $O^3$ , et c'est sans doute la pluie d'électrons secondaires prévue par la théorie de Dauvillier (19). Nous pouvons fixer ainsi à un peu plus de 8 volts l'énergie de ces électrons aux latitudes moyennes.

Indépendamment de cette première hypothèse, nous devons chercher maintenant à expliquer les phénomènes de phosphorescence qui vont se produire dans notre mélange  $N^2(A)$ ,  $O^3$ ,  $H^2O$ . Ce sont eux qui donnent au ciel nocturne sa luminosité, tout au moins dans le domaine spectral étudié ici, de 5000 à 8000 Å. Nous avons en présence des molécules métastables d'azote qui peuvent être ramenées par chocs à l'état normal en libérant une énergie équivalente à 8,1 volts et des molécules d'ozone qui ne peuvent se dissocier qu'en absorbant de l'énergie. On est ainsi conduit à se demander si la destruction de l'ozone dans la haute atmosphère ne se fait pas suivant le schéma suivant :



la molécule métastable d'azote  $A$  étant ramenée par choc à l'état stable  $X$  en fournissant à la molécule d'ozone l'énergie nécessaire à sa dissociation en une molécule métastable d'oxygène ( $^1\Sigma$ ) et un atome métastable d'oxygène ( $^1S_0$ ). Il suffit, pour que ce schéma soit admissible, que l'énergie absorbée par la dissociation



soit inférieure à 8,1 volt, mais peu différente de cette valeur. Le calcul de l'énergie ainsi absorbée peut se faire de la manière suivante :

2 molécules  $O^3$  donnent 3 molécules  $O_2(^3\Sigma)$  à l'état normal en libérant une énergie équivalente à 3,03 volts. Elevons maintenant 2 molécules  $O_2(^3\Sigma)$  au niveau métastable ( $^1\Sigma$ ) ; il faut  $1,68 \times 8 = 3,24$  volts. Dissociations la troisième en atomes normaux  $O(^3P)$  ; il faut 5,09 volts. Portons ces atomes au niveau métastable ( $^1S_0$ ) ; il faut  $4,18 \times 2 = 8,36$  volts. La dissociation de deux molécules  $O^3$  suivant le schéma envisagé exige donc :

$$3,24 + 5,09 + 8,36 - 3,03 = 13,66 \text{ volts.}$$

La dissociation d'une molécule d'ozone (6.83 volts), peut donc résulter d'un choc avec une molécule d'azote métastable.

Cette dissociation nous donne immédiatement la molécule  $O_2(^1\Sigma)$  et l'atome  $O(^1S_0)$  qui vont émettre, par un même mécanisme, l'une les bandes telluriques  $^1\Sigma \rightarrow ^3\Sigma$ , l'autre la raie verte des aurores 5577 ( $^1S_0 \rightarrow ^1D_2$ ). Sommer (20) a déjà fait remarquer le premier l'analogie des émissions de quadrupoles par la molécule métastable  $^1\Sigma$  et par l'atome métastable  $^1S_0$ , les bandes telluriques de la molécule d'oxygène correspondant à la raie ultraviolette 2950 ( $^1S_0 \rightarrow ^3P$ ) de l'atome,

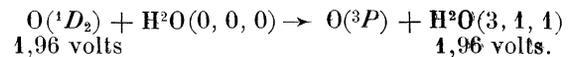
Si mes hypothèses sont exactes, la présence de l'atome  $O(^1S_0)$  dans la haute atmosphère, et par suite l'émission de la raie verte 5577, a pour origine la dissociation de molécules d'ozone par choc contre une molécule d'azote métastable (et sans doute aussi par choc contre un électron secondaire de Dauvillier). L'émission de la raie de l'aurore dans le ciel nocturne est liée à la destruction de l'ozone.

La présence des atomes métastables  $O(^1S_0)$  et  $O(^1D_2)$ , ce dernier résultant, d'une part de la transition  $^1S_0 \rightarrow ^1D_2$  avec émission de la raie verte, d'autre part de la dissociation des molécules d'oxygène, la présence, dis-je, de ces atomes métastables peut expliquer à son tour l'émission des bandes de la vapeur d'eau et du premier système positif de l'azote.

Par choc, ces atomes métastables peuvent retomber à un niveau inférieur avec libération d'énergie suivant l'un des schémas

$$\left\{ \begin{array}{l} ^1S_0 \rightarrow ^3P + 4,18 \text{ volts} \\ ^1S_0 \rightarrow ^1D_2 + 2,23 \text{ —} \\ ^1D_2 \rightarrow ^3P + 1,96 \text{ —} \end{array} \right.$$

La vapeur d'eau pourra donc émettre tout son spectre de vibration, en particulier le choc d'un atome  $O(^1D_2)$  contre une molécule  $H^2O$  portera cette molécule au niveau (3,1,4) d'où elle retombera en émettant la bande 6324 Å. Nous comprenons maintenant comment cette bande tellurique de la vapeur d'eau, si faible en absorption dans le ciel diurne, peut devenir intense en émission dans le ciel nocturne. Elle correspond au choc.



Le choc d'un atome  $N^2(A)$  avec un des atomes d'oxygène  $^1S_0$  ou  $^1D_2$  provoquera l'émission de certaines bandes du premier système positif de l'azote en portant la molécule  $N^2(A)$  au niveau  $B$ . Dans le ciel la plupart des molécules d'azote  $A$  ont le quantum de vibration  $v = 0$ . Quelle énergie faut-il fournir à ses molécules pour les porter au niveau  $B$  avec un quantum  $v'$  ? On la calcule aisément à l'aide de la formule

$$v = 9\,518,6 + 1\,718,40 v' - 14,437 v''$$

(voir page 605), sachant que la valeur de l'énergie en volts s'obtient à partir du nombre d'ondes  $\nu$  par la relation

$$V = \nu/8106.$$

on trouve ainsi

|                |                  |               |                  |
|----------------|------------------|---------------|------------------|
| pour $v' = 14$ | $V = 3,79$ volts | pour $v' = 4$ | $V = 1,99$ volts |
| 15             | 3,95             | 5             | 2,18             |
| 16             | 4,11             | 6             | 2,37             |
|                |                  | 7             | 2,57             |

Or, par choc avec un atome O ( $^1S_0$ ), la molécule A ( $v = 0$ ) peut acquérir une énergie équivalente à 4,18

ou 2,23 volts. Elle sera donc portée à l'un des niveaux B ( $v' = 16$ ) ou B ( $v' = 5$ ), et les bandes émises seront celles dont le quantum initial est  $v' = 16$  ou  $v' = 5$ , résultat très voisin de celui que m'avait donné l'observation du ciel.

Cette théorie explique bien les aspects les plus remarquables de mes spectres du ciel nocturne dans le vert, le jaune et le bleu.

Manuscrit reçu le 20 octobre 1934.

#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) J. CABANNES, *Comptes Rendus*, 1934, **198**, p. 2 132.  
 (2) E. WIECHERT, *Physik. Z.*, 1902, **3**, p. 365.  
 (3) V. M. SLIPHER, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, 1929, **61**, p. 263.  
 (4) J. DUFAY, *J. Phys.*, 1933, **4**, p. 221.  
 (5) L. A. SOMMER, *Z. Physik*, 132, **77**, p. 374.  
 (6) CABANNES et DUFAY, *Comptes Rendus*, 1934, **198**, p. 306.  
 (7) J. COJAN, *Réunions de l'Institut d'Optique de Paris*, 1933.  
 (8) V. C. GYLLENRIÖLD, *Exploration Intern. des Région Polaires en 1882-1883*, tome 2, chez Norstedt et Soner, Stockholm.  
 (9) L. VÉGARD, *Geofysiske Publ.*, 1933, **10**, fascicule 4.  
 (10) VÉGARD et HARANG, *ibid.*, fascicule 5.  
 (11) LORD RAYLEIGH, *Proc. Roy. Soc.*, 1924, **106**, p. 417; 1925, **109**, p. 428; 1928, **119**, p. 11.  
 (12) J. DUFAY, *Bull. de l'Obs. de Lyon.*, 1928, **10**, p. 1 et *Jour. de Phys.*, 1929, **10**, p. 219.  
 (13) Voir, par exemple, W. JEVONS, *Band-Spectra of Diatomic Molecules*, the University Press, Cambridge (Angleterre).  
 ou W. WEIZEL, *Bandenspektren*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig.  
 (14) LORD RAYLEIGH, *Proc. Roy. Soc.*, 1922, **102**, p. 433.  
 (15) MC LENNAN, RUEDY et ANDERSON, *Trans. Roy. Soc. Canada*, 1928, **22**, p. 303.  
 (16) J. KAPLAN, *Phys. Rev.*, 1934, **45**, p. 671.  
 (17) R. MECKE, *Z. Physik*, 1933, **81**, p. 313, 445, 465.  
 (18) DIEKE et BABCOCK, *Proc. Nat. Acad.*, 1927, **13**, p. 670.  
 (19) A. DAUVILLIER, *Revue générale d'Electricité*, 1932, **31**, 5 mars, 2 et 9 avril.  
 (20) J. CABANNES, *Comptes Rendus*, 1934, **199**, p. 909.