

ÉTUDE SPECTROSCOPIQUE  
DANS LE DOMAINE VISIBLE ET ULTRA-VIOLET  
PROCHE DES AURORES DU 19 NOVEMBRE 1966 ET 4 FÉVRIER 1967

par MALBROUCK R. et DUYSINX R.

*Université de Liège  
Institut d'Astrophysique Cointe-Sclessin*

ABSTRACT

Photoelectric spectra of pulsating aurorae have been recorded. Various intensity ratios have been obtained. From the  $v''$  progressions, the problem of atmospheric opacity below 4000 Å is considered. The values point to much higher absorption than accepted for astronomical observation and may be due to abnormal ozone concentrations.

INTRODUCTION

Les aurores polaires apparaissent le plus souvent dans des zones centrées sur les pôles géomagnétiques et situées entre les latitudes 63° et 67° (géomagnétiques), appelées « zones aurorales ». La fréquence d'occurrence des aurores y est de l'ordre de 200 à 300 par an. Dans les régions tempérées et subtropicales, les phénomènes auroraux sont extrêmement rares et n'apparaissent généralement qu'en période de maximum d'activité solaire aux voisinages des équinoxes [1].

Les spectres auroraux sont constitués, pour la plus grande partie, de bandes moléculaires et de raies atomiques de l'azote, de l'oxygène (constituants atmosphériques prédominants) et de leurs ions.

La présence dans les spectres auroraux des raies de la série de Balmer, élargies et déplacées par effet Doppler, suggère que l'incidence de protons rapides dans la haute atmosphère doit être, du moins partiellement, responsable de certaines émissions aurorales. Il semble cependant que leur rôle ne soit pas prédominant [2]. Le processus le plus important pour la formation des aurores est vraisemblablement l'excitation et l'ionisation des constituants atmosphériques par des électrons. Ces électrons énergétiques proviennent d'électrons primaires possédant des énergies de l'ordre de quelques keV (10 à 100 keV).

Nous nous proposons, dans les paragraphes qui suivent, d'examiner la répartition des intensités des bandes du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$  dans les spectres des aurores polaires du 19 novembre 1966 et du 14 février 1967.

I. INSTRUMENTATION

Les spectres auroraux qui ont servi de base à cette étude ont été enregistrés à Kiruna (Suède) à l'aide de deux spectrographes du type Ebert-Fastie, ouverts

Présenté par A. Monfils, le 27 février 1969.

à  $f/6$ . Les fentes de ces spectrographes possèdent un rayon de courbure de 125 mm, une hauteur de 40 mm et sont variables en largeur de 0 à 3 mm. Le miroir principal de 210 mm de diamètre et d'une distance focale de 400 mm est poli avec une précision de  $\lambda/16$ . Le réseau du spectrographe (de marque Bausch et Lomb) possède 1200 traits/mm gravés sur une surface de  $64 \times 64$  mm. « Blazed » à 2000 Å, il est recouvert de  $MgF_2$ . Le balayage du spectre est assuré par la rotation du réseau ; celle-ci est continue pour le premier spectrographe chargé de l'enregistrement de la partie du spectre située dans l'ultra-violet proche, et se fait pas par pas pour le second spectrographe (partie visible). Dans les deux cas, un photomultiplicateur (ASCOP type 541 A MIY 6546 pour la partie visible et EMI 9558 BQ pour la partie ultra-violette proche) placé derrière la fente de sortie du spectrographe, enregistre le nombre de photons reçus. La résolution obtenue à l'aide de ce dispositif est de 12 Å.

## II. OBSERVATIONS

L'ensemble des spectres enregistrés couvre la région spectrale s'étendant de 5600 Å à 2900 Å. Les 44 spectres obtenus à l'aide du premier spectrographe, et que nous appelons « spectres violets » (2900 Å à 4900 Å), ont été intégrés afin de faire ressortir les diverses émissions du bruit de fond et d'obtenir des intensités moyennes pour la période d'observation. Les 15 spectres de la série dite « spectres visibles » (3900 Å à 5600 Å) ont également été intégrés pour les mêmes raisons. Cette manière de procéder s'avère indispensable par suite du caractère extrêmement variable de l'aurore.

Les émissions les plus intenses observées dans la région spectrale de 2900 Å à 4900 Å sont essentiellement les bandes principales du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$ . Les spectres de la série « spectres visibles » ont permis d'identifier, outre des bandes du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$ , des raies atomiques de OI, OII, NI, NII ainsi que  $H_\beta$ . Le tableau I synthétise les différentes émissions observées et donne la longueur d'onde ainsi que la nomenclature des transitions correspondantes.

TABLEAU I

*Identification des divers éléments spectraux*

### a) Bandes Moléculaires

#### 1. Premier Système Négatif de $N_2^+$ ( $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ )

Bandes	Longueurs d'onde
0 — 0	3914 Å
0 — 1	4278 Å
0 — 2	4709 Å
0 — 3	5228,5 Å
1 — 2	4236 Å
1 — 3	4651 Å
1 — 4	5148 Å

2. Second Système Positif de  $N_2$  ( $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ )

Bandes	Longueurs d'onde
0 — 0	3371 Å
0 — 1	3577 Å
0 — 2	3805 Å
0 — 3	4059 Å
1 — 0	3159 Å
1 — 2	3537 Å
1 — 3	3755 Å
1 — 4	3998 Å

b) Raies atomiques

Éléments	Nomenclature	Transitions	Longueurs d'onde
OI	aurorale	$2p^4\ ^1D - 2p^4\ ^1S$	5577 Å
	11	$3\ ^5P - 6\ ^5S^o$	5436 Å
	5	$3\ ^3S^o - 4\ ^3P$	4368,3 Å
	12	$3\ ^5P - 5\ ^5D$	5330 Å
OII	5	$3S\ ^2P - 2p\ ^2D$	4452 Å
NI	nébulaire	$2p^3\ ^4S^o - 2p^3\ ^2D^o$	5198,5 — 5200,7 Å
NII	19	$3p\ ^3D - 3d\ ^3F$	5001 — 5005 Å
	21	$2p\ ^3D - 3d\ ^3P$	4488 — 4507 Å
	42	$3d\ ^1D^o - 4f\ ^1F$	4176 Å
	43	$3d\ ^1D^o - 4f\ ^3F$	4171,6 Å
H <sub>3</sub>		$2\ ^2P^o - 4\ ^2D$	4861 Å

III. DISTRIBUTION D'INTENSITÉ DANS LES BANDES DU PREMIER SYSTÈME NÉGATIF DE  $N_2^+$  ET DU SECOND SYSTÈME POSITIF DE  $N_2$

La distribution d'intensité des émissions du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$  est donnée, dans un système d'unités arbitraires, dans les tableaux II et III.

TABLEAU II

Distribution de l'intensité dans les bandes du Premier Système Négatif de N<sub>2</sub>

$v'' \backslash v'$	0	1	2	3	4
0	1	0,35	0,09	0,06	—
1	—	—	0,05	0,05*	0,04*

TABLEAU III

Distribution de l'intensité dans les bandes du Second Système Positif de N<sub>2</sub>

$v'' \backslash v'$	0	1	2	3	4
0	3,17	3,20	1,15	0,76*	—
1	1,38	—	1,53	1,05	0,68

Dans ces tableaux, les lignes correspondent aux progressions  $v''$ , les colonnes aux progressions  $v'$ . Les intensités des diverses bandes ont été corrigées des facteurs liés à l'instrumentation (réponse spectrale des photomultiplicateurs, absorption optique, bruit de fond) mais n'ont pas été corrigées de l'extinction atmosphérique ni de la diffusion Rayleigh. Les intensités notées d'un astérisque sont sujettes à une imprécision résultant soit de la difficulté d'évaluer le bruit de fond dans la région spectrale étudiée soit de la contamination des bandes aurorales par des raies du Mercure qui ne sont pas d'origine aurorale.

## IV. INTENSITÉ DES RAIES ATOMIQUES

Les spectres de la série « spectres visibles » ont permis de déterminer des rapports d'intensité des principales raies atomiques observées dans la région spectrale de 3900 Å à 5600 Å. Les paires d'émissions ont été choisies suffisamment proches les unes des autres en longueur d'onde, de manière à réduire les erreurs qui peuvent provenir de l'extinction atmosphérique. Ces rapports sont les suivants :

$$\frac{I(\text{NII } 19 \text{ } 5001\text{-}5005 \text{ \AA})}{I(\text{NII } 21 \text{ } 4488 \text{ \AA})} = 1,2 \quad \frac{I(\text{NI nébulaire})}{I(0\text{-}3 \text{ } 1^{\text{er}} \text{ Nég } 5228,5 \text{ \AA})} = 0,3$$

$$\frac{I(\text{NII } 21 \text{ } 4507 \text{ \AA})}{I(\text{NII } 21 \text{ } 4488 \text{ \AA})} = 1,5 \quad \frac{I(\text{H}_\beta \text{ } 4861 \text{ \AA})}{I(0\text{-}2 \text{ } 1^{\text{er}} \text{ Nég } 4709 \text{ \AA})} = 0,75$$

$$\frac{I(\text{NII } 21 \text{ } 4488 \text{ \AA})}{I(\text{OII } 5 \text{ } 4452 \text{ \AA})} = 1,4 \quad \frac{I(\text{OI } 5577 \text{ \AA})}{I(0\text{-}0 \text{ } 1^{\text{er}} \text{ Nég } 3914 \text{ \AA})} = 1,43$$

Il convient de discuter un peu plus en détail deux de ces rapports, à savoir  $I(\text{H}_\beta)/I(4709)$  et  $I(5577)/I(3914)$ .

a) On notera immédiatement que la valeur du rapport  $I(\text{H}_\beta)/I(4709) = 0,75$

est particulièrement élevée, d'autant plus que l'aurore observée était une forme aurorale pulsante. Des observations photométriques faites par Omholt [2] pour ce même rapport conduisent en effet aux résultats suivants : immédiatement après la première phase du déploiement, le rapport se situe aux environs de 0,25 ; il diminue ensuite lentement pendant une demi-heure environ pour se stabiliser aux environs de 0,15 à 0,10. Lorsque les pulsations lumineuses commencent à apparaître, le rapport devient inférieur à 0,05. La phase pulsante du déploiement ne montre donc que de très faibles intensités pour  $H_{\beta}$  ; de plus, les pulsations lumineuses en  $H_{\beta}$  sont pratiquement inobservables. L'explication la plus raisonnable à la valeur particulièrement élevée du rapport  $I(H_{\beta})/I(4709)$  réside vraisemblablement en une contamination importante de l'intensité de  $H_{\beta}$  par celle des bandes de Vegard Kaplan et tout particulièrement la bande 2-15, qui constitue le « continuum » dans la région spectrale centrée sur  $H_{\beta}$ .

b) L'intérêt de la connaissance du rapport  $I(5577)/I(3914)$  ne réside pas seulement dans le fait que ces deux émissions sont les plus intenses dans la région visible des spectres auroraux de haute latitude, mais surtout en ce qu'il a permis, moyennant une étude détaillée de son évolution temporelle, de déduire des informations précieuses sur certains mécanismes d'excitation qui se produisent dans la haute atmosphère pendant les aurores. C'est ainsi que, selon Rees [3] la radiation verte (5577 Å) de OI résulte de l'excitation des atomes d'oxygène par des électrons secondaires produits lors de l'ionisation des molécules d'azote, tandis que la radiation violette (3914 Å bande 0-0 du Premier Système Négatif de  $N_2^+$ ) est due à l'excitation de l'azote lors du processus d'ionisation des molécules  $N_2$ .

#### V. CALIBRATION DE LA TRANSPARENCE

Les spectres auroraux sont généralement enregistrés à des distances zénithales importantes (dans le cas présent  $z = 30^\circ$ ), de sorte que la lumière traverse une couche atmosphérique relativement épaisse. Il en résulte que les observations peuvent être considérablement affectées par l'absorption et la diffusion dans l'atmosphère, en particulier dans la région violette et ultra-violette proche. De nombreux observateurs ont tenté d'apporter des corrections à cet effet, mais la diversité des résultats obtenus semble indiquer que la solution de ces problèmes est encore loin d'être complète.

Les systèmes de bandes procurent un moyen intéressant de déterminer le facteur empirique de calibration de la transparence. Cette détermination se base essentiellement sur le fait que les intensités relatives  $I(v', v'')$  des diverses bandes d'une progression  $v''$  (c'est-à-dire  $v'$  fixe et  $v''$  variable) sont entièrement indépendantes du type de source et du mécanisme d'excitation. En conséquence, si  $I_T(v'v'')$  désigne l'intensité théorique, ou obtenue en laboratoire, d'une bande ( $v'v''$ ) et  $I_0(v'v'')$  l'intensité de la même bande telle qu'elle est observée (c'est-à-dire affectée par la transparence), le rapport  $\frac{I_T(v'v'')}{I_0(v'v'')}$  calculé pour chaque bande de la progression est une fonction qui caractérise, à une constante près, la transparence de l'atmosphère pour la longueur d'onde considérée. Nous noterons «  $f_\lambda$  » ce facteur empirique de calibration de la transparence, qui est défini par la relation ;

$$af_\lambda = \frac{I_T(v'v'')}{I_0(v'v'')}$$

où  $a$  est une constante qui dépend des échelles employées. Dans cette définition,

les bandes utilisées doivent évidemment être choisies dans une même progression  $v''$ .

En prenant le logarithme de l'expression précédente, il vient :

$$\lg f_{\lambda} = \lg \frac{I_T(v'v'')}{I_0(v'v'')} + C^{te} \quad (1)$$

Nous déterminerons dans ce qui suit le facteur  $f_{\lambda}$  à partir des distributions d'intensité établies précédemment pour le Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et le Second Système Positif de  $N_2$ . Les intensités théoriques utilisées pour cette détermination de  $f_{\lambda}$  sont celles qui ont été publiées par Bates [4].

Le facteur empirique de calibration de la transparence que l'on en déduit est représenté sur la figure 1.

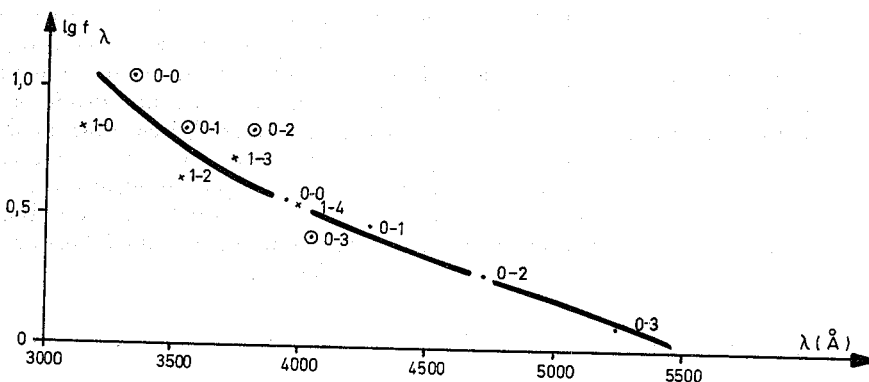


Fig. 1. — Facteurs empiriques de calibration de la transparence (échelle logarithmique).

$\cdot$  Bandes du Premier Système Négatif de  $N_2^+$ .

$\times$  Bandes du Second Système Positif de  $N_2$  (progression 1 —  $v''$ ).

$\odot$  Bandes du Second Système Positif de  $N_2$  (progression 0 —  $v''$ ).

Nous avons admis, pour la figure 1, que la constante figurant dans l'équation I était telle que  $\lg f_{\lambda} = 0$  pour  $\lambda$  voisin de 5577  $\text{\AA}$  (transition interdite de OI), faisant ainsi jouer à cette émission le rôle de raie de référence pour la détermination des intensités relatives.

Les valeurs obtenues sur la figure 1 pour  $f_{\lambda}$  montrent que les corrections à apporter aux intensités relatives, par suite de l'extinction atmosphérique sont importantes, spécialement dans la région ultra-violette. Seaton [5], en se basant sur des distributions d'intensité observées par Vegard et Kvitte, avait établi, selon la méthode décrite précédemment, un facteur de calibration de la transparence nettement plus élevé ( $f_{3000\text{\AA}} = 100$ ,  $f_{4000\text{\AA}} = 10$  lorsque  $f_{5577\text{\AA}} = 1$ ). Il a déduit de ces observations que les intensités des bandes du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$  présentaient un comportement anormal et il a attribué ces anomalies à des effets de self-absorption.

Il semble bien que ces effets de self-absorption ne peuvent pas expliquer les valeurs particulièrement élevées observées par Seaton pour  $f_{\lambda}$ , d'une part, parce que, dans le cas du Premier Système Négatif de  $N_2^+$ , une telle absorption ne peut devenir importante que si  $n(N_2^+)$  est de l'ordre de  $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , ce qui n'est probablement pas réalisé dans les aurores ; d'autre part, parce qu'il est très improbable

que de tels effets puissent rendre compte de la variation similaire du facteur  $f_\lambda$  pour les diverses progressions des deux systèmes de bandes considérés lors de la détermination de  $f_\lambda$  [8]. La courbe de calibration déterminée dans le présent travail semble donc plus proche de la réalité que celle de Seaton, d'autant plus que les distributions d'intensité des bandes des deux systèmes ont été établies à partir de mesures photo-électriques et sont donc, de ce fait, meilleures que celles qui ont servi de base au travail cité. Bates [6], discutant les résultats de Seaton a d'ailleurs suggéré que les distributions d'intensité données par Végard et Kville étaient erronées d'un facteur 2 ou plus. Signalons cependant que les facteurs de correction de l'extinction atmosphérique déterminés précédemment sont encore sensiblement plus élevés que ceux obtenus théoriquement par Eather [7] en se basant sur les équations de transfert. Il est très probable qu'une source de divergence entre les déterminations théoriques et expérimentales réside en une absorption par la couche d'ozone dont la concentration peut fluctuer considérablement.

## VI. TEMPÉRATURES VIBRATIONNELLES

Des températures vibrationnelles ont été calculées à partir des intensités relatives de certaines bandes du Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et du Second Système Positif de  $N_2$ . Ces températures se situent pour la plupart entre 450° K et 1000° K. Il est toutefois très difficile de relier ces températures vibrationnelles aux températures cinétiques car les populations de l'état supérieur impliqué dans les diverses transitions dépendent du processus d'excitation. De plus, cette détermination postule que les populations satisfont à une distribution de Boltzmann ; or, il est bien certain qu'une telle distribution n'est pas réalisée, d'autant plus que les transitions considérées sont des transitions permises. En fait, les deux systèmes de bandes considérés (Premier Système Négatif et Second Système Positif) se prêtent assez mal à une détermination de températures vibrationnelles. Il semblerait plus judicieux d'effectuer une telle détermination à partir des bandes de Végard-Kaplan de  $N_2$  ou des bandes atmosphériques de  $O_2$  car les états supérieurs des diverses transitions conduisant à ces deux systèmes de bandes sont des états métastables. Les molécules dans ces états peuvent alors subir un nombre suffisant de collisions pour que l'équilibre thermodynamique s'établisse. Il serait donc très intéressant de pouvoir obtenir un spectre ultra violet permettant d'améliorer la connaissance de la distribution des intensités dans les bandes de Végard Kaplan.

## CONCLUSIONS

Une étude spectroscopique dans le domaine visible et ultra violet proche a été effectuée à partir d'observations enregistrées à Kiruna au cours des nuits du 19 novembre 1966 et du 4 février 1967. Nous avons pu établir une distribution des intensités des bandes principales de deux systèmes de bandes, à savoir le Premier Système Négatif de  $N_2^+$  et le Second Système Positif de  $N_2$ , ainsi que des rapports d'intensité de certaines raies atomiques.

A partir de cette étude spectroscopique, des températures vibrationnelles ont été déterminées ; elles se situent entre 450° K et 1000° K. Il est toutefois très difficile de relier ces températures vibrationnelles aux températures cinétiques.

Cette étude spectroscopique nous a également permis de déterminer un facteur empirique de calibration de la transparence. Il semblerait, à partir de cette calibration, que l'absorption atmosphérique soit plus importante que ce que les calculs

théoriques ne le laissent prévoir. Rejetant l'hypothèse d'une self-absorption importante au sein de l'aurore pour des raisons évidentes, nous suggérons que cette particularité puisse être liée à une absorption anormale par la couche d'ozone, absorption sous estimée dans les considérations théoriques. Il est d'ailleurs très difficile de tenir compte correctement a priori de cette absorption car sa concentration peut varier dans des limites considérables, particulièrement lorsque l'atmosphère est hors d'équilibre. La méthode la plus efficace pour résoudre ce problème serait d'enregistrer pendant les observations aurorales le spectre d'une étoile connue.

#### RÉFÉRENCES

- [1] HARANG L., « The Aurorae », Chapman and Hall, London, 1951.
- [2] OMHOLT A., *Astroph. Journal*, 126, 461, 1967.
- [3] REES M. H., *J. Atm. Terr. Phys.*, Vol. 14, 325, 1959.
- [4] BATES D. R., *Proc. Roy. Soc.*, London, A 196, 217, 1949a.
- [5] SEATON N. J., *J. Atm. Terres. Phys.*, Vol. 4, 285, 1954.
- [6] BATES D. R., « The auroral spectrum and ... ». Acad. Press New York, 1960a.
- [7] EATHER R. H., *J. Geophys. Research*, 1967.
- [8] GÉRARD J. Cl., *Bull. Soc. Sc. Lg.*, sous presse.