



**HAL**  
open science

# Etude des aurores polaires au Scoresby Sund pendant l'année polaire

A. Dauvillier

► **To cite this version:**

A. Dauvillier. Etude des aurores polaires au Scoresby Sund pendant l'année polaire. Journal de Physique et le Radium, 1934, 5 (8), pp.398-412. 10.1051/jphysrad:0193400508039800 . jpa-00233251

**HAL Id: jpa-00233251**

**<https://hal.science/jpa-00233251>**

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.

# ETUDE DES AURORES POLAIRES AU SCORESBY SUND PENDANT L'ANNÉE POLAIRE

Par M. A. DAUVILLIER.

**Sommaire.** — L'auteur souligne l'importance des aurores polaires aux points de vue de la physique solaire, de la géophysique et de la connaissance de l'ionosphère.

Il décrit le mode d'observation utilisé au Scoresby Sund pendant l'Année Polaire. Une veille continue, effectuée par quarts de trois heures, totalisant 2 700 heures d'observation, a permis de dresser une statistique aurorale complète.

Il décrit les diverses formes observées ainsi que leurs mouvements et donne une interprétation théorique, basée sur la turbulence de la haute ionosphère, des ondes lumineuses parcourant les draperies.

Il étudie ensuite le processus de transformation d'un arc homogène diffus en une mince draperie parcourue par des rayons mobiles et déliés, les mouvements d'ondulation et les tourbillons montrés par ces rayons. Un schéma de ces mouvements, appuyé par des photographies prises au zénith, en permet l'analyse. Ils sont interprétés comme une turbulence de l'ionosphère provoquée par les variations d'intensité du flux électronique solaire.

Le phénomène de contraction est étendu à la transformation d'une aurore non polaire diffuse, existant sous toute latitude, en une draperie à rayons. Une théorie ionique de cette transformation, basée sur les phénomènes observés pour des pressions beaucoup plus élevées, dans les tubes à rayons cathodiques, rend compte du phénomène. L'auteur souligne l'importance des aurores équatoriales au point de vue de la théorie générale de l'aurore.

Il étudie ensuite les rayons, leur inclinaison, leurs mouvements, leur aspect et discute leur nature. Les mesures indiquent qu'ils sont constitués par des rayons magnéto cathodiques, l'énergie des électrons secondaires étant de l'ordre de  $10^7$  eV. c'est-à-dire voisine de celle des électrons secondaires excités par les électrons cosmiques au sol.

Les mouvements d'ondulation et spiralés présentés à une beaucoup plus grande échelle dans le temps et dans l'espace par les draperies, sont illustrés par des photographies. Les travaux de restitution du Ct Habert permettent d'effectuer la mesure précise de ces mouvements.

L'auteur précise ensuite les variations de brillance des phénomènes auroraux et explique les fausses apparences d'aurores « au sol » maintes fois signalées.

L'étude de la brillance le long des rayons montre une décroissance très lente de la pression dans l'ionosphère avec l'altitude, due au régime turbulent dont elle est le siège. Cette turbulence est accusée par les mouvements des nuages phosphorescents post-auroraux. Elle explique l'aspect apparemment désordonné des « orages auroraux ». Les draperies montrent parfois l'existence de couches gazeuses absorbantes, vers 100 Km d'altitude, qui sont à rapprocher du troisième arc crépusculaire et de la couche E de Kennelly-Heaviside.

L'auteur décrit la variation diurne très accentuée, observée au Scoresby Sund et l'interprète par un déplacement géographique de la zone aurorale dû aux variations périodiques de l'inclinaison de l'axe de Gauss par rapport au plan de l'écliptique.

L'auteur définit une « activité aurorale » bi diurne et étudie ses variations au cours de « l'année aurorale ». La courbe correspondante montre que l'aurore a été un phénomène quasi-permanent au Scoresby Sund, en un lieu intérieur à la zone aurorale. La courbe, en parfait accord avec celle de l'activité magnétique, accuse la période de rotation solaire de 27 jours.

Les courbes aurorale et magnétique sont en opposition de phase avec la courbe représentant l'activité solaire, le décalage étant d'une demi-période de rotation. Ce phénomène ruine les théories hertziennes et ultraviolettes de l'Aurore et du magnétisme terrestre ainsi que les théories basées sur l'émission par le Soleil de nuages de corpuscules complémentaires électrisés. Il vérifie la théorie électronique des jets coronaires et leur déviation magnétique au voisinage du Soleil et s'accorde avec les observations astronomiques effectuées durant les éclipses.

La variation annuelle de l'activité aurorale est faible et peu accentuée.

La spectrographie visible et ultraviolette de l'aurore a permis de retrouver une partie des résultats déjà obtenus par Vegard en d'autres régions de la zone aurorale.

L'auteur a établi au Scoresby Sund un enregistreur photoélectrique des aurores. Il expose théoriquement le problème et décrit le système optique, la cellule et l'amplificateur utilisés. Cet appareil a montré que l'intensité lumineuse de l'aurore pouvait varier dans une grande proportion.

Des aurores invisibles à l'œil nu, apparaissant au crépuscule ou par temps couvert, ont été décelées et enregistrées. L'appareil permet une comparaison précise des courbes aurorales avec les magnétogrammes et tellurogrammes. Il permet dorénavant de mesurer quantitativement un phénomène jusqu'alors apprécié d'une manière subjective purement empirique.

**1. Introduction.** — Le terme d' « aurore polaire », qu'il faut bien employer puisqu'il est consacré par l'usage, est doublement inexact car il introduit une confusion fâcheuse avec la lumière solaire et il s'ap-

plique à un phénomène nullement limité aux régions polaires. Il ne se passe guère de maximum solaire sans qu'il se manifeste sous nos latitudes et, plus rarement, dans les régions équatoriales. Il intéresse,

à vrai dire, toute la Terre, mais avec une probabilité variable, et ce point capital semble avoir échappé à la plupart des théoriciens de l'aurore. En tout lieu du Globe, l'aurore générale permanente, à laquelle on doit une partie de la luminosité du ciel nocturne, peut se transformer en une aurore localisée, brillante et mobile. Il conviendrait plutôt de l'appeler la « Lumière Electrique Atmosphérique », par exemple, car sa nature cathodique ne fait plus aucun doute et elle est liée à la présence des gaz raréfiés de la haute atmosphère.

C'est ce caractère mondial de l'aurore, joint à ses relations avec la physique solaire et nombre de phénomènes géophysiques, tels que le magnétisme terrestre, les courants telluriques, l'ozone atmosphérique, etc., qui en fait un des phénomènes les plus importants de la physique cosmique.

L'aurore constitue aussi un des rares moyens d'étude de la haute atmosphère dont nous disposons. Celle-ci joue un rôle essentiel dans les radiocommunications. La météorologie, qui semble conditionnée par l'état de l'ionosphère, sans qu'on puisse encore saisir les rapports existants entre les causes extérieures, d'origine solaire, et les effets produits dans la troposphère, devra y apporter une attention croissante. Enfin cette région sera bientôt le milieu de l'aviation stratosphérique et, plus tard, celui de l'astronautique.

**2. Observation des aurores.** — L'Expédition française de l'Année Polaire a séjourné au Scoresby Sund, sur la côte orientale du Grönland, du 27 juillet 1932 au 15 août 1933. Les coordonnées géographiques de la

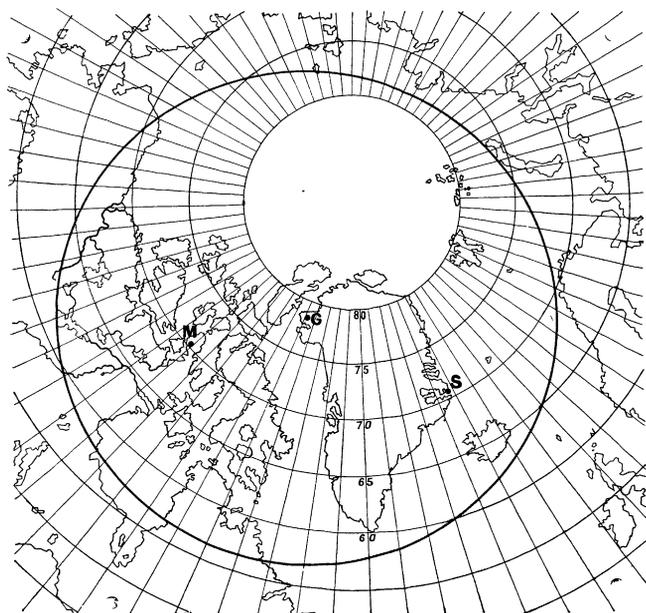


Fig. 1.

station principale, établie à l'altitude de 40 mètres, au voisinage de la mer, étaient : latitude nord  $70^{\circ}29'1''$ ;

longitude  $21^{\circ}57'7''$  W. Greenwich, correspondant à un retard horaire de deux heures (fuseaux) sur le temps universel. La carte de la figure 1 montre la situation géographique de la station S comparativement au pôle magnétique actuel M, au pôle de Gauss G et à la zone aurorale, schématisée par la circonférence centrée sur G.

L'observation simultanée des aurores dans toute la zone arctique de l'hémisphère obscur constituait l'un des buts principaux de l'Année Polaire. Au Scoresby Sund, ces observations, liées à la longueur de la nuit, furent possibles depuis le début de septembre jusqu'au début d'avril.

La figure 2 montre la distribution du nombre des heures d'observation durant cette période. Pendant la « nuit polaire », du 21 novembre au 21 janvier, la veille atteint 17 heures consécutives. Au total, 2 700 heures d'observation furent effectuées.

L'Aurore Polaire est, en effet, un phénomène apparemment si fugace et si capricieux qu'une statistique

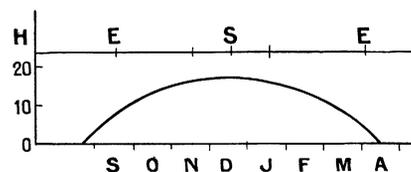


Fig. 2.

précise ne peut en être dressée que par une veille continue. Les résultats obtenus par de courtes observations périodiques du ciel peuvent conduire à des conclusions erronées. Le personnel de l'Expédition étant nombreux (15 membres) et surtout constitué d'officiers de marine et de marins, une veille continue, effectuée par « quarts » de trois heures, par douze d'entre nous, fut organisée par le lieutenant de vaisseau Habert, chef de l'Expédition, à partir du 17 septembre 1932.

L'observation des aurores s'effectue, en général, dans les régions polaires, en plein air et dans des conditions très pénibles. Il semblait possible de faire beaucoup mieux. Nous fîmes édifier sur le toit de la station — laboratoire (voir fig. 3) une tour hexagonale de deux mètres de diamètre terminée par une cabine munie de six glaces doubles inclinées et d'un capot central relevable. Les observations pouvaient ainsi se faire à l'air libre, la tête de l'observateur affleurant l'ouverture du capot, tandis qu'il était baigné dans un courant d'air chaud ascendant, provenant de l'intérieur du bâtiment.

Des supports mobiles et orientables, fixés à l'intérieur, pouvaient recevoir un ou deux appareils photographiques utilisables ainsi sans mouffles par les plus grands froids. Par très mauvais temps, il était encore possible de faire des observations spectroscopiques au travers des glaces. De très nombreuses aurores n'ont été décelées par temps couvert que grâce au spectroscopie (raie  $5577 \text{ \AA}$ ). Pour éviter les dépôts de givre,

l'espace compris entre les glaces, était chauffé par un ruban de nichrome absorbant une centaine de watts. Enfin, l'intérieur de la cabine portait une graduation angulaire apparente pour l'orientation rapide des phénomènes observés.



Fig. 3.

On sait que les aurores sont toujours sensiblement orientées selon des parallèles magnétiques se rapportant à l'axe théorique de Gauss. Il était donc plus indiqué de les rapporter à ces points cardinaux magnétiques qu'aux coordonnées géographiques. Or, il se trouve, qu'au Scoresby Sund, la direction de ce pôle de Gauss (Thule) coïncide sensiblement avec la déclinaison ( $33^{\circ}41'$  Ouest). Les points cardinaux inscrits dans la coupole le furent donc simplement d'après les indications du compas.

Une sphère céleste orientée et mue par un mouvement d'horlogerie selon le temps sidéral, ainsi qu'un dispositif de calque sur carte lumineuse plane du ciel furent même installés par le Commandant Habert. Le premier permettait la mesure rapide des hauteurs stellaires de référence. Le second, la restitution de la position géographique des aurores au moyen d'un système de projection particulier. Sur le cahier d'observations, éclairé par une lampe veilleuse, étaient portées les indications suivantes :

- 1° L'heure, exprimée en temps de Greenwich.
- 2° Les conditions météorologiques, au point de vue de la visibilité;
- 3° La forme de l'aurore (arc homogène, draperie, rayons, couronne, etc.);
- 4° La position des lueurs, en fonction des points cardinaux magnétiques, (coordonnées de la station);
- 5° Leur hauteur au-dessus de l'horizon;
- 6° Leur position par rapport aux étoiles caractéristiques.
- 7° L'intensité du phénomène, exprimée selon l'échelle internationale (0 à 4), appréciée à l'œil nu ou, par temps couvert, au spectroscopie.

Plus de dix mille observations de ce genre furent

notées. Elles seront publiées dans un autre recueil. Nous nous bornerons à reproduire ici, à titre d'exemple, une page d'observations :

« 14/3/ 1933, quart de 4 h. à 7 h. Gr., observateur : Habert.

- 4 h 00 Ciel entièrement couvert. Il neige. Spectre continu au spectroscopie. (Lune 1<sup>er</sup> quartier). Aucune aurore observable.
- 4 h 30 Ciel couvert avec trous. Il neige toujours. Quelques étoiles apparaissent au S W et au zénith. Aucune aurore observable.
- 4 h 45 Rayons visibles entre les nuages : Azimut :  $270^{\circ}$ ,  $h = 45^{\circ}$ ,  $I = 1$ .
- 4 h 55 Arc visible entre les nuages au S,  $h = 75^{\circ}$ ,  $I = 1$  Raie à peine discernable à l'Est.
- 5 h 00 Ciel 9/10 couvert.
- 5 h 20 Ciel 8/10 couvert. La neige cesse.
- 5 h 25 Lueur aurorale au  $150^{\circ}$   $h = 12^{\circ}$ ,  $I = 1$ , visible entre les nuages.
- 5 h 30 Ciel 5/10 couvert. L'Aube éclaire tout l'Est du ciel.
- 5 h 36 Draperie au  $160^{\circ}$ ,  $h = 10^{\circ}$ ,  $I = 3$ . Forte brillance malgré la lumière de l'aube. Assez grande turbulence.
- 5 h 42 Arc double culminant au S;  $h = 85^{\circ}$  (calque),  $I = 1$
- 5 h 47 Autre arc culminant au Nord;  $h = 85^{\circ}$ , (calque)  $I = 1$ .
- 5 h 50 Lueurs éparées et très faibles sur les positions de l'arc de 5 h 42.
- 5 h 56 Draperies culminant au zénith;  $I = 2$ , (vers l'Est), très brillante à l'Ouest;  $I = 3$  (calque).
- 6 h 00 Quelques lueurs subsistent, mêmes positions.
- 6 h 13 Fragment de draperie visible à travers les nuages :  $280 < A < 290^{\circ}$ ,  $h = 60^{\circ}$ ,  $I = 2$ .
- 6 h 20 Fragment d'arc à peine perceptible sur le ciel clair :  $A = 270^{\circ}$ ,  $h = 50^{\circ}$ .
- 6 h 28 Deux draperies culminent, l'une au S :  $h = 88^{\circ}$ , l'autre au N :  $h = 55^{\circ}$ ,  $I = 2$ . Les rayons ébauchent une couronne.
- 6 h 30 Rayons au  $280^{\circ}$ ,  $h = 60^{\circ}$ ,  $I = 2$ .
- 6 h 38 Il fait jour. On distingue les couleurs du spectre. Les étoiles de première grandeur seules apparaissent encore. On observe cependant un fragment de draperie très brillant :  $A = 300^{\circ}$ ,  $H = 60^{\circ}$ ,  $I = 3$ ?
- 6 h 46 Rayon très brillant à l'ouest :  $30^{\circ}$  à  $50^{\circ}$   $I = ?$   
Il fait grand jour.

On voit, d'après cet exemple, que lorsque les conditions de visibilité sont favorables, l'aurore, quoiqu'étant un phénomène essentiellement discontinu, est quasi-permanente. Si l'on divise les journées d'observations en deux périodes, comptées de 0 à 12 heures et de 12 h à 24 heures, deux seulement de bonne visibilité, (5 février soir, 8 février matin), (quoique ayant eu lieu par pleine lune), n'ont pas montré d'aurore, ce qui repré-



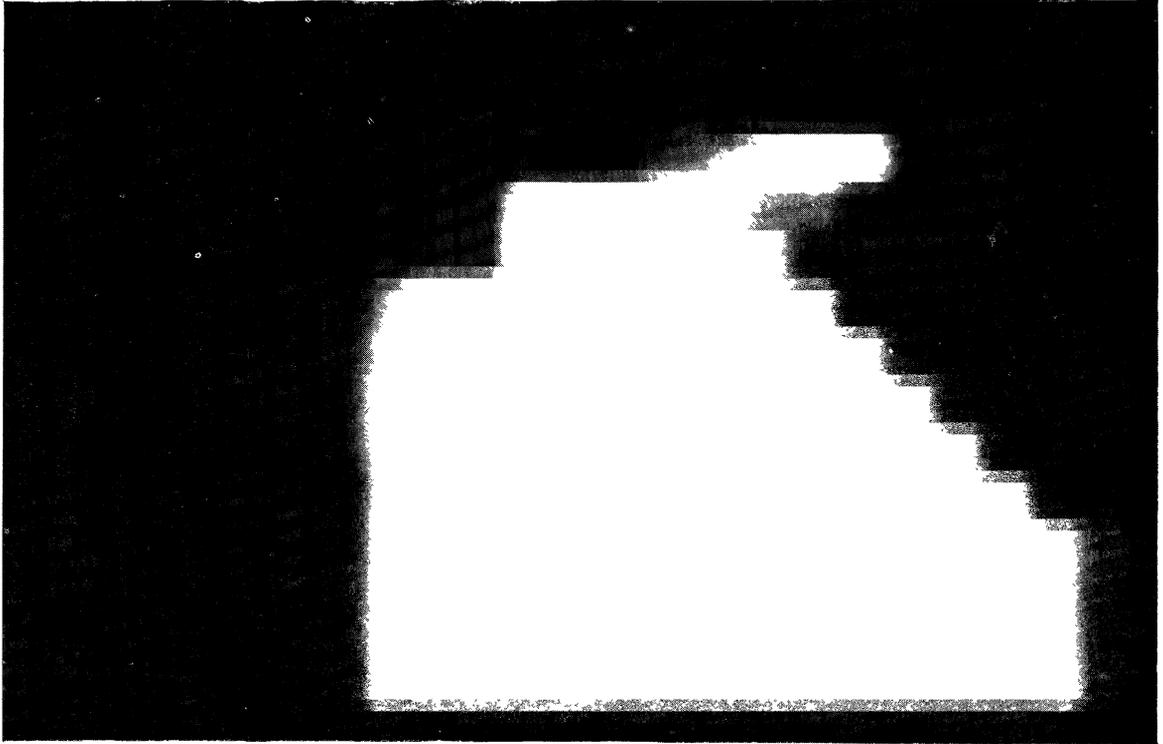


Fig. 4.

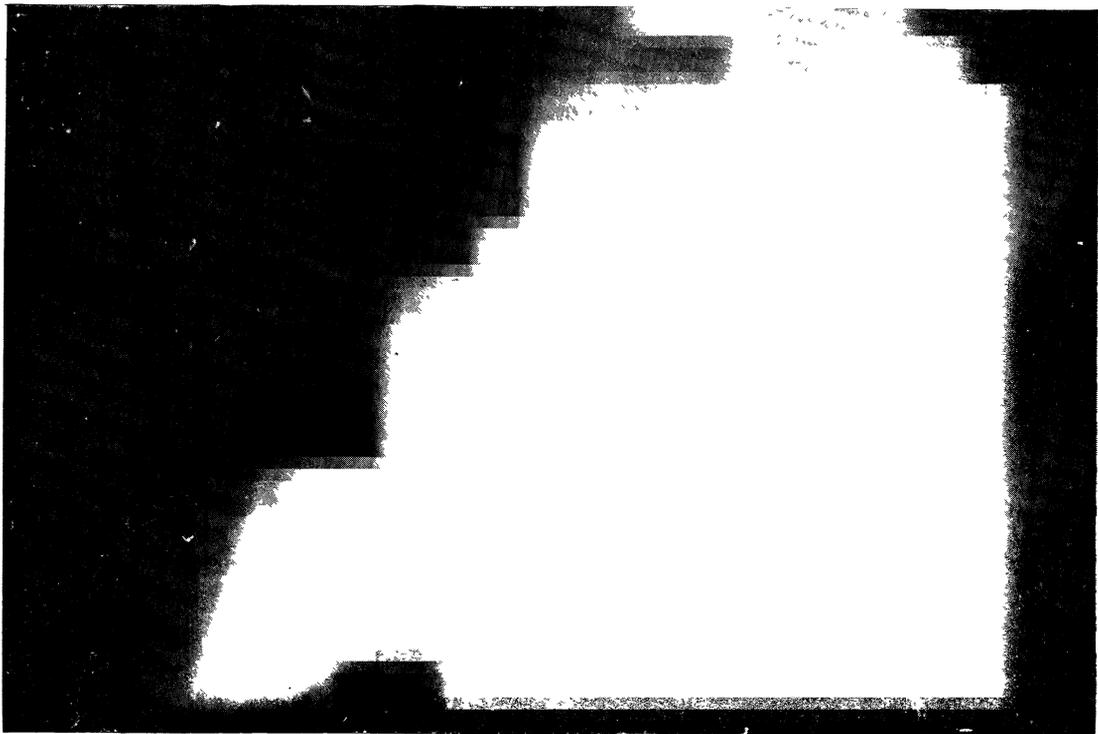


Fig. 4 bis.



Fig. 6.

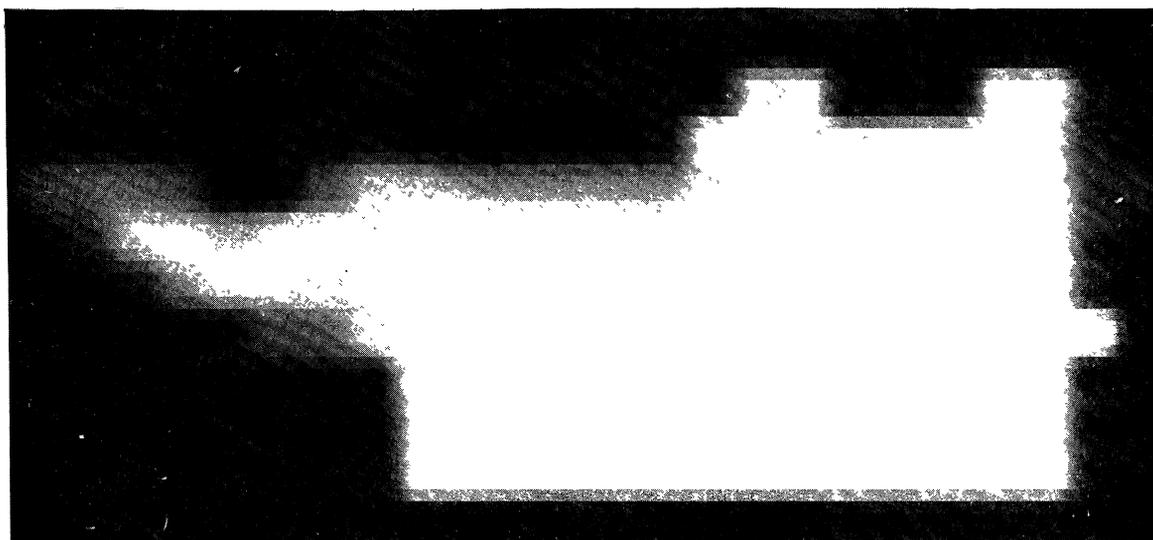


Fig. 8.



Fig. 12.







Fig. 11.



Fig. 10.

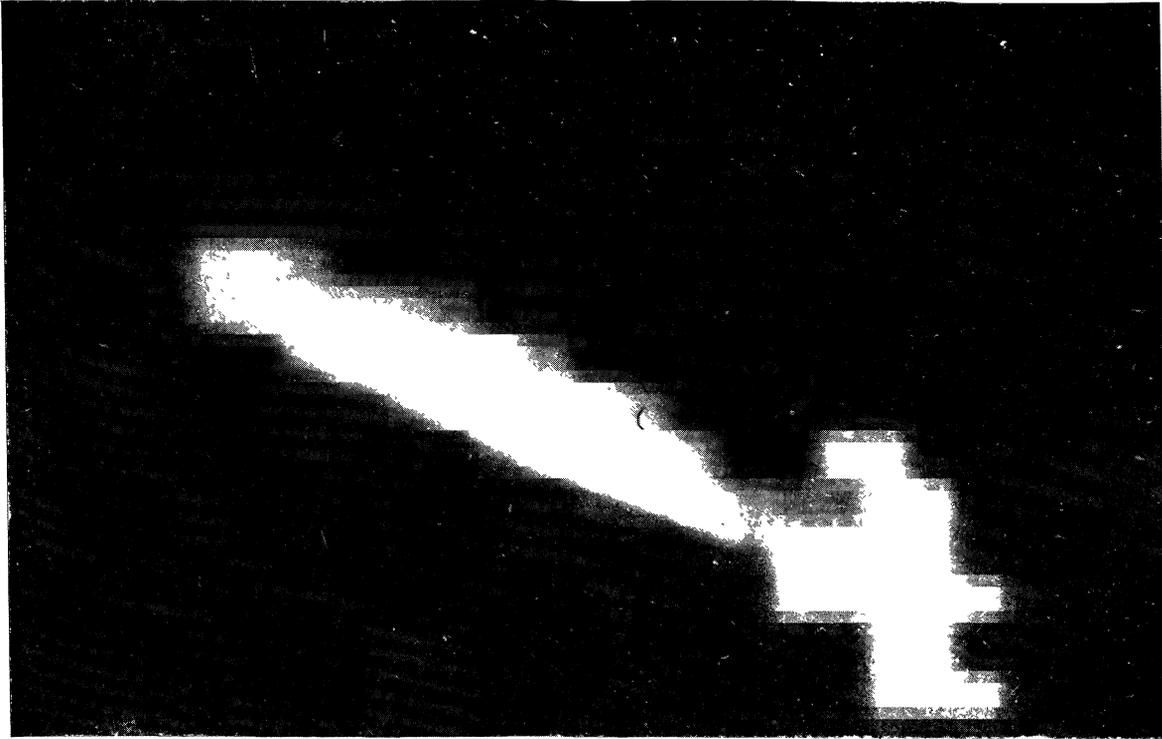


Fig. 5.

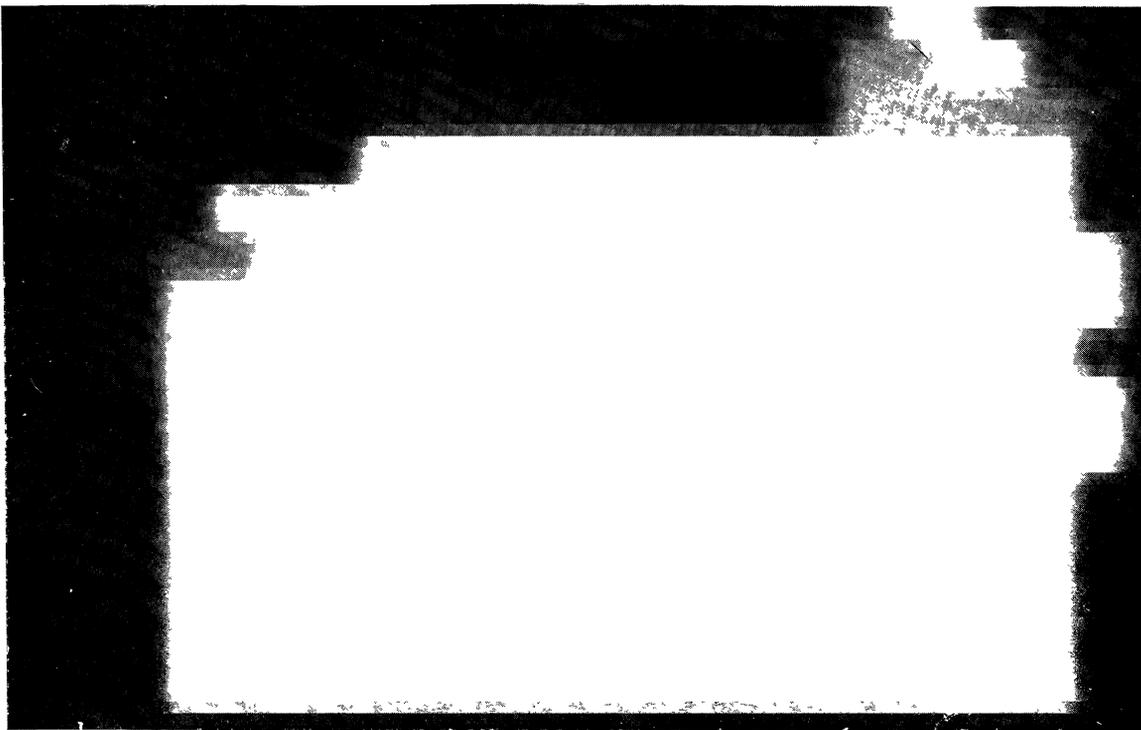


Fig. 13.



sente une proportion de 0,5 pour 100. Une statistique horaire donnerait sans doute une proportion supérieure. Néanmoins, on voit qu'en pleine période de minimum solaire et en une station située au nord de la zone de fréquence maxima de Fritz, l'aurore est à peu près permanente.

**3. Formes aurorales.** — Toutes les formes classiques (arc, draperies etc.) ont été observées, toujours sensiblement orientées, de l'Est à l'Ouest.

Les déviations atteignent 45° de part et d'autre de la direction E-W d'une façon apparemment désordonnée. Cependant les beaux travaux de restitution du Commandant Habert montrent un déplacement diurne, régulier du pôle auroral, les arcs du soir étant centrés vers le NE et ceux du matin vers le NW. Ce mouvement est en accord avec les observations faites à bord du « Maud » (1).

D'une manière générale, les arcs diffus homogènes et tranquilles ont été plutôt observés au Sud. Si la base d'un tel arc est vue, par exemple, à 10° au-dessus de l'horizon, il culmine à 570 Km de distance, sa hauteur étant de l'ordre de 100 Km, c'est-à-dire qu'il se trouve au-dessus du Nord de l'Islande, en pleine zone aurorale.

Des arcs ont été vus simultanément au Sud et au Nord, respectivement à 5 et 8° de hauteur (28/2/33). Leur distance était ainsi de 1800 Km. La largeur de la zone aurorale n'est pas une grandeur définie. Elle n'a qu'une valeur statistique.

Ces arcs n'ont jamais été assez brillants (intensité maximum 3) pour paraître colorés. Ils pouvaient persister plus d'une heure sans changement apparent.

Les arcs et les draperies peuvent se déplacer tout d'une pièce et très rapidement vers le nord ou vers le Sud. Par exemple, le 4/2/1933 une draperie vue au Nord à 21 h 54 ( $h = 85^\circ$ ) culminait au Sud ( $h = 63^\circ$ ) une minute plus tard. La vitesse de déplacement était ici de l'ordre du Km par seconde (2/3 Km/sec). Ces mouvements sont aisément interprétés dans la théorie que nous avons donnée de ces phénomènes (2) par une variation continue de l'énergie des électrons primaires d'origine solaire.

On peut dire que le volume et la mobilité des phénomènes auroraux varient inversement avec leur intensité. Parfois la raie verte est visible, par ciel pur, sur le ciel tout entier. Un arc homogène tranquille, vu au Zénith, peut atteindre une largeur de 50°, ce qui correspond à une épaisseur d'une centaine de kilomètres. Dès que l'intensité augmente, il se contracte et est parcouru par des ondes lumineuses longitudinales à bord net du côté du sens de la propagation et à bord diffus du côté opposé. Des exemples d'une telle onde, qui peut se déplacer à toutes les allures, jusqu'à 40°/sec (plusieurs dizaines de kilomètres par seconde) sont visibles sur les figures 4 et 4 bis. Cet effet est dû à la phosphorescence de l'air excité par les rayons cathodiques, le phénomène

d'excitation durant lui-même seulement un temps très court, d'autant plus court que l'intensité est plus grande et pouvant sans doute s'abaisser jusqu'au millième de seconde.

La phosphorescence, qui résulte du retour à l'état stable des atomes excités (la raie verte caractéristique 5377 Å correspond à la transition  $^1S_0 - ^1D_2$ ), s'affaiblit graduellement et peut persister près d'un quart d'heure dans le cas des plus fortes excitations ( $I = 4$ ).

Lorsque l'intensité augmente, l'arc hétérogène se transforme d'abord en une mince draperie parcourue par des rayons lumineux très déliés et très mobiles. Le cliché de la figure 6 en donne un exemple. Vue au Zénith, la largeur ne dépasse pas quelques minutes, soit moins d'un kilomètre, diamètre moyen d'un rayon. En même temps, la draperie ondule lentement avec un très grand rayon de courbure, de l'ordre de 100 Km.

Cette contraction du phénomène lumineux dans l'espace au voisinage de la Terre (à quelque centaines de kilomètres du sol) traduit nécessairement la contraction correspondante de la source en fonction de l'intensité. D'après la théorie, cette source est constituée par une boucle d'électrons solaires de grande énergie, enroulés dans le champ magnétique du Globe à une grande altitude, de l'ordre du rayon terrestre. Ces corpuscules arrivant dans le plan de l'équateur solaire sont déviés par le champ magnétique du Globe et ne rencontrent pas celui-ci, mais seulement les confins de son atmosphère qui, théoriquement, s'étend jusqu'à 6,6 rayons terrestres, comptés à partir du centre. Ce faisceau cathodique primaire, traversant un gaz ionisé (ionosphère) par le rayonnement ultra-violet solaire, donc à charge spatiale positive, est fort analogue aux faisceaux cathodiques se propageant dans le gaz raréfié d'un tube de Crookes à basse tension et il est bien connu que, dans ce cas, il se produit, pour une certaine densité électronique du faisceau, dépendant de la pression, une remarquable concentration électrostatique ionique (Johnson, Buchta). Un faisceau cathodique à basse tension produisant un spot brillant d'un millimètre carré de section, transporte environ un microampère et est concentré sous la pression d'une barye. Il a une densité de  $10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>. La densité que l'on peut attribuer aux électrons solaires peut être estimée, par diverses considérations, à  $10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>. C'est une densité un million de fois plus petite qui correspondrait à une pression de concentration de l'ordre de  $10^{-6}$  barye. Telle est la pression que l'on peut attribuer à notre atmosphère à une altitude d'un rayon terrestre.

Ce phénomène de contraction, auquel nous assistons constamment dans les régions polaires, semble nous donner la clef du mécanisme de l'apparition des draperies dans les régions tempérées et équatoriales. De telles aurores sont inexplicables dans les théories (Birkeland, Störmer) attribuant le phénomène lumineux à l'impact direct d'électrons solaires. L'énergie qu'il faut alors attribuer à ces corpuscules, pour leur faire rencontrer le Globe, est d'autant plus grande que la latitude magnétique est plus faible. Or, on sait que l'altitude du bord

(1) FISK et FLEMING, *Terr. Magn.*, mars 1928, t. 33, p. 37.

(2) A. DAUVILLIER, *Rev. Gen. Electr.*, t. 31, 5 mars, 2 et 9 avril 1932.

inférieur net est toujours voisine de 100 km, c'est-à-dire que le pouvoir de pénétration des électrons est constant et indépendant de la latitude.

Si les phénomènes lumineux sont, au contraire, d'us

à des électrons secondaires, comme le pensait P. Villard, ceux-ci auront toujours la même énergie. Les orbites primaires, polaires et équatoriales, donneront à tout moment naissance à l'aurore générale perma-

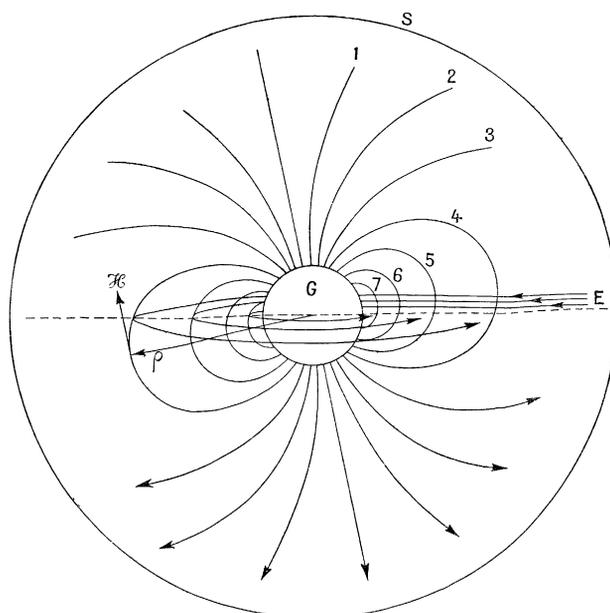


Fig. 7.

nente, à laquelle nous devons une partie de la luminosité du ciel nocturne. Sous toute latitude, un accroissement de densité de ces orbites donnera naissance à une draperie, selon le mécanisme précité.

L'un des plus beaux exemples d'aurore équatoriale que l'on puisse citer est celui observé par Angenheister<sup>(1)</sup> à Samoa (14° S) le 15 mai 1921. Il coïncida avec le passage par le méridien central du Soleil d'un groupe de trois taches. Entre 18 et 19 heures (temps local) un arc rouge intense ( $h = 20^\circ$ ), centré sur le méridien magnétique, apparut au sud de Tongatabu (22° S). Il est à remarquer que le pôle de Gauss est, dans l'hémisphère austral, plutôt tourné vers les îles de la Sonde. C'est la région la plus favorablement située pour l'observation de telles aurores.

Non seulement la nouvelle théorie rend compte de l'aurore permanente mondiale, mais elle donne une interprétation simple de ces aurores équatoriales. Si l'on considère (voy. fig. 7) les enroulements ayant lieu dans le plan équatorial magnétique du Globe, son champ  $\mathcal{H}$  peut être considéré comme celui d'un dipôle placé en son centre et variant, à partir de ce point, inversement au cube de la distance, c'est-à-dire du rayon de courbure  $\rho$ . Les grandes valeurs du produit caractéristique  $\mathcal{H}\rho$  correspondent aux orbites de grande énergie les plus voisines du Globe. Par conséquent, comme le montre la figure, les électrons secondaires libérés donneront naissance à des aurores d'autant

plus voisines de l'équateur que l'énergie des électrons solaires sera plus grande. L'espace compris entre les tubes de force 1 et 3 représente la zone aurorale polaire de Fritz, tandis que le tore 7 correspond à l'aurore observée à Samoa. Il est à remarquer que les aurores que nous voyons en France sont dues, non à des orbites polaires, géométriquement impossibles, mais à des trajectoires équatoriales de grand rayon de courbure enroulées sur 4. Par raison de symétrie ce mécanisme donnera naissance à la fois à des aurores boréales et australes qui seront d'autant plus intenses qu'elles seront de plus basse latitude. On peut ainsi calculer que l'énergie maxima des électrons solaires peut atteindre  $3,5 \cdot 10^{10}$  eV. La sphère S correspond à la limite théorique de l'atmosphère.

Un phénomène extrêmement remarquable, qui semble avoir échappé à la plupart des observateurs d'aurores, a été fréquemment observé au Scoresby Sund. Il apparaît lorsqu'une draperie intense souvent colorée : ( $I = 4$ ) passe au Zénith. Le mouvement d'ondulation signalé plus haut s'exagère et dégénère en mouvement de rotation produisant des tourbillons isolés de rayons. Ce mouvement est si rapide qu'il est fort difficile à saisir et à analyser, et que la photographie, qui exige une pose de l'ordre de la seconde avec un objectif ouvert à  $f/1,2$  ne peut en rendre les diverses phases. Cependant, le cliché de la figure 8 a saisi la seconde phase du phénomène. L'évolution de celui-ci est schématisé par les dessins de la figure 9 qui montrent la trace des rayons vus au Zénith. Lorsque le sens du par-

(1) *Meteor. Z.*, 1932, t. 39, p. 20.

cours de la draperie par les rayons est  $W \rightarrow E$ , l'enroulement de ceux-ci a lieu dans le sens contraire au mouvement des aiguilles d'une montre.

Lorsque le phénomène a acquis cette intensité maxima, le défilé des rayons est si rapide que la période de rotation ne semble pas dépasser le centième de seconde, avec un diamètre d'enroulement de l'ordre de quelques degrés. A notre connaissance, ce phénomène n'a déjà été signalé qu'une seule fois, par A. Wegener<sup>(1)</sup>, qui l'a aussi observé sur la côte orientale du Grönland, à Danmarks Havn, lors de ses hivernages de 1906-1908.

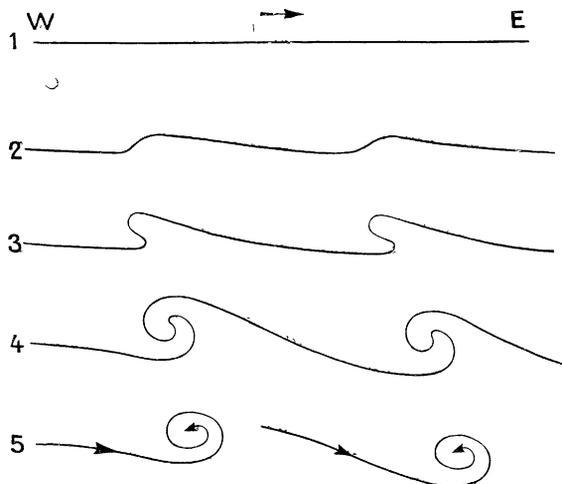


Fig. 9..

Ce phénomène doit être tout à fait général mais quelle en est la nature? Pour répondre à cette question nous devons d'abord préciser celle des rayons. Ceux-ci semblent bien être des rayons magnéto-cathodiques, au sens que leur a donné M. Fortin<sup>(2)</sup>, c'est-à-dire des électrons secondaires, d'origine atmosphérique, d'énergie relativement faible, enroulés le long des lignes de force magnétique du champ terrestre. Ces rayons, dont les figures 10 et 11, donnent quelques exemples, sont remarquablement longs et déliés. On peut vérifier de diverses façons qu'ils coïncident avec l'inclinaison magnétique. Par exemple, la figure 12 montre une inclinaison de  $78^\circ$  qui a été plusieurs fois contrôlée par la position du point de radiançe de la couronne zénithale par rapport aux étoiles (vu au Sud, hauteur :  $77-78^\circ$ ). Les rayons suivent donc bien les lignes de force magnétique et ils les suivent toujours<sup>(3)</sup>. Mais, lorsqu'un rayon tourne en spirale il s'agit sans doute d'un effet de perspective : l'inclinaison peut demeurer constante et, seule, la source gazeuse tourbillonner.

Le gaz traversé par les électrons solaires perdant des

<sup>(1)</sup> A. WEGENER, *Meddelelser om Grönland.*, 1930, Bind LXXV, p. 666.

<sup>(2)</sup> FORTIN, *C. R.*, 1904, t. 138, p. 1594.

<sup>(3)</sup> On sait que, par suite d'un effet de parallaxe, le point de radiançe est toujours un peu au-dessous du zénith magnétique. (Gallé, *Astron. Nach.*, t. 79; Lespiault, *Journ. de Phys.*, t. 3, p. 79, 1874).

électrons de grande énergie, acquiert donc une charge spatiale positive. S'il est animé d'une grande vitesse de translation (par ex.  $W \rightarrow E$ ) le long de la draperie, il sera équivalent à un courant et la loi de Laplace montre qu'il formera des tourbillons autour des lignes de force du champ magnétique parcourues dans le sens inverse à celui des aiguilles d'une montre, pour un observateur au sol. La vitesse tangentielle dépend de la charge et de la vitesse de translation. Elle peut atteindre 1 000 km/sec. Si la théorie est exacte, le sens de rotation doit être inversé dans l'hémisphère austral.

Les perturbations magnétiques sont enregistrées au sol par des variomètres, c'est-à-dire des appareils mécaniques à aimants permanents mobiles, d'une inertie de l'ordre de plusieurs secondes. Les perturbations extrêmement rapides dans l'inclinaison, par exemple, que nous observons dans le ciel, ne peuvent être enregistrées par eux. Dans le but de mettre en évidence ces perturbations de grande fréquence et de grande amplitude, probables mais encore inconnues, nous avons emporté au Scoresby Sund un oscillographe cathodique à basse tension dont le spot aurait accusé les variations rapides du champ. Malheureusement, cet appareil fut victime d'un irréparable accident et l'isolement complet de la station entre chaque été n'en permit pas le remplacement. Nous nous proposons de reprendre ces observations avec un tube cathodique fonctionnant à très basse tension (30 volts).

L'existence même du rayon isolé soulève un problème fondamental. La concentration ne semble pas ici d'être à un effet ionique, car le diamètre ne varie pas sur plusieurs centaines de kilomètres de hauteur, dans un milieu où la densité doit cependant s'accroître notablement vers le bas. Il semble nécessaire d'imaginer que la source en est un volume gazeux discret et mobile, et l'on arrive ainsi à la conception d'une haute atmosphère, — en période d'orage auroral, — discontinue, cyclonique et tourbillonnaire. Cette turbulence de l'ionosphère serait de nature électromagnétique, mais il paraît difficile de préciser davantage actuellement cette conception nouvelle.

Enfin, il faut remarquer que la concentration ionique d'un faisceau cathodique s'accompagne toujours de contractions et de dilatations périodiques : le faisceau ressemble à une corde vibrante (Buchta) dont la longueur d'onde dépend de l'intensité. Cette périodicité pourrait, dans une certaine mesure, être l'origine des rayons constituant la draperie.

Si le rayon est bien effectivement un enroulement magnéto-cathodique, son diamètre, qui est de l'ordre du kilomètre, dans un champ magnétique voisin de 0,6 Gauss, correspond à une énergie électronique de l'ordre de  $10^7$  eV. Cette énergie est considérablement plus grande que celle que l'on peut calculer, en supposant une trajectoire rectiligne aux électrons auroraux, par des considérations d'absorption : Si la pression à l'altitude du bord inférieur net des aurores est de l'ordre de la barye, l'épaisseur d'air traversée, ramenée à la

pression normale, est seulement de  $8.10^5 \times 10^{-5}$ , soit 8 mm, et des électrons totalement arrêtés par cet écran n'ont qu'une énergie de  $10^4$  eV. Une pareille trajectoire <sup>(1)</sup> est cependant peu plausible et nous adopterons plutôt la valeur calculée plus haut :  $10^7$  eV qui est de l'ordre de grandeur de l'énergie des électrons secondaires ( $10^6$  eV) excités par des électrons cosmiques d'énergie égale à  $10^9$  ou  $10^{10}$  eV.

Le rayon correspond bien à un courant d'électrons dirigé de haut en bas. Plusieurs observations indépendantes ont montré que lorsqu'une grande draperie traversait le Zénith, en passant du Sud au Nord, la déclinaison, qui était occidentale avant le passage, devenait orientale sitôt après. Le champ perturbateur est ici le champ magnétique d'une nappe de courants élémentaires quasi-verticaux.

En dehors de cette turbulence, les draperies sont sujettes à de lents mouvements d'ensemble de beaucoup plus grande amplitude qui, à une autre échelle, imitent les mouvements rapides d'ondulation et de giration déjà décrits. De tels mouvements sont visibles sur les figures 4, 11 et 13. Ce dernier cliché montre que plusieurs draperies parallèles accusent simultanément le même accident, ici une courbure de concavité tournée vers le Nord. Trois draperies parallèles de ce genre sont interprétés, selon la théorie, par la traversée de l'ionosphère par trois boucles concentriques d'électrons primaires monocinétiques. *Ces draperies représentent trois « raies » distinctes du spectre magnétique terrestre des électrons solaires.* Ces électrons gravitent à une altitude où les accidents terrestres du champ magnétique s'évanouissent et où le pôle auroral, centre de courbure des arcs, coïncide, non avec le pôle de déclinaison, mais avec le pôle de Gauss, comme le montre l'observation. Les spires primaires ne souffrent donc pas les perturbations montrées, au voisinage de la Terre, par les rayons et les draperies.

Ces accidents de grande amplitude dénotent une perturbation magnétique profonde régnant sur une région étendue du Globe. Une draperie finissant par un enroulement en spirale de rayon de courbure rapidement décroissant, semble représenter la fin d'une éruption solaire en traduisant l'abaissement progressif de l'énergie du jet coronal élémentaire correspondant.

#### 4. Structure et Turbulence de l'ionosphère. —

Les aurores intenses montrent souvent l'existence de très longs rayons dont la luminosité semble peu varier sur un parcours de plusieurs centaines de kilomètres. D'après la loi de Laplace, cette luminosité devrait, au contraire, varier exponentiellement. Il en résulte que la pression dans l'ionosphère ne doit décroître que fort lentement. De plus, la couleur de ces rayons est souvent invariable et leur spectre ne décèle rien d'autre que les bandes de l'azote et les raies de l'oxygène. L'ionosphère n'a donc nullement la nature que lui attribue la théorie classique : une superposition de

couches gazeuses tranquilles de densité décroissante. A l'altitude du bord inférieur net des aurores, soit 100 kilomètres, l'atmosphère ne devrait déjà plus être constituée que d'hydrogène.

L'existence d'une ionosphère s'étendant à une grande altitude (Störmer a photographié, durant des aurores intenses, des rayons apparaissant dès 2400 Km), formée de gaz lourds, azote et oxygène, et dans laquelle la pression décroît lentement, est une condition peu favorable pour l'astronautique. Les calculs de R. Esnault-Pelterie <sup>(1)</sup> ont montré qu'une atmosphère d'hydrogène pourrait, à la rigueur, être traversée sans dommage par un aéronef doué d'une faible accélération mais celui-ci sera inévitablement grillé, à la manière d'une étoile filante, s'il doit traverser une atmosphère étendue constituée de gaz lourds.

Les nuages phosphorescents post-auroraux décèlent parfois, par leurs mouvements, l'existence de vents, d'une très grande rapidité dans l'ionosphère. Déjà les nuages phosphorescents (Ceralski, 1885), dont l'altitude est de 80 Km, montrent des vitesses d'entraînement de 300 m/s. Les traînées phosphorescentes de longue durée (un quart d'heure) laissées par certaines étoiles filantes entre 150 et 180 Km d'altitude, et dont la nature semble être identique à celle des rayons auroraux (excitation électronique), accusent des vitesses plus considérables encore.

Les nuages post-auroraux montrent l'existence de vents animés de vitesses de dizaines de kilomètres par seconde, à la suite d'aurores intenses. Le gaz de l'ionosphère étant toujours illuminé et fortement ionisé par le rayonnement ultra-violet solaire, il est probable que ces vents sont d'origine électro-magnétique.

Rappelons que sous ces pressions, inférieures à la barye, le gaz est ultra-raréfié, que la vie des ions formés est de l'ordre de l'heure et que la vitesse d'agitation moléculaire thermique est voisine du kilomètre par seconde.

Non seulement les nuages phosphorescents post-auroraux décèlent l'existence dans l'ionosphère d'une turbulence parfois considérable, mais encore les rayons des draperies montrent souvent l'existence de couches ionosphériques de densités différentes se traduisant par des variations de luminosité le long de leur parcours.

Deux beaux exemples de ce phénomène sont montrés par les clichés 4 bis et 11. Le premier montre la présence d'une frange lumineuse à la base d'une draperie, sur une hauteur voisine de 30 Km. Cette frange décèle l'existence d'une couche ionosphérique de densité élevée dont le bord supérieur atteint 130 Km. On pense immédiatement à rapprocher ce phénomène de celui des arcs crépusculaires. Esclançon <sup>(2)</sup> a souvent observé à l'Ouest ( $H = 45^\circ$ ), trois arcs successifs, rose, jaunâtre et bleu-verdâtre, correspondant à des altitudes respectivement égales à 16, 45 et 130 Km.

<sup>(1)</sup> Qui a conduit Vegard à la conception qu'elle était celle de rayons  $\alpha$ .

<sup>(1)</sup> *L'astronautique*, Paris 1930.

<sup>(2)</sup> *C. R.* août 1908, p. 27.

Cette dernière valeur est en accord avec celle trouvée pour l'arc crépusculaire principal (126 Km) par A. Wegener (*l. c.*) à Danmarks Havn. Ce savant observa en outre vers minuit, au solstice d'hiver, pendant la nuit polaire, un arc crépusculaire argenté, distinct de la lumière zodiacale, de faible hauteur, au-dessus de l'horizon Nord (dépression solaire  $36^{\circ}18'$ ) et correspondant à une altitude de 700 kilomètres. Par suite de l'emplacement défavorable de la station du Scoresby Sund, qui avait été choisi en 1931 par la mission Charcot, nous ne pûmes malheureusement observer ces intéressants phénomènes, les horizons Nord et Est étant bouchés jusqu'à une hauteur de dix degrés. Ces conditions se révélèrent aussi fort gênantes pour l'observation des aurores éloignées et celle du ciel en général.

**5. Brillance de l'aurore polaire.** — L'aurore, avec les intensités 1, 2, 3, qu'elle présente généralement n'apparaît pas colorée, car sa brillance est au-dessous du seuil de la perception de la couleur verte de la raie 5577.

On sait que la brillance du ciel nocturne est voisine de  $10^{-8}$  bougie/cm<sup>2</sup>. Un arc d'intensité 3 présente à peu près la brillance d'un nuage éclairé par la pleine lune. Le même nuage éclairé par le soleil aurait une brillance de quelques bougies/cm<sup>2</sup>. Comme les diamètres apparents de la lune et du soleil sont les mêmes et que la lune a un éclat dix fois moindre que celui du nuage ensoleillé, on en déduit, la brillance moyenne du soleil étant de  $1,5 \cdot 10^8$  b/cm<sup>2</sup>, que celle de l'aurore ( $I = 3$ ) est de quelques micro-bougies par centimètre carré.

La lumière aurorale n'agit sur l'œil que par la raie 5577 Å qui est intense et qui coïncide avec le maximum de sensibilité de la rétine. C'est à dire que l'éclairage produit par une aurore est tout à fait monochromatique. Ce n'est que pour de très fortes aurores que les raies 4709, 4652, 4277, 3914 se perçoivent faiblement au spectroscope de poche.

L'intense raie 5577 se diffuse sur les nuages, sur la neige (je l'ai maintes fois observée sur le cahier d'observations !) et c'est cette diffusion qui a si souvent trompé des observateurs peu avertis en leur faisant croire à la présence d'aurores au sol.

C'est seulement avec les aurores d'intensité 4 que les couleurs apparaissent fugitivement : le vert, dû à la raie 5577, le violet, aux bandes de l'azote et le rouge, à la raie de l'oxygène 6320 Å. L'éclairage dû à l'aurore est alors très sensible et la neige apparaît rosée.

Nous n'avons pas observé, au Scoresby Sund, les aurores uniformes colorées en rouge décrites par plusieurs auteurs.

**6. Variation diurne de l'aurore polaire.** — L'observation continue des aurores montre immédiatement une variation diurne accentuée. Celle-ci est précisée par la statistique horaire portant sur les 157 aurores les plus intenses et les plus caractéristiques (voir

fig. 14). Cette courbe montre l'existence de deux maxima : un maxima principal à 21 heures (temps local) et un maximum secondaire à 4 h. 1/2.

Cette variation diurne est due à un grand mouvement d'ensemble, à un déplacement géographique quotidien de la zone aurorale. Une série de très fortes aurores, observées fin février 1933, ont montré ce phénomène avec la plus grande netteté. Les lueurs apparaissaient dans la soirée à l'horizon Sud, au-dessus de l'Islande. Les draperies s'élevaient ensuite peu à peu par vagues successives, jusqu'au Zénith à l'heure du maximum, puis s'éloignaient vers le Nord où elles disparaissaient. Au matin, ces vagues revenant du Nord sont responsables du maximum secondaire lorsqu'elles repassent au Zénith.

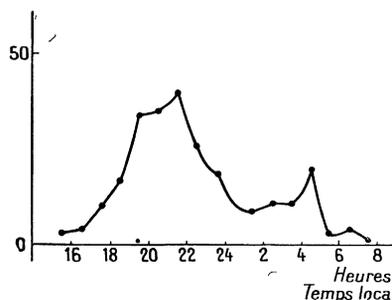


Fig. 14.

Ces flux et reflux ne sauraient être mieux comparés qu'à une marée montante ou descendante dont les vagues déferlent successivement sur le rivage. Le phénomène est dû à la rotation de la Terre dont l'axe magnétique tourne en 24 heures en présentant des incidences variables par rapport au plan de l'équateur solaire.

Le pôle auroral ne se confond avec l'axe de Gauss que d'une manière statistique. Il décrit, en réalité, une courbe fermée autour de cet axe en ayant toujours tendance à suivre le soleil. Ce déplacement géographique peut se retrouver dans la plupart des stations arctiques et antarctiques et semble général. La variation diurne suit l'heure locale et elle se confond avec la variation diurne de l'agitation magnétique.

Comparativement à ces observations, il est intéressant de noter que pendant l'expédition du *Maud*, sur la côte Nord de la Sibérie, de 1918 à 1925, tandis que le navire était sensiblement à  $180^{\circ}$  du Scoresby Sund ( $74^{\circ}\text{N}$ ,  $172^{\circ}\text{E. Gr.}$ ), au Sud de la zone aurorale, les arcs apparaissaient le soir au Nord et s'élevaient vers le Sud au cours de la nuit. Le maximum auroral avait lieu vers minuit. C'est précisément l'époque (le milieu du jour) du minimum d'activité magnétique au Scoresby Sund.

D'autres causes peuvent contribuer à produire la variation diurne : Si l'ionosphère est « soufflée » par la pression de la radiation solaire, les orbites enroulées autour du globe traversent cette sorte de « queue cométaire » terrestre, au maximum, vers minuit (heure

locale), tandis que les jets coronaux s'approchant du globe vers son côté « soir » ont tendance à produire un maximum d'activité vers 18 heures.

**7. Variation de l'activité aurorale.** — La statistique permet de définir une activité aurorale, analogue à l'activité magnétique. Il suffit pour cela d'attribuer à chacune des deux périodes de douze heures de chaque jour (matin et soir) des coefficients d'activité analogues à ceux ayant servi à estimer l'intensité des phénomènes lumineux élémentaires observés.

Cette attribution, qui doit tenir compte, à la fois, de la fréquence et de l'intensité des lueurs apparaissant durant chaque période, est nécessairement moins précise que dans le cas de la lecture de magnétogrammes et elle possède un caractère empirique marqué. Néanmoins, elle s'est révélée tout aussi satisfaisante que la qualification de l'activité solaire au moyen des nombres de Wolf et elle est justifiée par son excellent accord avec les données magnétiques.

La courbe de la variation de l'activité durant l'année polaire aurorale est donnée sur la figure 13, com-

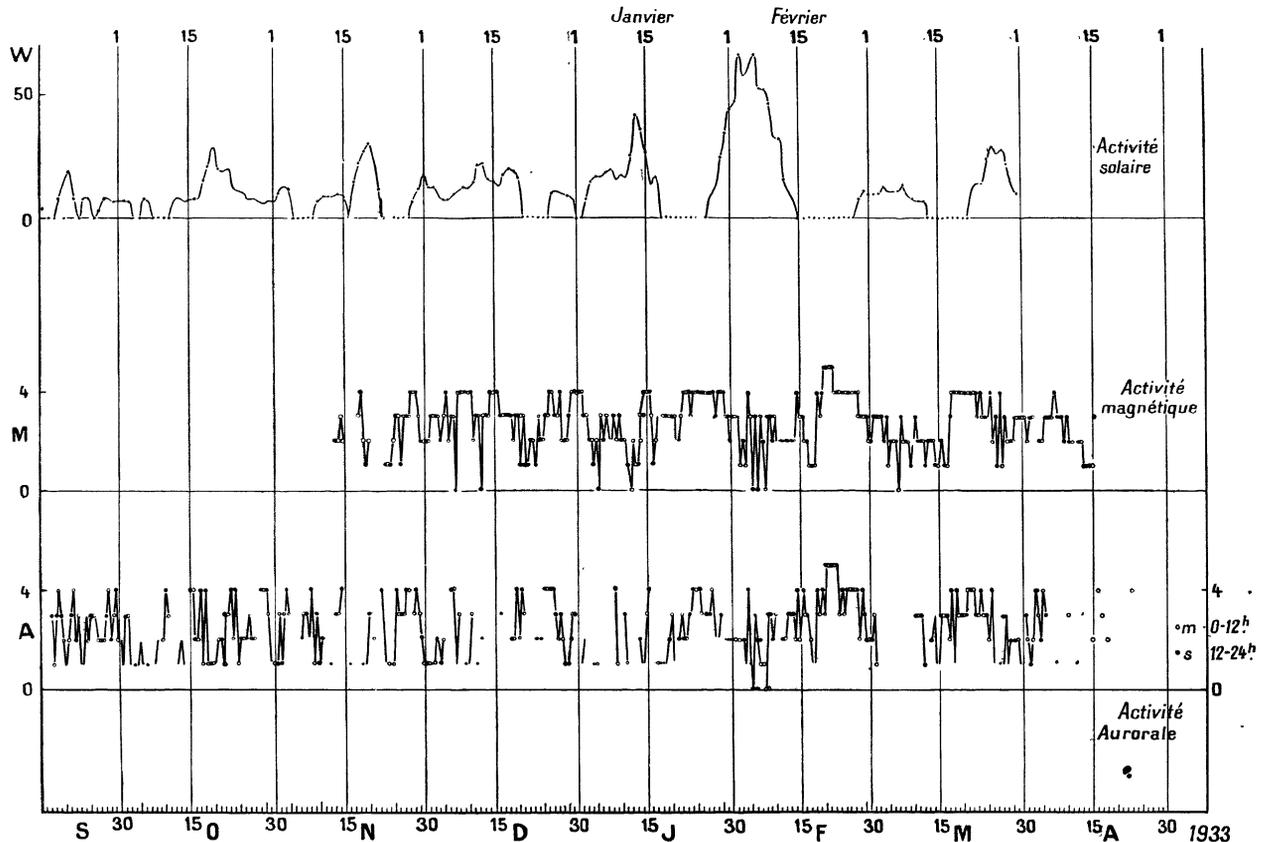


Fig. 13.

parativement avec les activités solaire et magnétique au Scoresby Sund durant la même période. Les parties manquantes de la courbe correspondent aux périodes pendant lesquelles les observations étaient rendues impossibles par les conditions météorologiques défavorables (tourmentes de neige).

On voit tout d'abord que, ainsi qu'il a été dit plus haut, l'aurore est un phénomène permanent, l'activité ne s'étant annulée que deux fois au début de février. Ces deux périodes de « calme auroral » ont coïncidé, comme on le voit, avec des périodes de calme magnétique complet, la variation diurne des éléments magnétiques étant alors elle-même insensible. On voit aussi, qu'étant donné leur caractère, les courbes d'ac-

tivité aurorale et magnétique concordent d'une manière remarquable, ayant été établies, bien entendu, tout à fait indépendamment l'une de l'autre. Ceci prouve, une fois de plus, la relation étroite existant, dans les régions polaires, entre les perturbations aurorales et magnétiques et leur origine commune.

Depuis la mi-septembre 1932 jusqu'à la mi-janvier 1933, les courbes accusent une variation désordonnée qui est à rapprocher de celle de l'activité solaire durant la même période. Mais, à partir de cette époque et jusqu'au début d'avril, elles prennent une allure beaucoup plus intéressante. Elles présentent alors une allure périodique et synchrone montrant la période de rotation solaire de 27 jours. La courbe de l'activité

solaire prend d'ailleurs, à ce moment, un aspect remarquable et inaccoutumé en période de minimum solaire, à savoir une succession de paliers de valeur nulle et de maxima, dont la plus haute valeur pendant la première quinzaine de février atteignit un nombre de Wolf égal à 67. Ce phénomène traduit l'apparition sur le disque solaire d'un foyer unique et intense d'activité, correspondant à une tache (<sup>1</sup>) qui fut visible à l'œil nu et qui persista durant trois rotations en présentant son maximum de développement au début de février.

Or, si l'on compare les courbes magnétique et aurorale avec la courbe de l'activité solaire, on constate que, bien qu'elles soient synchrones, *elles sont en opposition de phase*. Les deux uniques périodes d'activité aurorale nulle coïncident avec le maximum d'activité solaire et les maxima auroraux et magnétiques du 20 au 25 février coïncident avec une période d'activité solaire nulle.

Or, ces maxima doivent évidemment être rapportés au maximum solaire du début de février, car ils représentent les perturbations les plus intenses observées durant toute l'année. Pendant plusieurs soirées consécutives, des aurores d'une intensité exceptionnelle ( $I = 5$ ) se répétèrent régulièrement, tandis que les spots des variomètres s'échappaient des enregistreurs!

Des décalages dans le temps de quelques dizaines d'heures entre le passage d'un foyer d'activité solaire par le méridien central de l'astre et l'apparition des perturbations magnétiques et aurorales associées, ont souvent été signalés, le retard statistique variant en général, de trente à cinquante heures, mais c'est la première fois qu'un décalage atteignant une demi-période de rotation solaire, apparaît aussi clairement.

Ce résultat est de la plus haute importance : non seulement il ruine les théories attribuant les phénomènes auroraux et magnétiques à l'émission par le soleil d'ondes hertziennes (<sup>2</sup>) ou de rayons ultraviolets (<sup>3</sup>) ou à la durée variable de propagation de corpuscules électrisés lents (<sup>4</sup>), mais il prouve que ce sont bien les jets cororaux déliés équatoriaux d'électrons rapides qui sont la seule cause de ces phénomènes.

Selon l'hypothèse de Deslandres-Birkeland (<sup>5</sup>), ces jets électroniques sont d'autant plus déviés par le champ magnétique solaire externe qu'ils possèdent une plus faible énergie. En période de minimum d'activité solaire, cette énergie est donc assez réduite pour qu'ils soient recourbés en arrière de leur direction d'émission, à la manière d'une large queue cométaire.

La figure 16 schématise les trois types de jets coro-

raux correspondant aux périodes extrêmes de maxima et minima solaires et à la période intermédiaire. Le premier type (1), de maximum solaire, rend compte des simultanités qui ont été observées entre le passage par le méridien central d'un foyer d'activité et la production du phénomène électro-magnétique terrestre associé. (« Loi » de Marchand). Les électrons émis ont une énergie telle qu'ils ne sont pas sensiblement déviés par le champ magnétique de Deslandres et qu'ils se propagent pratiquement en ligne droite avec la vitesse de la lumière. Le type intermédiaire (2) correspond au retard statistique moyen de 30-50 heures, le plus fréquent. Enfin, le troisième type (3), que nous avons observé, correspond, en période de minimum solaire, à une émission électronique d'assez faible énergie pour présenter un rayon de courbure de l'ordre de celui du soleil.

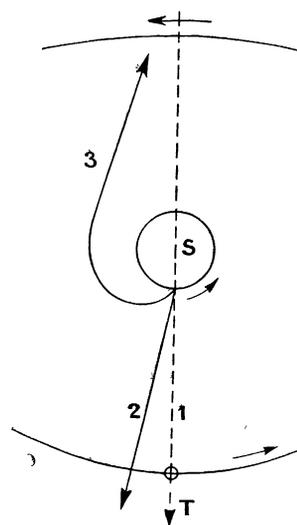


Fig. 16.

Ce phénomène remarquable, observable, grâce à la simplification apportée dans l'état de la photosphère par le cycle undécennal finissant, jointe à la chance exceptionnelle d'apparition d'un foyer unique et intense d'activité, est à rapprocher du cas signalé lors de l'éclipse de 1901 (minimum solaire) par Perrine. Cet astronome ne distingua qu'un seul jet coronal associé à une unique tache solaire.

De plus, et en accord avec le phénomène, l'observation des éclipses a montré que les jets coronaires les plus intenses n'étaient pas radiaux et qu'ils prenaient naissance, non sur les bords du disque solaire, mais en avant ou en arrière de celui-ci.

Si l'on admet que le champ magnétique externe de Deslandres demeure constant durant le cycle solaire, on peut calculer l'ordre de grandeur de l'énergie minima des électrons solaires. Le champ estimé par Deslandres, par la mesure du rayon de courbure des protubérances, était de l'ordre de  $10^{-7}$  Gauss. Le rayon solaire étant de  $7.10^{10}$  cm, le rayon de courbures d'élec-

(<sup>1</sup>) Latitude héliographique : + 10°, longitude 315°, rotation n° 1 061.

(<sup>2</sup>) CH. NORDMANN, *J. Phys.*, 1904, p. 97 et 281.

(<sup>3</sup>) MARIS et HULBERT, *Phys. Rev.* 1929, t. 33, p. 412 et 1 046 ; 1929, t. 34 p. 344 ; 1930, t. 35 p. 1 098 ; 1930, t. 36, p. 1560.

(<sup>4</sup>) VEGARD, *Phil. Mag.*, 1912 p 211 ; CHAPMAN et FERRARO, *Nature*, 26/7/30.

(<sup>5</sup>) H. DESLANDRES, *C. R.*, 1911, t. 152, p. 1433.

trons susceptibles de quitter sa surface doit être au moins dix fois plus grand. Le produit caractéristique de l'intensité moyenne du champ par le rayon de courbure  $H\rho$  serait donc au moins de l'ordre de  $10^5$  et les électrons auraient une énergie de  $2.10^7$  eV.

Il est difficile de préciser comment varie l'énergie des électrons solaires en fonction de la latitude héliographique, de la température de la plage faculaire émissive et du cycle solaire. Le rayon de courbure des jets coronaux polaires et équatoriaux sont bien différents, mais on ne sait comment varie le champ de Deslandres en fonction de la latitude et de la distance radiale.

Au niveau de la Terre, le rayon statistique de la zone aurorale, indique, pour un enroulement s'effectuant à une altitude de un rayon terrestre, une énergie moyenne de l'ordre de  $10^{10}$  eV qui est aussi de l'ordre de grandeur du quantum des rayons cosmiques. De tels électrons prennent dans un champ de  $10^{-7}$  gauss un rayon de courbure  $10^4$  fois plus grand que celui du soleil. Ils ne sont donc que très peu déviés. Le champ solaire moyen serait donc plus grand que la valeur observée par Deslandres.

Ce phénomène confirme donc, d'une manière inattendue, la théorie attribuant aux jets coronaux les aurores et les perturbations magnétiques terrestres. Cependant, on sait que Shuster, puis Lindemann, ont démontré l'impossibilité, pour un jet de particules électrisées de même signe, de se propager du Soleil jusqu'à la Terre sans se dissocier par répulsion électrostatique.

La démonstration est, en effet, correcte si l'on imagine un rayon cathodique se propageant dans le vide. Mais les jets coronaux ont une densité extrêmement faible (3 électrons par litre au niveau de la Terre) et ils se propagent, non dans le vide, mais dans un milieu très raréfié d'atomes ionisés par les rayons ultraviolets solaires, c'est-à-dire d'ions positifs.

Les étoiles perdent, en effet, peu à peu une partie de leur substance sous forme de protubérances; les planètes, leur atmosphère; les météorites, leurs gaz occlus, etc. L'observation montre la présence, dans l'espace cosmique, de nuages d'hydrogène et de calcium. Les queues cométaires y décèlent des gaz hydrocarbonés, etc. Or, par suite de la très grande différence de mobilité entre les ions positifs et les électrons, il suffit d'un très petit nombre des premiers — qui peuvent être considérés comme au repos — pour neutraliser la charge spatiale d'un faisceau cathodique de faible densité. Ce sont là des conditions que l'on retrouve dans la théorie du tube de Crookes et de l'arc à vapeur métallique à très basse pression.

La propagation de jets déliés, chargés électriquement du Soleil jusqu'à la Terre, nous paraît, d'ailleurs, être un fait d'observation. L'aurore exceptionnelle du 21 février 1933 s'est répétée trois jours consécutifs. La largeur du faisceau ayant rencontré la Terre était donc de :  $3 \times 24 \times 3600 \times 400 = 10^8$  km. Si la région faculaire active avait un diamètre seulement dix fois plus grand que celui du Globe ( $10^3$  km), le faisceau

s'était élargi mille fois durant son trajet. Cet élargissement ne semble pas dû à une dispersion spectrale dans le champ de Deslandres par suite de la forme symétrique de la courbe d'activité aurorale.

Mais une preuve directe de la propagation de faisceaux déliés cosmiques peut être tirée de l'observation des queues cométaires rectilignes et des éclipses. Des filaments coronaux ont été suivis par Bergstrand jusqu'à une distance du Soleil atteignant dix fois son rayon. Voilà donc des faisceaux cathodiques encore nets après un trajet de  $7.10^6$  km. Or la Terre n'est que vingt fois plus loin et il est certain que les jets auront encore conservé leur individualité lorsqu'ils en atteindront l'orbite.

**8. Variation annuelle de l'Aurore.** — Si l'on fait la somme, durant chaque quinzaine, des activités bi-quotidiennes, on obtient la variation bi-mensuelle représentée par les deux courbes II de la figure 17. La

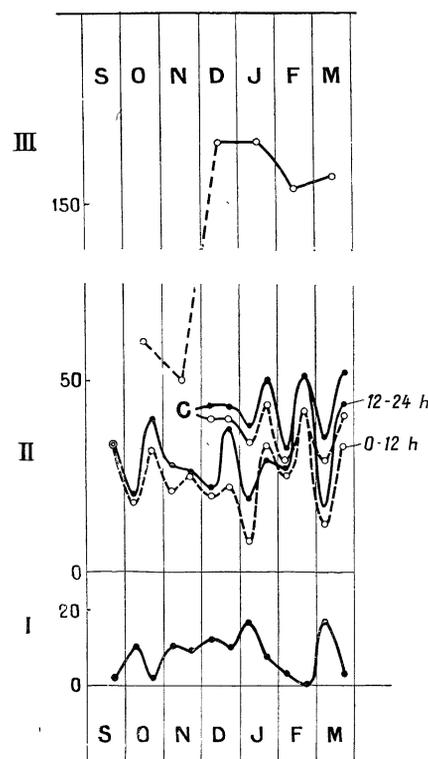


Fig. 17.

courbe en trait plein représente l'activité du soir (12-24 h. Gr.) et celle en pointillé l'activité matinale (0-12, h. Gr.) La variation diurne se retrouve durant les six mois d'observations. Ces deux courbes, bien qu'ayant la même allure, sont déformées par les conditions de visibilité variables. Si l'on trace la variation du nombre de périodes de 12 heures pendant lesquelles les observations n'ont pas été possibles, on obtient, en effet, une courbe (courbe I) inverse des précédentes.

Pour compléter les courbes aurorales nous avons fait usage des coefficients d'activité, relevés d'après les courbes magnétiques, pour les périodes aurorales manquantes, à partir de décembre 1932, date du début des enregistrements magnétiques. Cette correction est permise d'après le parallélisme présenté par les courbes de la figure 15. Elle donne les courbes C II, qui montrent, outre une variation diurne constante et régulière, une périodicité marquée, débutant en janvier et traduisant l'influence de la rotation solaire.

Si, enfin, l'on fait le total des activités bi-mensuelles des deux périodes quotidiennes, on obtient la courbe III, dont la partie en trait plein, seule corrigée, montre un faible maximum en hiver. Mais, cette courbe devant elle-même être corrigée de la variation de longueur des nuits (figure 1), on peut dire que l'activité aurorale mensuelle est demeurée sensiblement constante.

Ce résultat, qui dépend surtout de l'histoire de l'activité solaire durant ce temps, ne précise pas la véritable variation annuelle au Scoresby Sund, qui ne saurait s'obtenir que par l'examen statistique de plusieurs années d'observation.

**9. Spectrographie.** — Deux spectrographes m'ont servi à étudier le spectre de l'aurore. Un spectrographe en quartz, mis à ma disposition par M. Fabry, construit par M. D. Chalonge, pour son étude de l'extrême ultra-violet solaire et un spectrographe à prismes de verre construit par M. Cojean.

Le premier comporte deux prismes de 60° et deux lentilles ouvertes à  $f/12$  ayant 30 cm de distance focale. Devant le collimateur est disposée une lunette formée d'un objectif en quartz et d'une lentille achromatique en quartz fluorine qui projette une image réelle sur la lentille du collimateur et une image de l'objectif sur la fente.

Les spectrographes étaient disposés à poste fixe dans l'étage intermédiaire de la tour d'observation et étaient braqués vers l'ouest à 30° au dessus de l'horizon. Ils étaient ouverts le soir à la fin du crépuscule et fermés le matin avant l'aube. Malheureusement, cette consigne fut parfois oubliée et deux clichés seulement, posés chacun une quinzaine de nuits, furent utilisables. Le spectrographe à optique de quartz fut utilisé avec une fente large (1 mm) et des plaques Lumière (Lumichrome). Le spectrographe à optique de verre était réservé à l'étude de la région infrarouge (jusqu'à 8 000 Å) au moyen de plaques Crypta. Malheureusement, ces plaques ne se conservèrent pas et aucun spectre ne fut obtenu avec cet appareil.

Le meilleur cliché a montré l'existence de 17 raies, comprises entre 5577 et 3139 Å, toutes déjà mesurées par Vegard (1). Les rapports d'intensité sont également les mêmes.

Si l'on remarque que les courbes de sensibilité de l'œil et de la plaque ont respectivement leurs maxima

pour la raie verte et les raies violettes, le fait que les spectres de l'aurore vus dans le spectroscopie et sur la plaque montrent des rapports d'intensités inversés, indiquent que les raies 5577 et 3914 Å sont les plus fortes et sont d'intensité comparable (1). Pour la photographie des aurores, il convient donc d'utiliser des plaques surtout sensibles au bleu et au violet. Les clichés illustrant ce mémoire ont été obtenus avec des durées de pose d'environ une seconde, sur des plaques Lumichrome (les plaques Fulgur n'étaient pas encore connues) avec les appareils étudiés par Mr. C. Störmer. Ces appareils comportent un objectif Astro ouvert à  $f/1,25$ . J'ai également utilisé un objectif Lacour-Berthiot en quartz-uviolet, ouvert à  $f/1,55$ , aimablement prêté par le Dr Comandon, avec des résultats équivalents.

Quelques essais de photographie en couleur ont été effectués par le procédé Finlay au moyen d'un matériel mis à ma disposition par la Société « L'Illustration ». Mais les plaques panchromatiques se sont révélées tout à fait insensibles à la lumière aurorale, comme on pouvait un peu s'y attendre. Il faudrait réaliser des émulsions de Lippmann 10<sup>4</sup> fois plus sensibles.

**10. Enregistrement photoélectrique des Aurores polaires.** — L'estimation subjective de l'intensité des phénomènes auroraux au moyen des coefficients internationaux, est, bien que fort utile, naturellement imprécise et empirique, et il était désirable d'enregistrer les aurores polaires afin d'en avoir une représentation quantitative semblable à celle que nous avons des éléments du magnétisme terrestre.

Ce problème est assez difficile à résoudre, du point de vue technique, du fait de l'extrême faiblesse de l'intensité lumineuse des aurores. On sait que l'éclairement produit par le ciel nocturne — dont la brillance, sous nos latitudes, est de l'ordre de  $10^{-8}$  bougie/cm<sup>2</sup> — est voisin de  $1/3 \cdot 10^{-3}$  lux (2), ce qui donne un flux de  $1/3 \cdot 10^{-7}$  lumen/cm<sup>2</sup> au sol. Les cellules au potassium, à vide, ont une sensibilité d'environ  $2 \cdot 10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup>/lumen en lumière blanche. Une telle cellule donnerait approximativement, par unité de surface cathodique éclairée, un courant de  $1/3 \cdot 10^{-7} \times 2 \cdot 10^{-6} = 2/3 \cdot 10^{-13}$  Amp/cm<sup>2</sup>.

Une aurore d'intensité 3, dont la brillance est mille fois plus grande, recouvrant la centième partie du ciel, et illuminant une surface cathodique de 10 cm<sup>2</sup> donnera donc un courant de  $2/3 \cdot 10^{-11}$  Amp.

Un aussi faible débit, d'ailleurs intermittent, se prête bien à un enregistrement électrométrique. Nous

(1) Dans leur beau travail sur le spectre du ciel nocturne au Pic du Midi, MM. J. Cabannes et J. Dufay (*C. R.*, t. 198, p. 308, janv. 1934) retrouvent vingt raies des aurores polaires, mais la raie 5577 est, photographiquement, la plus intense. Cette différence ne semble pas dénoter un mécanisme d'émission différent mais peut-être seulement l'influence de la densité du flux électronique secondaire excitateur.

(2) C. FABRY, *Photométrie*, 1927.

(1) NORDLICHT: *Handbuch der Experimental Physik.*, Geophysik.

avons établi un tel appareil, simple et transportable, intégrant l'activité aurorale durant toute une nuit. Il se compose d'un tube métallique étanche, muni d'une

fenêtre en silice, contenant une cellule à grand isolement, en silice, et un électromètre à aiguille de Szilard. Une électrode, portée par un bouchon rodé en silice,

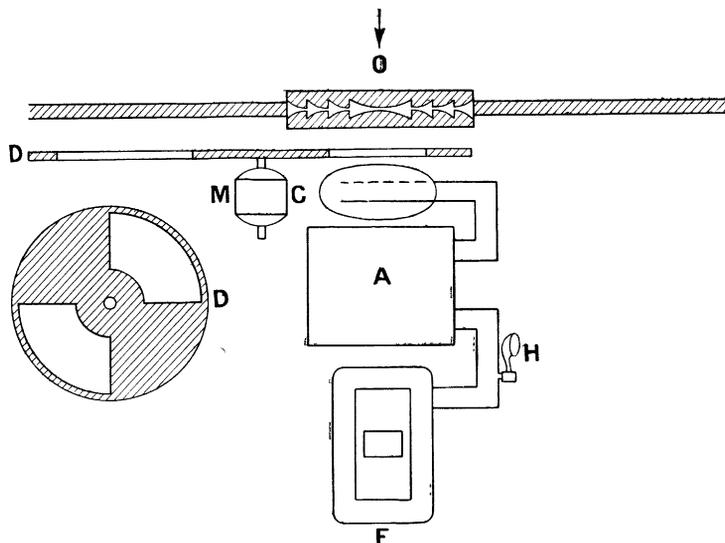


Fig. 18.

permet la charge du système isolé. Le tube est rempli d'hydrogène raréfié, pour assurer un isolement invariable et éviter l'ionisation parasite due aux rayons  $\alpha$  et  $\beta$  aux électrons cosmiques. La cellule, qui avait été

construite par Mr. M. C. Teves et qui nous avait été aimablement prêtée par la Société Philips, était une cellule à vide, à traversées de tungstène dans le pyrex, à cathode de potassium adsorbé sur son oxyde, dont

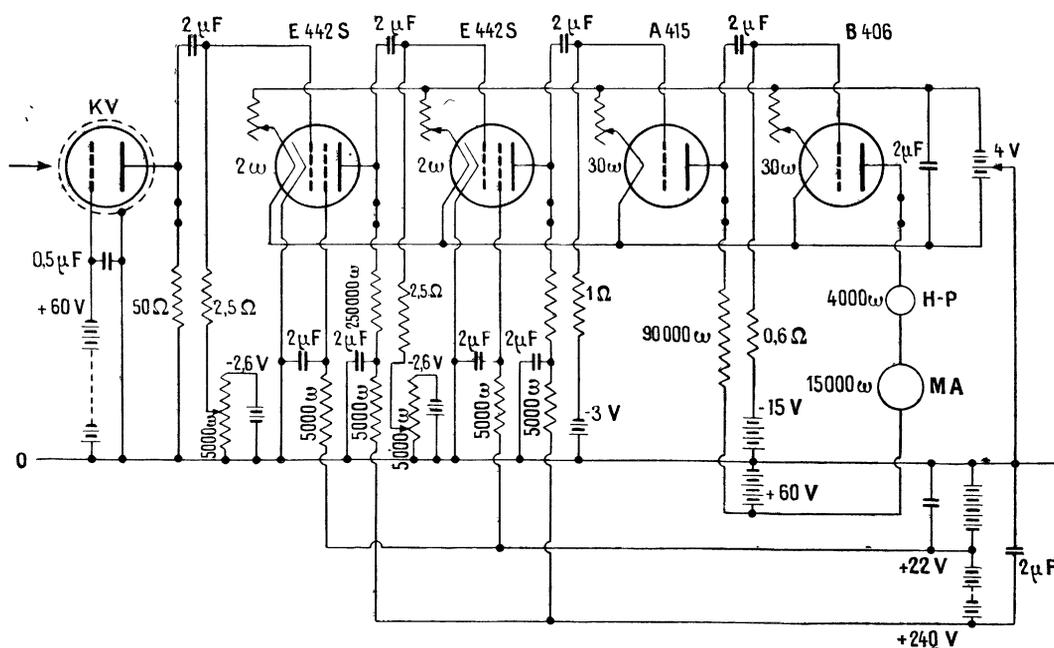


Fig. 19.

la sensibilité était de  $5 \cdot 10^{-6}$  Amp/lumen/cm<sup>2</sup> et le maximum de sensibilité spectrale vers  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ .

Malheureusement, un mauvais contact s'étant déclaré pendant le transport de l'appareil, celui-ci ne put

être utilisé et nous construisimes un véritable enregistreur, bien supérieur à ce totalisateur d'Aurores.

Le courant calculé ci-dessus est encore trop faible pour pouvoir être suffisamment amplifié et mesuré par un appareil enregistreur inscrivant, comme il est désirable. Il est donc nécessaire d'utiliser un système optique captant un aussi grand flux que possible. Nous avons employé un double système de lentilles à échelons, dont le diamètre était de 30 cm et la distance focale de 6 cm. L'ouverture utile, de 90°, nécessitait une surface cathodique de 12 cm de diamètre. La majeure partie de celle-ci fut utilisée par une cellule géante de Pressler, à vide, à hydrure de potassium, de sensibilité  $1,1 \cdot 10^{-6}$  Amp/lumen/cm<sup>2</sup>. Ce condensateur (voir figure 18) était disposé verticale-

ment dans la paroi du laboratoire et orienté vers l'ouest. Une sensibilité beaucoup plus grande et une meilleure utilisation seraient obtenues en le braquant vers le Zénith.

Le choix de l'élément cathodique est déterminé par la répartition de l'énergie dans le spectre de l'aurore. Or, nous avons vu que les raies 5577 et 3914 Å semblaient avoir des énergies équivalentes. La première exigeait une cathode de césium. Celle-ci est bien plus sensible, mais son courant d'obscurité thermique est considérable ( $10^{-10}$  Amp/cm<sup>2</sup> à 20°C) et cette grande sensibilité au spectre continu solaire (lumière parasite crépusculaire et lunaire) est défavorable. La cellule au potassium a son maximum de sensibilité vers 4300 Å dans la région des bandes de l'azote, à l'extré-

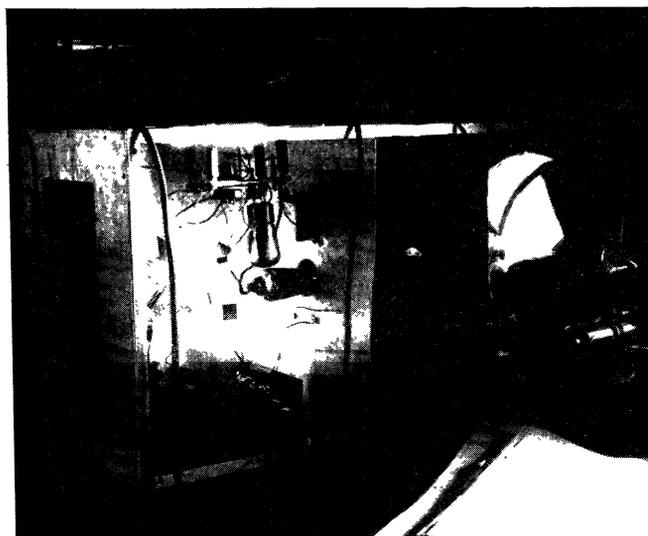


Fig. 20.

mité violette du spectre solaire et paraît donc préférable.

L'amplificateur à courant alternatif (voir figure 19), a été construit avec deux étages blindés de lampes Philips E 442 S, à chauffage indirect, pour augmenter la stabilité, et à grand coefficient d'amplification. Elles étaient suivies d'une A 415 et d'une B 406, dans le circuit anodique de laquelle étaient disposés un haut-parleur avertisseur d'aurores et le milliampèremètre enregistreur. La figure 20 représente l'appareil installé au Scoresby Sund.

Cet amplificateur à résistances et liaisons par capacités, exigeait une modulation à basse fréquence de la lumière aurorale. A cet effet, un disque métallique opaque percé de deux fenêtres (secteurs de 90°) tournait à faible vitesse entre le condensateur et la cellule. Les variations de capacité étaient évitées en garnissant les secteurs et la cellule de gaze métallique reliée au sol. L'amplification mesurée était de  $3 \cdot 10^6$ .

Le milliampèremètre à cadre mobile, construit spé-

cialement par la Société Hartmann et Braun, avait une étendue de mesure de un milliampère avec une résistance intérieure de 15 000 ohms. Le papier enregistreur perforé, à coordonnées rectilignes, était déroulé à la vitesse de 6 cm/h. La plume-siphon était formée d'un tube capillaire en verre. Ce bel appareil nous donna toute satisfaction.

Les difficultés rencontrées pour la construction et la mise au point par les moyens du bord firent que l'enregistreur ne fut prêt que vers la fin de la saison aurorale. Il montra, tout d'abord, que l'intensité des phénomènes lumineux pouvait varier considérablement, dans la proportion de 1 à 1 000. Ainsi les plus fortes aurores ( $I = 4$ ) donnaient des déviations de toute l'échelle tandis que les aurores d'intensité 2 étaient à peine lisibles. Ainsi les caractères internationaux 1, 2, 3, 4, représentent ils sensiblement les logarithmes des intensités, comme l'indiquerait la « loi » de Weber-Fechner.

L'appareil avait la propriété de déceler les aurores invisibles à l'œil nu apparaissant pendant le crépuscule ou par temps couvert et il a ainsi permis de compléter utilement la statistique aurorale.

Quelques enregistrements sont reproduits sur la figure 21. La courbe crépusculaire pure (courbe du 1<sup>er</sup> au 2 avril) ne présente aucun accident. Au contraire, les courbes relevées les 21-22 mars et 25-26

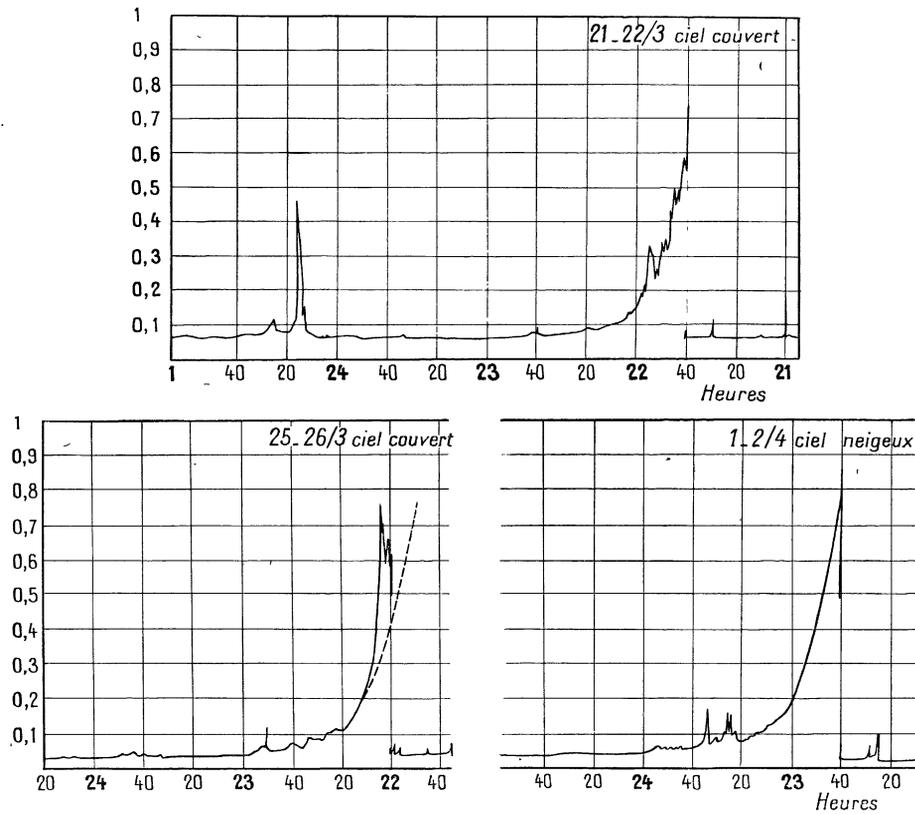


Fig. 21.

mars montrent de fortes indentations correspondant à des aurores d'intensités 3 et 4 respectivement, totalement invisibles, le spectre continu crépusculaire voilant la raie verte dans le spectroscopie. L'enregistreur, qui mesure la lumière totale du ciel, fonctionne même plus fidèlement par temps couvert, lorsque cette lumière est parfaitement diffusée. Par contre, par temps nuageux et par la lune il est inutilisable.

Les courbes confirment le caractère essentiellement discontinu des aurores, rappelant ainsi le caractère éruptif accidentel des phénomènes solaires qui leur ont donné naissance. Elles permettent aussi une comparaison précise avec les perturbations magnétiques et telluriques associées.

Manuscrit reçu le 18 mai 1934.