

SUR LES RÉCENTES THÉORIES DE L'AURORE POLAIRE

RÉSUMÉ ET CRITIQUE DES THÉORIES DE MM. BIRKELAND,
ARRHENIUS ET NORDMANN. IDÉES PERSONNELLES

PAR

ADAM PAULSEN

AVEC UNE PLANCHE

PRÉSENTÉ DANS LA SÉANCE DU 23 MARS 1906

En 1894 et 1895 j'ai publié quelques mémoires¹ dans lesquels j'ai démontré que les rayons auroraux ont les propriétés des rayons cathodiques et où j'ai émis l'hypothèse que l'aurore est produite par une luminescence due à ce que l'atmosphère absorbe des rayons cathodiques qui prennent naissance dans les couches atmosphériques supérieures. Pour expliquer l'origine de ces rayons j'ai admis que, sous l'influence de l'insolation, les molécules d'air électrisées négativement absorbent une certaine énergie des rayons solaires et que la perte de cette énergie, emmagasinée pendant le jour, a lieu pendant la nuit sous forme d'un rayonnement auroral. J'avoue cependant que cette explication n'était encore qu'une hypothèse un peu vague.

Après la publication des mémoires cités ci-dessus, mon séjour en Islande (1899—1900) comme chef de la mission danoise pour l'observation des aurores polaires, m'a offert une nouvelle occasion pour l'étude de ces phénomènes. Ces nouvelles recherches m'ont encore appris combien il est nécessaire, si l'on veut établir une théorie sur l'aurore polaire, de connaître dans leurs détails tous les phénomènes dont on s'est proposé d'étudier la nature et l'origine.

¹ Bulletin de l'Académie R. des Sciences de Danemark 1894 et 1895.

Avant d'exposer mes idées sur ce sujet il me semble que, si l'on veut mieux connaître les difficultés à vaincre pour expliquer les phénomènes dont nous parlons ici, il serait utile de donner d'abord un résumé et une critique des nouvelles théories sur l'aurore polaire, qui ont surgi durant ces dernières années.

Depuis 1896 trois théories sur l'aurore polaire ont été publiées, celles de MM. Birkeland, Arrhenius et Nordmann. Ces théories s'accordent en ce que les rayons auroraux y sont considérés comme une luminescence produite par l'absorption de rayons cathodiques dans l'atmosphère mais, à mon avis, aucune de ces théories ne peut expliquer les phénomènes généraux de l'aurore polaire sans se heurter contre des difficultés qui me semblent insurmontables.

Théories de M. Birkeland.

Première théorie. En 1896 M. Birkeland, après avoir reconnu que les rayons cathodiques sont attirés par un pôle magnétique, émet l'hypothèse que l'aurore polaire est produite par l'absorption dans l'atmosphère des rayons cathodiques émis du soleil et attirés dans l'atmosphère par les pôles magnétiques terrestres¹.

Admettre une hypothèse d'après laquelle l'aurore polaire proviendrait de rayons émanant de l'espace céleste et pénétrant dans notre atmosphère, me semble créer de grandes difficultés pour expliquer l'apparence même de l'aurore, son développement et sa manière de disparaître. En effet, si l'aurore polaire est due à une absorption de rayons cathodiques qui sont émis directement du soleil, ces rayons, à leur entrée dans l'atmosphère, doivent être parallèles et par conséquent, sur de grandes étendues, faire sensiblement le même angle avec les lignes de force du champ magnétique terrestre.

¹ Archives de Sciences physiques et naturelles. 1896.

Dans ces conditions, les phénomènes auroraux qui apparaissent en même temps au dessus du même horizon devraient affecter les mêmes formes et ne différer que par l'intensité. Mais en général les phénomènes auroraux qui apparaissent simultanément dans le ciel affectent des formes différentes. Les formes à structure rayonnée se trouvent dans les mêmes parties du ciel que les lueurs d'une structure nuageuse, et que les masses lumineuses vagues sans forme bien définie.

Les grandes aurores polaires débutent généralement par des rayons, des rubans et d'autres formes à structure rayonnée. Quand une grande aurore s'affaiblit, elle se transforme en masses d'une lueur diffuse souvent en forme de stries ou bien ce sont des grandes aires de lueurs palpitantes, qui naissent subitement et disparaissent ensuite pour réapparaître en d'autres lieux du ciel jusqu'à ce que tout phénomène lumineux s'évanouisse.

Cette marche du développement des aurores ne peut pas être expliquée en supposant que les rayons cathodiques de l'espace céleste viendraient, par l'effet de la rotation de la terre et à mesure que la nuit tombe, rencontrer les lignes de force sous des angles différents, car, si dans la même nuit, une nouvelle grande aurore apparaît, elle débute et disparaît de la même manière que celle qui l'a précédée.

Toute cette évolution éveille l'idée d'un dégagement d'énergie électrique emmagasinée dans les régions supérieures de l'atmosphère et qui se déchargerait peu à peu.

La théorie de M. Birkeland me semble même présenter de sérieuses difficultés pour expliquer l'apparition des rayons auroraux. D'après cette théorie, les pôles magnétiques terrestres attirent les rayons cathodiques de l'espace céleste en les forçant à suivre les lignes de force du champ magnétique. Imaginons donc un rayon auroral isolé restant pendant quelques minutes sensiblement immobile. D'après la théorie en question ce rayon auroral est produit par un flux de rayons cathodi-

ques qui parcourt une certaine ligne de force. Par suite de sa rotation autour du soleil, la terre doit traverser en même temps tout un faisceau de rayons cathodiques venant de l'espace céleste. Pour que le rayon auroral puisse rester au même endroit il faudrait donc que la ligne de force parcourue par le flux des rayons cathodique qui donne naissance au rayon auroral, eût une conductibilité toute à fait particulière pour les rayons cathodiques, rencontrés dans l'espace céleste par la terre pendant ce temps; on devrait supposer en même temps que les lignes de force voisines, et le long desquelles aucun rayon auroral n'apparaît, possèdent la propriété d'empêcher les rayons cathodiques de les parcourir.

La théorie de M. Birkeland mène ainsi à cette conséquence inadmissible que les lignes de force du champ magnétique terrestre auraient l'étrange propriété de présenter des variations très grandes et soudaines dans leur aptitude à laisser passer des rayons cathodiques.

Il est inutile d'insister sur cette conséquence que, si des rayons cathodiques emis par le soleil étaient réellement attirés dans notre atmosphère pour y produire par leur absorption dans l'air des rayons auroraux, le mouvement de la terre autour du soleil causerait un grand mouvement d'ensemble vers l'ouest des phénomènes auroraux. Un tel mouvement n'existe pas.

Seconde théorie de M. Birkeland. Après son retour de son expédition à Bossekop en 1899—1900 pour étudier les phénomènes auroraux, M. Birkeland proposa en 1901 une autre théorie sur l'aurore polaire¹. Comme dans sa première théorie, M. Birkeland admet dans la seconde que l'aurore polaire doit sa naissance à des rayons cathodiques émanant du soleil et pénétrant dans notre atmosphère, seulement ces rayons n'y produiraient pas immédiatement des aurores polaires mais

¹ Kr. Birkeland: Expédition norvégienne de 1899—1900 pour l'étude des aurores boréales.

des courants électriques atmosphériques qui, à leur tour, émettraient des „rayons cathodiques secondaires“. C'est l'absorption de ceux-ci dans l'atmosphère qui produirait les rayons auroraux. Tout autre phénomène auroral, arc, bande, lueur vague ou nuageuse etc., sera dû à des courants électriques, entretenus dans l'air par les rayons cathodiques que le soleil lance dans l'atmosphère. M. Birkeland appuie son hypothèse sur l'expérience suivant¹. Dans un tube à air raréfié un petit électro-aimant sphérique, entouré d'une mince enveloppe en laiton, recouverte d'une couche de cyanure double de baryum et de platine fut exposé à un courant de rayons cathodiques à peu près parallèles. Tant que l'électro-aimant n'est pas en activité, les rayons cathodiques donnent lieu à une phosphorescence régulière de l'hémisphère qui regarde la cathode. Mais aussitôt qu'on actionne l'électro-aimant, les rayons cathodiques sont écartés de la surface de la sphère, sauf en certains endroits des régions polaires. On voit alors aux deux pôles les rayons attirés former un faisceau de lumière à structure rayonnée qu'on peut observer jusqu'à 5^{cm} de la sphère. Ces deux „coins“ lumineux vont frapper la surface de la sphère et s'y manifestent par une étroite bande phosphorescente au voisinage de chaque pôle.

Outre ces „coins“ lumineux on observe quelquefois jusqu'à trois tourbillons qui se manifestent par des anneaux lumineux bien définis voisins de la surface du petit globe. M. Birkeland a de même observé „un phénomène excessivement intéressant“, savoir, que la surface de l'électro-aimant enduite de cyanure de baryum et de platine devient parfois fortement phosphorescente juste au-dessous de l'anneau lumineux situé en-dehors d'elle.

M. Birkeland dit que cette phosphorescence de la surface de la sphère est évidemment due à des rayons cathodiques qui sont probablement émis par les particules gazeuses servant

¹ l. c. p. 39.

de véhicule à l'électricité et appartenant à l'anneau lumineux voisin, situé à l'extérieur de la sphère.

Dans le même rapport sur le résultat de son expédition, M. Birkeland décrit une série de belles expériences qui montrent que l'on peut produire dans un tube à air raréfié et dans un champ magnétique des courants électriques de même apparence que les bandes aurorales. Le champ magnétique, dont les lignes de force étaient perpendiculaires à la direction du courant, produisait de fines aiguilles lumineuses, qui, d'après M. Birkeland, sont des rayons cathodiques dus à l'effet du champ magnétique¹.

Dans les expériences que nous venons de décrire, M. Birkeland croit avoir produit des aurores polaires artificielles et „établi comme excessivement probable que sous l'influence du magnétisme terrestre de pareils courants électriques doivent donner lieu à des phénomènes lumineux tout-à-fait analogues à ceux qu'on constate dans les aurores des régions polaires“². „Il semble résulter“, dit encore M. Birkeland, „par analogie avec les expériences que j'ai décrites, que si le soleil émet des rayons cathodiques, ou d'autres rayons de nature analogue, ceux-ci doivent, sous l'action du magnétisme terrestre, être attirés vers les régions polaires et donner naissance à des tourbillons de courants électriques d'allure définie dans les couches supérieures de l'atmosphère“³.

En résumé, M. Birkeland pense avoir constaté qu'un courant de rayons cathodiques dirigé vers un aimant, aux environs de ses pôles, dans un espace contenant de l'air raréfié, produit un courant électrique aérien qui à son tour, sous l'influence du champ magnétique, émet des rayons cathodiques „secondaires“. Mais il me semble que rien ne prouve que les anneaux lumineux autour de l'électro-aimant soient, comme le suppose M. Birkeland, des courants électriques ni que les „fines aiguilles lumineuses“ qui, sous l'influence des forces

¹ l. c. p. 49. ² l. c. p. 60. ³ l. c. p. 70.

magnétiques, se produisent dans un courant électrique aérien, soient réellement des rayons cathodiques.

Par une étude très approfondie des observations magnétiques, surtout de celles qui ont été faites dans les régions arctiques, M. Birkeland a constaté, dans les hautes régions de l'atmosphère, l'existence des courants électriques, généralement répandus à peu près partout, mais prédominant surtout dans les régions polaires. Les recherches de MM. Schmidt, Schuster, Bezold et Carlhem Gyllensköld conduisent au même résultat. L'existence de tels courants est maintenant généralement admise par les physiciens. Pour être à l'abri de tout malentendu j'ajoute que ce n'est point contre le résultat de ces recherches de M. Birkeland que j'éleve des objections. Ma critique relative aux courants électriques aériens concerne seulement la supposition de M. Birkeland que la luminescence aurorale est produite par des courants aériens.

Examinons maintenant si cette théorie de M. Birkeland permet d'expliquer les phénomènes généraux de l'aurore polaire.

Remarquons d'abord que si les courants sont dus à l'effet de rayons cathodiques qui, émanés du soleil, entrent dans notre atmosphère, il est très singulier que nous n'apercevions aucune luminescence produite par ces rayons qui, d'après l'hypothèse de M. Birkeland, pénètrent dans l'atmosphère jusqu'aux courants qu'ils sont présumés entretenir. Dans sa seconde théorie M. Birkeland ne parle pas d'un tel effet, tandis que, d'après sa première théorie, ces mêmes rayons seraient la cause immédiate de tous les phénomènes auroraux.

M. Birkeland considère la lueur aurorale comme produite par des courants électriques. „Lorsque le courant“, dit M. Birkeland¹, „est d'une grande intensité sans variations ni grosses ni fréquentes, il y a souvent assez peu d'aurores boréales au sens ordinaire, mais autant que j'ai pu observer,

¹ l. c. p. 64.

tout le ciel est toujours couvert d'une lumière plus ou moins faible". Mais comment expliquer, qu'un courant d'une grande intensité n'ait sur l'aiguille aimantée aucun effet sensible? Au Groenland et en Islande j'ai souvent observé de semblables lueurs qui sont de vrais phénomènes auroraux puisque en exposant nos spectrographes à cette lueur pendant une seule nuit nous avons obtenu un spectre auroral contenant 4 lignes; cependant les aiguilles aimantées n'ont montré dans ces circonstances aucune perturbation. Parlant de la relation entre les aurores polaires et les perturbations magnétiques, M. Birkeland dit, que ces dernières „dépendent surtout de la quantité totale des courants électriques qui sont en jeu à chaque instant donné dans les couches supérieures de l'atmosphère“¹. Sur le même sujet M. Birkeland dit encore que quand les aurores coïncident avec des perturbations magnétiques „il y a lieu d'admettre que les courants sont assez fortement concentrés le long de certaines lignes de courants en oscillations de translation“².

Mais un courant „d'une grande intensité“ qui couvre souvent „tout le ciel“ devrait bien produire des perturbations magnétiques au moins aussi fortes qu'un courant qui n'est concentré et resserré que dans un espace relativement petit.

Cette absence de perturbations magnétiques quand apparaît une aurore grande mais tranquille est incompatible avec l'hypothèse de M. Birkeland. Dans les régions polaires, les perturbations magnétiques se produisent toujours avec l'apparition d'un phénomène auroral à rayons. Les rayons auroraux, ainsi que les bandes auxquelles ils aboutissent, sont des phénomènes d'une étendue verticale souvent extrêmement grande, mais ils sont minces et serrés, ce qu'on peut vérifier quand une bande passe au zénith. Pourquoi un courant électrique, qui d'après M. Birkeland constitue une bande aurorale,

¹ l. c. p. 47. ² l. c. p. 62.

affecterait-il cette forme pour produire des perturbations magnétiques, et comment pourrait-on expliquer que, pour troubler le champ magnétique terrestre, des courants électriques doivent affecter dans l'atmosphère une forme serrée tandis qu'un courant qui occupe une grande aire, et s'étend souvent sur presque tout le ciel ne produirait aucune perturbation?

D'autre part, à des latitudes plus basses, l'apparition d'une lumière aurorale faible, sans émission sensible de rayons, et qui ne s'élève que de quelques degrés au-dessus de l'horizon, est toujours accompagnée de perturbations magnétiques.

La théorie de M. Birkeland ne donne aucune réponse à ces questions, dont la solution est capitale pour l'explication de la nature de l'aurore polaire.

Une autre difficulté s'élève contre la supposition de M. Birkeland qui regarde comme une luminescence produite par des courants électriques, surtout cette lumière aurorale tranquille et souvent répandue sur tout le ciel. Si, pendant une nuit où le ciel est couvert de cette lueur, on voit des bandes et d'autres phénomènes, émettant des rayons, ces formes d'aurores se voient toujours au-dessous de ladite lumière. La même chose a lieu, quand vers la fin d'une grande aurore, le ciel est couvert de formes aurorales nuageuses. Si, dans ces circonstances, une nouvelle aurore débute par une émission de rayons, de bandes, d'arcs radiés etc., tous ces phénomènes à rayons se voient toujours au-dessous de la lumière nuageuse. Or, M. Birkeland estime à 100 km la longueur que peuvent atteindre les rayons auroraux, tandis que la hauteur des bandes qui, d'après lui, sont supposées être des courants électriques et qui émettent des rayons, est évaluée à 100 km en moyenne. Lesdites lumières aurorales doivent donc planer à une hauteur de 200 km au moins au-dessus du sol. A Akureyri nous avons constaté pour certaines formes de l'aurore des hauteurs qui certainement ne sont pas inférieures à

4—500 km. Mais à de telles hauteurs et dans des circonstances ordinaires, l'air est trop raréfié pour être conducteur de l'électricité.

Quant à la hauteur à laquelle des apparitions aurorales ont été constatées, M. Vogel, dans son édition de l'Astronomie populaire de Newcomb-Engelmann, fait les remarques suivantes certainement très justes: „Das allgemeine Resultat (des mesures de la hauteur des parties supérieures de l'aurore polaire) ist, dass es sich bis zu einer Höhe von 600 bis zu mehr als über 900 Kilometern erstreckt. Sternschuppen und Meteore scheinen aber anzuzeigen, dass die Grenze der Atmosphäre in etwa 170 Kilometer Höhe liegt. Dehnt sie sich noch mehr aus, so muss sie so dünn sein, dass eine Electricitätsleitung, lange bevor die grösste Nordlichthöhe erreicht ist, unmöglich wird; es ist in der That zweifelhaft, ob sie eine solche Verdünnung nicht schon in der Höhe von nur 70 oder 80 Kilometern erreiche. Wir müssen nach alledem das Nordlicht unter die Erscheinungen und Objecte rechnen, bei denen moderne Beobachtungen mehr Schwierigkeiten aufweisen, als moderne Theorien erklärt haben“¹.

La plupart des savants qui se sont occupés de l'étude des phénomènes auroraux ont considéré „la matière lumineuse“ dont je viens de parler comme des formes d'une aurore mourante ou comme des formes fragmentaires de l'aurore polaire. Les phénomènes qui attirent le plus l'attention, les arcs radiés, les bandes et les tapis occupent cependant un espace beaucoup plus petit que celui qui est occupée par la lumière de structure non rayonnée. Les grands phénomènes auroraux affectent la forme de nappes lumineuses qui, dans les pays polaires, sont suspendues verticalement dans l'air. Figurons-nous qu'on projette une aurore sur une aire perpendiculaire à la direction des rayons; les traces des bandes, des tapis et en général de tous les phénomènes à structure

¹ l. c. p. 347.

rayonnée, se montreraient comme des stries longues et minces, séparées les unes des autres par de grandes distances, tandis que la projection des lumières non rayonnées, qui apparaissent sous forme de vagues lueurs, d'arcs homogènes et d'autres formes d'un caractère nuageux, se présenterait comme une aire continue d'une grandeur surpassant souvent celle des grandes régions continentales.

D'après mes idées sur l'origine de l'aurore polaire, que j'exposerai vers la fin de ce mémoire, les lumières sans structure rayonnée émanent, au sein même de l'aurore, de points qu'il faut chercher à des altitudes énormes et qui peuvent dépasser même celle de la limite ordinaire de l'atmosphère. C'est de là que sont émis les rayons qui, soudés côte à côte, forment les grandes nappes qui sont vues sous formes d'aurores d'une structure rayonnée.

Se basant sur les expériences décrites plus haut et relatives à l'effet d'un aimant sur un courant électrique dans l'air raréfié, M. Birkeland pense qu'il est permis d'en conclure que, sous l'influence du champ magnétique terrestre, un courant électrique aérien émet des rayons cathodiques. En regardant les bandes aurorales comme des courants électriques il en conclut que les rayons auroraux doivent être considérés comme des rayons cathodiques émis par le courant supposé. Mais les conditions dans lesquelles M. Birkeland a réussi à produire des courants électriques dans un tube de Geissler sont trop différentes de celles dans lesquelles se produisent les aurores polaires pour qu'il soit permis d'en conclure que „les aurores artificielles“ sont de la même nature que les aurores qui apparaissent dans l'atmosphère. Dans les expériences de M. Birkeland la différence de potentiel entre les électrodes était environ de 10000 volts¹. Mais on doit regarder comme impossible que le long d'une bande aurorale horizontale et d'une longueur de vingtaines de kilomètres, il y ait des différences

¹ l. c. p. 57.

de potentiel qui s'élèvent à des milliers de volts pour une distance de quelques centimètres.

M. Birkeland a obtenu la forme serrée de la décharge et la production des rayons cathodiques émis par elle, dans un tube à air raréfié, à l'aide d'un aimant disposé de telle sorte que la direction des lignes de force était perpendiculaire à la direction du courant. A mon sens, on n'en doit pas tirer la conclusion que, par l'effet du faible champ magnétique terrestre, une bande aurorale émettrait des rayons cathodiques qui, après avoir subi, dans l'air environnant la bande, une absorption assez grande pour produire une luminescence appréciable, conserverait, sans être diffusés, assez de leur énergie pour qu'on puisse suivre leurs traces jusque sur une longueur de 100 kilomètres. Si le champ magnétique terrestre était capable de forcer les courants électriques de l'atmosphère à prendre l'aspect de nappes minces émettant des rayons cathodiques sous forme de rayons auroraux, pourquoi ne ferait-il pas prendre la même forme à tous les autres phénomènes auroraux qui, d'après M. Birkeland, sont supposés être des courants électriques aériens? A priori il serait plus naturel de supposer que les rayons auroraux soient émis de haut en bas en commençant leur trajectoire dans un vide presque absolu pour la terminer par l'absorption dans des couches d'air plus basses. Telle était aussi l'explication de la marche des rayons auroraux d'après la première théorie de M. Birkeland.

Théorie de M. Arrhenius.

En 1900 M. Arrhenius a publié sous le titre: *Ueber die Ursache der Nordlichter*¹ un mémoire magistral dans lequel il cherche à expliquer un certain nombre de phénomènes célestes en même temps que l'aurore polaire par l'effet de courants de particules électrisées négativement, qui seraient

¹ Drude: *Annalen der Physik* 1901. *Revue générale des Sciences* 1902. *Lehrbuch der kosmischen Physik*.

émis par le soleil. Nous nous bornerons à considérer dans ce mémoire la partie qui concerne la formation des aurores polaires. M. Arrhenius suppose des éruptions solaires dans lesquelles des particules, chargées d'électricité négative, seraient chassées du soleil dans l'univers par la pression de la lumière. La terre, dans sa rotation autour du soleil, recevrait ainsi une „pluie“ continue de telles particules. Les dimensions de ces particules seraient beaucoup plus grandes que celles des ions ou même des molécules de l'air, ces dernières étant trop petites pour subir la pression des rayons solaires. M. Arrhenius estime que leurs diamètres sont compris entre $1,5 \mu$ et $0,1 \mu$. La moitié de la terre qui regarde le soleil sera donc toujours frappée d'un nombre immense de particules électrisées négativement. En tombant dans l'atmosphère ces particules chargeront les couches atmosphériques supérieures d'électricité négative, ce qui produira des rayons cathodiques émanant des molécules d'air qui se trouvent aux limites de l'atmosphère. La plus grande partie de cette décharge aura lieu pendant le jour, sous l'influence des rayons solaires ultraviolets et non loin des points où sont tombées les particules électrisées. C'est donc surtout entre les tropiques que les couches supérieures de l'atmosphère sont le plus chargées d'électricité. Cette charge va en diminuant vers les pôles jusqu'à une certaine distance de ceux-ci. En delà de cette limite les molécules d'air ne sont généralement pas électrisées. Des molécules fortement électrisées peuvent pourtant être transportées par les vents des pays tropicaux à des latitudes plus élevées.

Les charges négatives des couches supérieures de l'atmosphère entraînent des décharges qui donnent naissance à des rayons cathodiques. D'après M. Arrhenius la hauteur qu'occupent au-dessus du sol les molécules d'air électrisées est à peu près de 200 km. A cette hauteur l'air est si raréfié que l'absorption des rayons cathodiques ne peut donner lieu à aucune

luminescence. Dans les pays intertropicaux, les lignes de force du champ magnétique terrestre sont à peu près parallèles à la surface du sol. Les trajectoires verticales des rayons cathodiques étant des cercles entre les tropiques, ces rayons n'y peuvent pas pénétrer dans les couches plus denses de l'atmosphère. En allant vers les pôles magnétiques, les lignes de force se rapprochent de plus en plus de la verticale et les rayons cathodiques suivent la direction des lignes de force pour être finalement absorbés par des couches plus denses de l'atmosphère, en donnant naissance à une luminescence qui apparaît sous la forme de l'aurore polaire. Cette absorption des rayons cathodiques a lieu, d'après M. Arrhenius, à la hauteur de 100 km à peu près au-dessus du sol.

La charge électrique des molécules d'air des couches supérieures de l'atmosphère va, d'après M. Arrhenius, en décroissant des tropiques aux régions polaires; on peut donc regarder comme non électrisées les molécules d'air aux environs des pôles magnétiques. La direction presque verticale des lignes de force du champ magnétique et l'absence d'une charge électrique près des pôles magnétiques donnent naissance autour de chaque pôle à une zone de fréquence maxima des aurores polaires.

Telle est, dans ses traits généraux, la théorie de M. Arrhenius sur l'origine de l'aurore polaire.

Remarquons d'abord que puisque la charge des molécules d'air décroît vers les pôles magnétiques, cette charge doit être la plus petite dans la zone de plus grande fréquence des aurores polaires. Il sera difficile de comprendre que les corpuscules dont sont composés les rayons cathodiques puissent, sans être complètement absorbés avant d'atteindre les régions polaires parcourir de longues trajectoires le long d'une ligne de force, où la densité de l'air, quoique très petite, va toujours en croissant. Les aurores devraient ainsi être provoquées presque uniquement par des courants de rayons cathodiques qui

émanent des molécules dans les régions où la charge électrique est minime. Il me semble donc très difficile d'expliquer la grande fréquence des aurores dans des régions où la nuit polaire dure pendant plusieurs mois. La théorie de M. Arrhenius entraîne comme conséquence l'existence d'un minimum très marqué de la fréquence des aurores au milieu de l'hiver des pays arctiques. Les observations faites aux stations internationales polaires en 1882—1883 assignent cependant aux stations de Spitzberg et de l'île de Jan Mayen un maximum au mois de décembre 1882. D'après une série d'observations faites à Jacobshavn (côte ouest du Groenland lat. $69^{\circ} 31'$) de 1874 à 1883, le maximum des nuits à aurore tombe dans les mois de décembre et de janvier. A Godthaab (côte ouest du Groenland lat. $64^{\circ} 10'$) une série d'observations de 1865 jusqu'à 1882 donne un maximum en décembre. Plus au sud, à Ivigtut (lat. $61^{\circ} 12'$), le maximum d'après une série d'observations de 1875 à 1884 arrive en janvier.

D'autre part, dans les régions plus méridionales, le maximum de fréquence aurorale tombe aux équinoxes. Je m'accorde bien avec M. Arrhenius sur le temps de maximum de l'activité aurorale pour tout le globe que M. Arrhenius met à ces temps-là. Mais, d'après la théorie de M. Arrhenius, les aurores ne pourraient pas apparaître que dans des régions où les lignes de force du champ magnétique s'approchent assez de la verticale pour que les rayons cathodiques puissent descendre assez bas pour être absorbés dans l'atmosphère. Comment donc la théorie de M. Arrhenius peut-elle expliquer l'apparition des aurores dans les latitudes moyennes?

Supposons une grande aurore, telle qu'on la voit souvent dans les pays arctiques, composée d'arcs homogènes de forme circulaire, uniformément lumineux dans toutes ses parties et n'émettant pas de rayons. Si le phénomène se réduit à cette seule apparition aurorale, le champ magnétique n'est pas altéré. D'après la théorie d'Arrhenius, l'aurore que nous venons

de supposer devra être considérée comme la base commune des flots immenses de rayons auroraux. Si, dans ces circonstances, il apparaît au ciel une bande éclatante et dardant des rayons, pourquoi ces rayons sont-ils visibles et non pas ceux qui produisent les grands arcs? La bande n'occupe qu'un espace infiniment petit par rapport aux arcs; comment peut-on expliquer que l'apparition de la bande produise subitement des perturbations magnétiques, tandis que les grands arcs n'ont aucune influence sensible sur la position de l'aiguille aimantée?

Dans les pays arctiques les aurores qui apparaissent aux bords nord et sud de la zone du maximum de fréquence aurorale sont animées d'un mouvement commun. Pendant la nuit les aurores qui apparaissent tant au sud qu'au nord de cette zone s'approchent du zénith et dépassent en général ce point. Pour les aurores qui apparaissent au milieu de cette zone (comme à Jan Mayen) les observations montrent que les mouvements de sud au nord sont aussi fréquents que dans le sens opposé. Ces mouvements des aurores polaires me semblent incompatibles avec une théorie qui exige que les molécules d'air électrisées négativement qui émettent les rayons auroraux doivent, dans les pays arctiques, venir du sud. Les observations montrent, au contraire, que le mouvement des molécules électrisées part du milieu de la zone du maximum de la fréquence aurorale où, d'après la théorie de M. Arrhenius, la densité électrique serait minime.

La théorie n'est pas non plus à même d'expliquer l'apparition des aurores aux latitudes basses et la relation des aurores avec les perturbations magnétiques.

Théorie de M. Nordmann.

La plus récente théorie sur l'origine de l'aurore polaire a été exposée par M. Nordmann en 1903 dans un mémoire intitulé: „Essai sur le rôle des ondes herziennes en astronomie

physique¹. Cette théorie est basée sur l'hypothèse que le soleil émet des ondes électriques qui, en pénétrant dans notre atmosphère, y produisent une luminescence et une abondance de rayons cathodiques.

Les ondes lumineuses et les ondes électriques étant provoquées toutes deux par des oscillations de l'éther qui ne diffèrent que par leurs longueurs d'onde, M. Nordmann considère comme une hypothèse extrêmement vraisemblable que la photosphère du soleil émet des ondes électriques.

Les recherches faites par divers savants ainsi que par M. Nordmann pour prouver l'existence d'ondes électriques émises par le soleil dans notre atmosphère ont donné des résultats négatifs; mais comme le fait remarquer aussi M. Nordmann, ce résultat peut être dû à ce que les ondes électriques seraient complètement absorbées par les parties supérieures de notre atmosphère.

Cependant, pour que le soleil puisse émettre des ondes électriques dans l'univers il faut que celles-ci ne soient pas absorbées dans les parties environnant la photosphère. M. Nordmann suppose lui-même que l'illumination des gaz raréfiés de la couronne est due aux ondes électriques émanées du soleil. Ces ondes doivent donc subir une grande absorption avant de se répandre dans l'espace céleste; mais il est peut-être permis d'admettre que les ondes électriques ne sont pas complètement absorbées, de sorte que notre atmosphère en reçoive constamment.

Dans cette supposition, les expériences de MM. Ebert et Wiedemann sur la luminescence et la production des rayons cathodiques quand une tube de verre à gaz raréfié est frappé par des ondes électriques, ont porté M. Nordmann à penser que „les aurores boréales sont des phénomènes lumineux

¹ C. Nordmann: Thèses présentées à la faculté des Sciences de Paris. 1903.

produits dans l'atmosphère supérieure par les ondes herziennes émanées du soleil¹.

D'après cette théorie on devrait croire que, pendant la nuit, le ciel serait éclairé sous toutes les latitudes par une luminescence produite par des ondes électriques. M. Nordmann essaie de prévenir cette objection en cherchant à montrer qu'à mesure qu'on s'approche des pôles, la pénétration des rayons solaires et des rayons électriques qui les suivent devient de plus en plus grande à partir du coucher du soleil, c'est à dire du moment où les aurores boréales deviennent visibles.

La démonstration de cette proposition de M. Nordmann ne me paraît cependant pas claire. Pour la prouver M. Nordmann considère deux sections L_1 et L_2 (fig. 1 et fig. 2) de la terre suivant deux parallèles. Soit S la direction des rayons solaires perpendiculaires à Ca_1 et à Ca_2 , de telle sorte que la moitié de la surface de la terre, à droite de Ca_1 et Ca_2 , soit plongée dans la nuit. Supposons encore, pour simplifier, que les rayons cathodiques et la luminescence produits par les ondes électriques, le soient exclusivement entre deux couches de niveau donné de l'atmosphère, correspondant à deux pressions déterminées de l'air; soient respectivement n_1 et n_1' , n_2 et n_2' ces couches. De ces données M. Nordmann tire la conséquence „que les distances respectives de ces couches entre elles et à la terre sont égales dans les deux figures“², et il démontre que e_1b_1 est plus grand que e_2b_2 . Les ondes électriques en passant e_1b_1 doivent donc avoir subi une plus grande absorption que celles qui ont parcouru le chemin plus court e_2b_2 . Or, les aurores qui sont produites par les ondes électriques dans b_1f_1 sont d'une moindre intensité que celles produites en b_2f_2 . La latitude correspondant au parallèle L_2 étant plus grande que celle correspondant à L_1 , M. Nordmann en conclut que la fréquence et l'intensité des aurores croît à mesure qu'on s'approche des pôles.

¹ l. c. p. 112. ² l. c. p. 115.

Mais la démonstration de M. Nordmann ne me semble pas exacte. En effet, dans les deux figures, les cercles n_1 et n_2 de même que n_1' et n_2' représenteraient les traces des

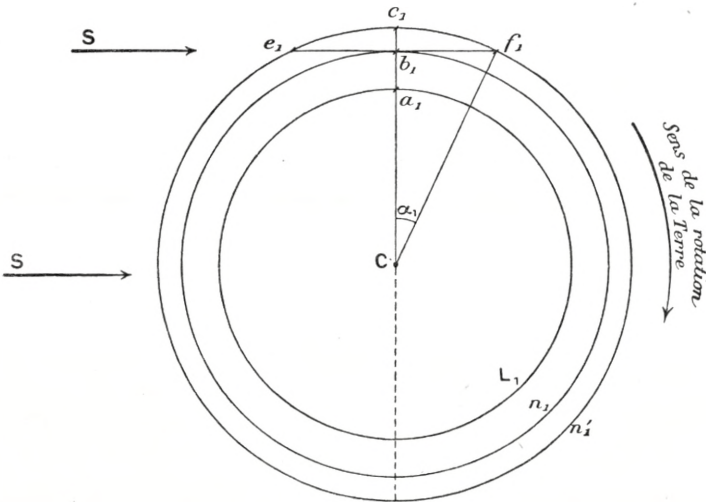


Fig. 1.

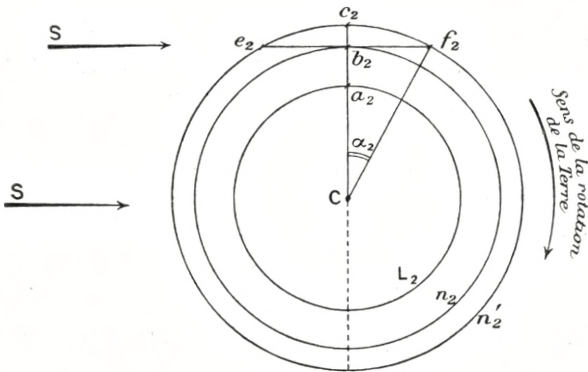


Fig. 2.

mêmes courbes de niveau, savoir de deux sphères ayant le même centre que la terre, et en ce cas $a_1 b_1$ n'est pas égal à $a_2 b_2$, ni $b_1 c_1$ égal à $b_2 c_2$. On démontre facilement qu'au coucher du soleil, la corde $e_1 f_1$ tangente à la sphère n_1 a la

même grandeur à toutes les latitudes. En effet, soit (fig. 1) L_1 un grand cercle de la terre contenant un point a_1 qui a le soleil à l'horizon, et passant par un autre point qui au même moment a le soleil au zénith, la ligne $e_1 f_1$ représente un rayon solaire tangent au cercle n_1 . Il est évident que la longueur de cette ligne est la même pour tous les points de la terre qui ont le soleil à l'horizon.

Si la production des aurores polaires, en un moment donné, était proportionnelle uniquement à l'intensité des ondes électriques solaires qui y pénètrent à ce moment, la fréquence diurne des aurores aurait deux maxima, l'un un peu après le coucher du soleil et l'autre un peu avant son lever. M. Nordmann prévient cette objection en avançant le fait que l'excitabilité d'un gaz à la luminescence, produite par des ondes électriques, dépend à un haut degré de son ionisation. C'est à l'ionisation de l'atmosphère par l'insolation du soleil qu'on doit, d'après M. Nordmann, attribuer ce fait que l'intensité de l'aurore est la plus grande dans les premières heures qui suivent le coucher du soleil. Il me semble pourtant difficile d'invoquer l'ionisation de l'atmosphère, produite par les rayons solaires ultra-violet, comme une cause importante de la production des aurores. A la station internationale suédoise au Spitzberg (lat. $78\frac{1}{2}^\circ$) les aurores ont eu leur maximum de fréquence en décembre. Et d'autre part, si une ionisation est favorable à la production de la luminescence, celle-ci doit se borner aux couches qui sont immédiatement frappées par les ondes électriques, puisqu'une forte luminescence rend l'air bon conducteur. Mais les lumières aurorales couvrent souvent la plus grande partie du ciel.

Idées personnelles.

Les astronomes et physiciens qui se sont occupés de l'étude de l'aurore polaire, se sont généralement bornés à un examen, souvent très profond, des aurores à structure rayonnée. Ces

formes d'aurore polaire donnent lieu à des manifestations des plus remarquables. On a étudié avec un grand soin la manière dont se plient les bandes et les grandes aurores à draperies, la marche des ondes lumineuses qui parcourent ce phénomène, le nombre de fois qu'une bande se meut de l'ouest à l'est ou en sens inverse. Dans les régions arctiques, les aurores d'une structure rayonnée sont la seule manifestation aurorale qui donne lieu à de grandes perturbations magnétiques. Il est donc facile de comprendre qu'on ait regardé surtout cette espèce d'aurores comme des manifestations caractéristiques du phénomène auroral et supposé qu'un examen précis de ses propriétés était le seul moyen de nous conduire à l'explication de la nature de l'aurore.

Les formes d'aurores d'une structure non rayonnée, comme les lueurs nébuleuses, les lumières uniformes et vagues, qui se manifestent par leur immobilité relativement grande et qui n'ont aucun effet sensible sur les aiguilles magnétiques, sont généralement regardées comme des phénomènes accidentels, comme des formes fragmentaires et dégradées de l'aurore polaire. A mon sens ces formes d'aurores sont si loin d'être des aurores dégradées, qu'elles dénotent, dans les couches supérieures de l'atmosphère, la présence de cet état particulier de l'air qui est la condition nécessaire pour que les grandes aurores à rayons puissent prendre naissance.

Classification des aurores polaires. Au lieu de rapporter les aurores polaires à la classification proposée par Weyprecht, il me semble plus en harmonie avec les propriétés caractéristiques de l'aurore, structure, mode d'apparition et effet sur le champ magnétique, de les diviser en les deux classes suivantes :

Première classe. Aurores sans structure rayonnée. Les aurores de cette classe diffèrent des aurores à rayons en ce qu'elles occupent, dans le sens horizontal, une grande surface sur le ciel. Elles brillent généralement d'une lumière

assez tranquille et affectent une immobilité remarquable. Leurs mouvements sont toujours lents, et tels que, pendant la nuit, pour les lieux situés au bord de la zone du maximum de l'apparition aurorale, elles se rapprochent lentement du zénith. La tranquillité de leur lueur et leur immobilité relative indiquent, qu'elles sont vues là, où se trouvent les conditions qui leur donnent naissance.

Dans les régions polaires, les aurores de cette classe ne sont pas accompagnées de perturbations magnétiques. Ce n'est qu'après être restées longtemps sur le ciel qu'elles peuvent causer quelques troubles dans le champ magnétique, ce qui semble indiquer, comme nous l'expliquerons plus loin, qu'elles subissent, pendant la nuit, un mouvement lent de haut en bas. Ce mouvement descendant semble aussi indiqué par leur spectre qui généralement est plus riche en lignes vers la fin de la nuit qu'au commencement.

Les mesures, effectuées par l'expédition danoise en Islande (1899—1900), assignent à cette classe d'aurores des hauteurs considérables. D'autres observations montrent aussi que les aurores de la première classe planent à des hauteurs beaucoup plus grandes que celles appartenant à la seconde classe. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet.

A cette classe d'aurores appartiennent les arcs homogènes d'une apparence nuageuse. Ces arcs sont ordinairement orientés de manière que leur sommet se trouve à peu près dans le méridien magnétique. Ils se manifestent le plus souvent sous forme d'arcs circulaires non interrompus, à bords bien tranchés, s'étendant sur tout le ciel et ayant les deux pieds à l'horizon.

Une autre forme de cette classe d'aurores est la lumière vague qui s'étend souvent sur le ciel entier.

Il y a encore d'autres aurores d'une structure non rayonnée. Telles sont les plaques palpitantes et les lueurs nuageuses qui apparaissent surtout après la fin d'une grande émission de

rayons, c'est à dire après une grande altération des conditions qui produisent l'aurore dans les couches extrêmes de l'atmosphère. Nous verrons aussi plus loin que les rayons auroraux transportent vers le bas avec eux une matière luminescente qui fait naître une brume aurorale de même constitution que les grandes aurores qui brillent dans les plus grandes hauteurs et d'où émane le rayonnement auroral. Mais pour expliquer la production de l'aurore il vaudra mieux considérer d'abord les phénomènes qui apparaissent dans des conditions non troublées.

Seconde classe. Aurores à structure rayonnée. Les aurores appartenant à la seconde classe affectent, si elles n'apparaissent pas comme des rayons isolés, la forme de nappes ayant pour génératrices les lignes de force du champ magnétique. Ces aurores sont animées de grands mouvements, en général, de translation et d'ondulation. Elles ont souvent une grande étendue dans le sens vertical mais leur épaisseur est si faible que le phénomène se présente comme une strie lumineuse quand il passe au zénith. Quand leur intensité est grande, l'aurore semble émettre des rayons vers le haut. La partie la plus lumineuse est toujours le bord inférieur qui est en général bien tranché quand le phénomène est en mouvement. Quand une telle aurore reste tranquille ou quand elle est en train de disparaître, elle perd sa forme de nappe en se transformant en une forme de nuage allongé. A mesure qu'un tel phénomène chemine vers le zénith il laisse après lui des stries nébuleuses et faiblement lumineuses. Quand l'intensité est grande l'aurore est parcourue par des ondes lumineuses. Ces aurores en forme de nappes sont produites par des rayons qui sont soudés côte à côte à leur pied comme par une matière lumineuse.

Les aurores à structure rayonnée sont plus proches de la terre que les aurores de la première classe. C'est pourquoi l'on voit au-dessous des aurores à structure non rayonnée les

bandes aurorales et les rayons qu'elles semblent émettre. Cela explique aussi leurs mouvements rapides ainsi que leur effet sur le champ magnétique. Nous verrons aussi plus loin que les phénomènes lumineux dont elles sont accompagnées montrent que leur hauteur au-dessus du sol doit être beaucoup plus petite que celle des aurores de la première classe.

Les aurores à rayons ont les propriétés des rayons cathodiques¹. Aussi les expériences spectrographiques, effectuées par les expéditions danoises en Islande et en Finlande, ont-elles montré que le spectre auroral contient le spectre du pôle négatif de l'azote.

Parmi les aurores à structure rayonnée nous comptons : les rayons auroraux, les arcs radiés, les bandes, les aurores en draperie et les couronnes.

Hauteur des arcs homogènes. L'expédition danoise qui, sous ma direction, hiverna en 1899—1900 à Akureyri (côte nord de l'Islande), a effectué des mesures sur la hauteur des arcs homogènes au-dessus du sol. On se borna à faire des mesures de ce genre d'aurores à cause de la netteté de leurs bords et de leur immobilité apparente. Les observateurs communiquaient téléphoniquement l'un avec l'autre. Les mesures ont été faites en déterminant les distances angulaires des bords à des étoiles fixes. Quand l'un des observateurs voyait l'étoile toucher le bord de l'arc, il le signalait à l'autre observateur qui à l'instant même mesurait la distance de l'étoile du même bord. La distance des deux stations était trop faible pour permettre de déterminer exactement la hauteur de l'aurore ; mais le résultat des mesures montra que, même en admettant pour les erreurs de mesure des valeurs, qui ne sont certainement pas trop petites, on ne pouvait pas attribuer à ce genre d'aurore des hauteurs au-dessus du sol inférieures à 400 ou 500 km. A ces hauteurs, l'atmosphère, dans les circonstances ordinaires, doit être si raréfiée qu'il

¹ Bull. de l'Académie de Sciences de Danemark 1894 et 1895.

serait impossible d'y produire des décharges ou des luminescences électriques.

Hypothèse fondamentale. Mes recherches sur les phénomènes auroraux et leur relations avec les perturbations magnétiques, telles que me les ont fait connaître mes séjours au Groenland et en Islande, m'ont porté à chercher la cause de l'aurore polaire dans une immense ionisation et électrisation négative des couches supérieures de l'atmosphère au-dessus de la zone de maximum de l'aurore, de sorte que cette altération de l'air se renouvelle chaque jour en commençant aux limites de l'atmosphère.

A mon sens, cette hypothèse nous permet d'expliquer tous les phénomènes généraux de l'aurore polaire et son effet sur le champ magnétique.

On sait que certains phénomènes célestes ont amené plusieurs astronomes et physiciens à admettre que le soleil émet des rayons cathodiques; c'est aussi sur cette supposition que M. Birkeland a fondé ses théories de l'aurore polaire.

Admettons donc, que, dans sa rotation autour du soleil, la terre soit toujours frappée par des rayons cathodiques émis par le soleil. Ces rayons suivront les lignes de force du champ magnétique terrestre et puisque ces lignes s'étendent en dehors de l'atmosphère, des flux de rayons cathodiques pourront parcourir de longs chemins avant d'être absorbés par l'atmosphère aux environs des pôles magnétiques. Comme le montrent les expériences, cette „suction des rayons cathodiques“ aura pour effet de concentrer des nappes de rayons cathodiques surtout dans deux anneaux situés chacun autour de l'un des pôles magnétiques. En pénétrant dans l'atmosphère les rayons cathodiques produiront, pendant le jour, une énorme ionisation et une charge négative des couches supérieures de l'air. Cette électrisation causera donc une grande dilatation des parties supérieures de l'atmosphère de sorte

que celles-ci s'élèveront de beaucoup au-dessus des surfaces de niveau qu'elles occuperaient dans des conditions ordinaires.

La charge négative de l'air dans les parties supérieures de l'atmosphère qui sont frappées par les rayons cathodiques ne peut cependant croître que jusqu'à une certaine limite; une grande partie de la charge se perdra par émission des rayons cathodiques dans l'espace céleste.

Partant de cette hypothèse et commençant par les phénomènes tels qu'ils apparaissent dans les régions arctiques, nous essayerons maintenant d'expliquer les phénomènes de l'aurore polaire et leur effet sur le champ magnétique terrestre.

Luminescence aurorale. Dans ce mélange de molécules d'air et de corpuscules négatifs que, pour abrégé, nous appelons matière aurorale, et qui, d'après notre hypothèse, se trouvent dans les couches supérieures de l'atmosphère, où pénètrent les rayons cathodiques émis par le soleil, la force électrique doit en chaque point être sujette à des variations perpétuelles en grandeur comme en direction. Le mouvement des particules, l'émission des rayons cathodiques vers le sol et vers l'espace céleste, amèneront des variations perpétuelles dans le potentiel des différents points de la masse. Dans l'intérieur de la matière aurorale se produira donc un ample développement d'un rayonnement d'ions négatifs ou de rayons cathodiques. Ce rayonnement étant sous le régime de forces électriques qui varient en grandeur et en direction, n'est par conséquent pas dirigé suivant le sens des lignes de force du champ magnétique terrestre. Il est évident que ce mouvement irrégulier des particules de la masse aurorale donnera lieu à des chocs perpétuels entre les ions négatifs avec les molécules d'air et les ions positifs, ce qui produira une luminescence qui paraît comme la lueur de l'aurore polaire.

Récemment Sir William et Lady Huggins ont publié une série de recherches qui me semblent fortement appuyer l'explication que je viens de donner ici sur la cause de la lumi-

nescence aurorale. Sous le titre „On the spectrum of the spontaneous luminous radiation of radium at ordinary temperatures“ M. le Président de la Royal Society et Madame Huggins ont publié deux mémoires sur la lumière qui se produit dans l'air immédiatement autour du bromure de radium¹. Ils ont trouvé que la luminescence ainsi produite donne le spectre de l'air dans lequel se trouve le radium. Quand le radium rayonne dans l'azote la lumière donne le spectre du pôle négatif de l'azote. Dans les mémoires cités, les auteurs donnent les longueurs d'onde suivantes des raies du spectre, savoir: $337 \mu\mu$, $357,7 \mu\mu$, $391,4 \mu\mu$ et $428 \mu\mu$. Toutes ces lignes coïncident avec des raies très marquées du spectre auroral que M. la Cour a photographié pendant l'hivernage de l'expédition danoise en Islande (1899—1900). Les deux dernières sont les plus fortes et les plus caractéristiques pour le spectre cathodique de l'azote; on ne les trouve pas dans la lumière du pôle positif.

Les recherches citées montrent qu'une forte ionisation de l'azote par le radium, sans intervention des forces électriques extérieures, produit une luminescence dont le spectre est le même que le spectre principal de l'aurore polaire.

L'explication de la production de la lumière de l'aurore polaire, d'après l'hypothèse que j'ai établie, me semble donc être en bonne harmonie avec les expériences physiques.

Nous donnons sur la planche qui suit ce mémoire une partie des spectres de la lumière du pôle négatif de l'azote et de l'aurore polaire. Les images de ces spectres sont obtenues par grossissement des épreuves photographiques originales, obtenues avec un spectrographe construit par M. Toepfer à Potsdam et dont le prisme et les lentilles sont en flint. Les deux fortes lignes du spectre auroral et les lignes correspondantes du spectre de l'azote ont les longueurs d'onde de $427,5 \mu\mu$ et $391,7 \mu\mu$, toutes les deux lignes caractéristiques

¹) Proceedings of the R. Society Vol. 72, pp. 196 et 409.

pour le spectre cathodique de l'azote. La ligne de la longueur d'onde de $357,5 \mu\mu$ est à peine visible dans l'image du spectre auroral; on la trouve un peu à droite de la forte ligne de comparaison dans la partie la plus à droite. Cette ligne comme celle, dont la longueur d'onde est $337,0 \mu\mu$, se voient comme des lignes assez marquées sur les clichés du spectre auroral qu'on a pris avec le spectrographe de Pellin dont le prisme est en spath d'Islande et les lentilles non achromatiques en quartz. La ligne la plus à gauche dans le spectre auroral est la ligne d'Ångström ($\lambda = 556,9 \mu\mu$).

Je reviendrai d'une manière détaillée, dans un mémoire spécial sur les travaux spectrographiques de l'expédition danoise pour l'exploration de l'aurore polaire, à ce sujet.

On comprend que l'intensité de la lumière aurorale n'est pas à chaque instant proportionnelle à l'intensité de l'ionisation. L'intensité du champ électrique dans l'intérieur de la masse de la matière aurorale peut à certains moments être très petite, même quand le champ contient beaucoup d'énergie potentielle. C'est ainsi qu'on voit souvent une grande émission de rayons apparaître subitement d'un ciel serein et assez sombre. Après la fin d'un tel rayonnement la partie du ciel d'où les rayons ont été émis, se couvre toujours d'aurores d'une apparence nuageuse, souvent très brillantes. On voit ainsi des plaques, en forme de nuages, grandes et lumineuses apparaître et disparaître subitement pour prendre naissance en d'autres points du ciel. Il est évident qu'une grande émission de rayons cathodiques hors d'une énorme masse électrisée et constituée par des particules très mobiles, doit produire de grandes variations de potentiel dans l'intérieur de ces masses, en sorte que l'équilibre électrique antérieurement établi soit rompu.

Orientation des arcs auroraux. Dans les pays arctiques la direction des arcs auroraux est sensiblement perpendiculaire au méridien magnétique du lieu. D'après notre hypothèse sur l'ionisation des couches supérieures de l'atmo-

sphère par des rayons cathodiques, émanés du soleil, cette orientation des aurores est une conséquence de la circonstance que les rayons cathodiques se disposent en nappes contenant les lignes de force du champ magnétique et qui sont à peu près perpendiculaires aux méridiens magnétiques. La plus grande ionisation des couches supérieures atmosphériques au-dessus de la zone de maximum de fréquence aurorale se produit donc en stries, suivant les parties de l'atmosphère qui sont frappées par les nappes susdites, formées des rayons cathodiques.

Mouvement diurne régulière de l'aurore. L'observation montre qu'aux bords de la zone du maximum auroral les aurores se rapprochent du zénith pendant la nuit pour souvent le dépasser. Cette marche du développement des aurores se retrouve dans tous les lieux où on a fait des observations aux bords extérieure et intérieure de la zone du maximum. Ce fait s'explique par la répulsion des particules électrisées de la matière aurorale qui a pour effet d'augmenter la largeur de la zone où la fréquence aurorale est maximum.

Aurore à structure rayonnée. La matière aurorale, étant électrisée négativement, émet à l'extérieur des rayons cathodiques suivant le sens des lignes de force du champ magnétique terrestre. Les rayons qui sont émis vers le sol s'enfoncent dans des couches d'air d'une densité croissante de sorte qu'ils y sont absorbés. Le mouvement de translation de cette espèce d'aurores est donc dû au mouvement des masses électriques dont elles émanent, le mouvement d'ondulation au déplacement de leurs points d'issue.

Ce n'est cependant que quand l'intensité est assez grande qu'on aperçoit nettement leur structure rayonnée. On voit souvent de petites bandes sans apercevoir les rayons dont elles sont formées; mais quand l'intensité croît, la bande s'élargit et émet des rayons vers le haut. Cette émission de rayons de la bande n'est pourtant qu'apparente; à la vérité

les bandes sont formées des rayons émis d'en haut, et qui semblent être soudés côte à côte en un pied commun. En outre la nature rayonnée des bandes nous est révélée par leur forme en nappes qui contiennent les lignes de force magnétiques comme génératrices.

Les phénomènes lumineux qui prennent naissance dans ces espèces d'aurores établissent, à mon sens, la justesse de l'hypothèse que j'ai établie sur la nature de l'aurore polaire.

En effet, ces phénomènes nous montrent que, par le rayonnement, une certaine quantité de la matière aurorale est transportée des couches supérieures de l'atmosphère jusqu'aux couches plus basses où elle continue à luire encore quelque temps; c'est ce qu'indiquent plusieurs phénomènes lumineux qui accompagnent l'apparition d'un rayonnement auroral.

C'est ainsi que, quand une bande aurorale chemine vers le zénith, nous voyons toujours une brume aurorale la suivre. Les points du ciel que la bande a dépassés se couvrent d'une brume lumineuse disposée en stries parallèles au bord inférieur de la bande. C'est une reste d'aurore que la bande en se mouvant laisse après elle, et qui s'explique par un transport par la bande de haut en bas de cette matière lumineuse dont sont formées, d'après notre hypothèse, les aurores de la première classe.

De même, quand l'intensité d'une bande s'affaiblit, son mouvement de translation s'arrête généralement, c'est signe que le rayonnement est en voie de disparaître. En ce cas la bande perd la forme en nappe et se transforme en une aurore ayant la forme d'un nuage lumineux allongé. Je ne vois aucune autre explication de cette transformation de l'aurore, si non que la forme sous laquelle finit l'aurore est due au transport par des rayons auroraux de la matière aurorale qui se trouve aux lieux d'où émanent les rayons auroraux.

On explique de la même manière l'apparition des ondes lumineuses qu'on voit parcourir les bandes quand l'intensité

de ce phénomène est grande. Il est évident que, lorsque de la matière aurorale est lancée de haut en bas par le rayonnement auroral, l'intensité de sa luminescence doit augmenter en proportion de la densité de la matière, c'est-à-dire, par l'accroissement de la pression de l'air, et par ce que la vitesse dont elle est animée s'amortit par suite de la résistance de l'air.

D'après ce que nous avons expliqué ci-dessus le pied commun qui réunit les rayons auroraux vers le bas, est formé par la matière aurorale luminescente transportée de haut en bas par les rayons auroraux. La lumière des rayons dont l'intensité croît vers le bas est due principalement à la luminescence de la matière aurorale, amenée par le rayonnement, et non à une simple absorption d'un rayonnement cathodique dans les couches plus denses de l'atmosphère. Si une absorption des rayons cathodiques dans l'atmosphère était la cause essentielle de la lumière de l'aurore, il deviendrait absolument impossible s'expliquer l'apparence des phénomènes auroraux dans les hauteurs extrêmes de l'atmosphère ainsi que les phénomènes lumineux qui accompagnent et suivent le rayonnement auroral.

Il va sans dire que la présence de la matière aurorale dans l'atmosphère favorise la formation de nuages en fournissant des noyaux de condensations; on explique ainsi la relation souvent observée entre les aurores et les nuages.

Relation des aurores avec les perturbations magnétiques. Il est évident que, d'après leur mode d'origine, et tant qu'elles sont isolées en bas par des couches d'air d'une grande raréfaction, les aurores de la première classe, qui se trouvent dans les plus grandes hauteurs au-dessus du sol, ne peuvent pas produire aucun effet sur le champ magnétique. L'apparition même de grandes aurores de cette classe ne peut donc donner lieu à aucune agitation des aiguilles aimantées.

Mais les choses se passent autrement quand les aurores émettent des rayons vers le bas.

On sait que les recherches sur les variations des éléments magnétiques terrestres ainsi que l'action sur l'atmosphère des rayons solaires ultra-violetes ont porté à admettre l'existence de courants électriques dans les hautes régions de l'atmosphère, où la conductibilité électrique de l'air est telle que de pareils courants peuvent prendre naissance. Quand donc l'aurore émet des rayons qui pénètrent jusqu'aux couches où de tels courants se produisent, ces courants sont mis en communication électrique avec de grandes masses électriques d'une capacité énorme, ce qui produira nécessairement de grandes oscillations dans l'intensité des courants.

Quand le rayonnement a cessé, la présence de matière aurorale dans les couches qui sont parcourues par les courants retiendra encore l'agitation pendant quelque temps, de sorte que les aiguilles magnétiques ne reviennent que peu à peu à leur position d'équilibre.

Il est évident que les perturbations des courants électriques s'étendront jusqu'à des contrées éloignées des lieux où le rayonnement auroral a eu lieu.

Une aurore à rayons est presque toujours un phénomène qui manifeste une grande agitation. On en a conclu que le mouvement d'une aurore joue un rôle important dans la production des perturbations magnétiques, mais on n'a pas été à même d'expliquer comment le mouvement causerait une perturbation magnétique.

Des lueurs aurorales près du sol. Hypothèse sur l'électricité négative de la terre. On sait que beaucoup d'observateurs prétendent avoir vu des lueurs aurorales près du sol. Presque toutes les monographies sur l'aurore polaire abondent en récits sur de tels phénomènes. Pendant l'expédition danoise à Godthaab (1882—83) nous avons quelquefois eu l'occasion de voir de brumes lumineuses près du sol. Je suis en posses-

sion d'un écrit de feu M. Steenstrup, le célèbre zoologiste danois; il y prétend avoir vu une aurore se projeter sur les flancs du mont Esia près de Reykjavik; Steenstrup dit avoir vu des parties de la montagne à gauche et à droite de l'aurore qui couvrit le milieu. Quelques officiers de la marine danoise et ingénieurs danois de ma connaissance m'ont communiqué des observations semblables. Personne ne peut douter de la réalité de telles lueurs, mais on peut élever des doutes sur leur relation avec les phénomènes auroraux. Des observations spectrographiques ne sauraient confirmer leur nature aurorale puisque la lumière réfléchie de la neige donne aussi la ligne principale du spectre auroral.

D'après les théories qui voient dans la lumière de l'aurore un effet des courants électriques ou d'une absorption dans l'atmosphère des rayons cathodiques lancés des couches supérieures de l'atmosphère, de telles lueurs ne peuvent avoir aucune relation avec l'aurore. D'après mon hypothèse sur l'aurore polaire, la nature aurorale de ces lueurs me semble très vraisemblable en admettant que des courants d'air descendant des hautes régions de l'atmosphère transportent avec eux de la matière aurorale. Ces lueurs se produisent donc de la même manière que la lumière autour de radium. On sait que la luminescence produite par le choc des ions croît beaucoup en intensité quand la pression sur la masse ionisée augmente, de sorte qu'un mélange de molécules d'air et d'ions qui n'émet pas de lumière sensible à basse pression devient lumineux quand il est soumis à la pression d'une atmosphère. On trouve dans „Les Aurores polaires“ de M. Angot quelques remarques très intéressantes sur ce sujet. M. Angot, en résumant quelques observations sur cette espèce d'aurores faites à Ivigtut (Groenland-sud) par l'ingénieur danois M. Fritz, remarque que d'après ledit observateur de telles lueurs „viennent d'ordinaire du détroit de Davis et s'engagent dans les fiords ou les dépressions des terrains, qu'elles rencontrent. Enfin les

mouvements de ces aurores semblent arrêtés quand des coups de vent violents soufflent en sens contraires¹.

Si ma supposition d'une ionisation et d'une électrisation négative des couches supérieures de l'atmosphère est juste, la surface de la terre, dans la zone du maximum de fréquence aurorale, doit recevoir par la descente des masses d'air des hautes régions de l'atmosphère une charge négative. D'après cette hypothèse on peut expliquer la présence de l'électricité négative de la terre comme provenant des aurores polaires.

Les aurores polaires qui apparaissent sous des latitudes moyennes. Sous les latitudes moyennes l'ionisation par des rayons cathodiques émis du soleil n'est, d'après mon hypothèse, que minime par rapport à celle qui a lieu dans la zone du maximum de l'aurore. On peut pourtant signaler son existence par la présence fréquente dans l'atmosphère de la ligne d'Ångström.

D'autre part le mode d'apparition des aurores qui se montrent dans les latitudes moyennes dénote qu'elles ne peuvent pas être attribuées, comme dans les pays arctiques, à une ionisation des couches supérieures de l'atmosphère provoquée par une pénétration des rayons cathodiques venus directement de l'espace céleste. Toutes les aurores des latitudes moyennes commencent toujours dans les régions nord du ciel pour s'élever vers le zénith pendant la nuit. Même quand leur intensité est très faible et quand elles n'apparaissent que comme des lueurs vagues qui ne s'élèvent que quelques degrés au-dessus de l'horizon nord, elles sont toujours accompagnées de perturbations magnétiques.

Ces faits me semblent dénoter qu'elles proviennent de grandes masses de matière aurorale qui sont transportées des régions arctiques par des vents soufflant dans les couches supérieures de l'atmosphère qui, d'après la théorie généralement adoptée sur la circulation générale de l'atmosphère, y

¹ Angot: Aurores polaires, p. 99.

règnent comme un courant de retour pour alimenter les hautes pressions atmosphériques dans les régions du cercle du cancer.

Il est évident que, transporté ainsi par le vent, l'air ionisé au-dessus de la zone du maximum de l'aurore ne peut rester isolé des couches plus basses de l'atmosphère qui sont bonnes conductrices de l'électricité. Il s'ensuit que de cette manière les aurores des latitudes moyennes doivent toujours provoquer des perturbations magnétiques et, par les oscillations perpétuelles de l'intensité et de la direction des courants électriques atmosphériques, donner naissance à des courants telluriques.

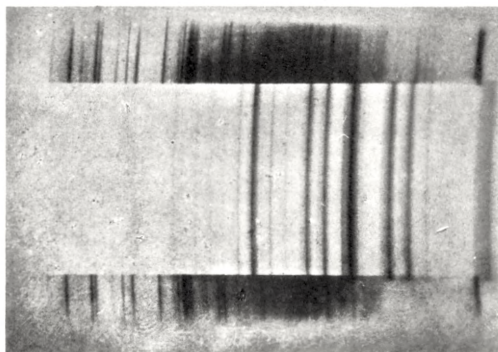
L'apparition d'une grande aurore dans les latitudes moyennes vient donc, d'après notre hypothèse, d'une grande ionisation et d'une électrisation des couches supérieures de l'atmosphère dans les régions autour de la zone du maximum de fréquence aurorale. Il n'en résulte pourtant pas qu'une grande aurore qui apparaît dans les latitudes moyennes coïncide avec l'apparition d'une grande aurore dans les pays arctiques. C'est ainsi que, pendant les grandes aurores qui apparurent en Europe et en Asie dans la nuit du 13 au 14 février 1892 et qui ont été accompagnées de grandes perturbations magnétiques et électriques, les aurores qui pendant la même nuit se sont montrées au Scoresby Sound, où hivernait une expédition danoise sous la direction de M. Ryder, n'ont été que d'une faible intensité et n'ont causé que de faibles perturbations magnétiques. Scoresby Sound (côte est du Groenland) est situé au nord de la zone du maximum auroral, c'est à dire dans le vent du courant de retour qui, d'après notre hypothèse, a transporté la matière aurorale comme une immense fumée vers les régions sud.

Aussi la fréquence des aurores quand on s'éloigne de la zone du maximum vers le sud semble-t-elle être beaucoup plus grande et s'étendre plus loin de la zone que dans les régions qui sont à l'intérieur de celle-ci.

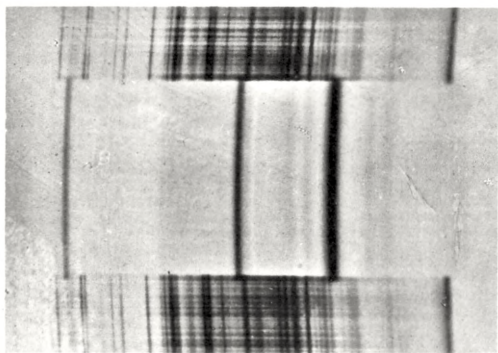
Il va sans dire que l'hypothèse que je viens d'établir, explique très simplement les périodes diurne et undécennale de l'aurore polaire. Pour la période annuelle il est évident qu'il doit y avoir un maximum aux équinoxes où les rayons solaires viennent frapper toute l'étendue de notre atmosphère, et non pendant l'hiver.

Dans les latitudes plus basses les phénomènes auroraux qui sont produits par une émission de la matière aurorale vers le sol, deviennent de plus en plus rares à mesure qu'on s'approche des régions plus méridionales. En revanche on y observe plus fréquemment les rayons auroraux qui sont émis vers l'espace céleste, quand nous voyons un arc auroral à quelques degrés au-dessus de l'horizon nord émettre des rayons qui souvent sont visibles jusqu'au zénith. Ces rayons sont très souvent parcourus par des „ondes lumineuses“. Il est évident que ni ces oscillations de lumière, ni les traces mêmes des rayons ne sauraient provenir d'une luminescence due à une absorption dans l'atmosphère à des hauteurs qui peuvent dépasser 1000 km. Conformément à notre explication des phénomènes qui se produisent quand les rayons vont vers le bas, on est donc forcé de voir dans ces phénomènes une luminescence produite par une matière qui produit d'elle même la lumière. Aussi ces considérations nous amènent-elles à supposer une matière aurorale telle que nous l'avons définie plus haut.

Par le transport de la matière aurorale, quand l'aurore émet des rayons vers l'espace céleste, des phénomènes auroraux deviennent visibles à des hauteurs qui s'étendent beaucoup en dehors de la limite de l'atmosphère.



Partie du spectre cathodique de l'azote.



Partie du spectre de l'aurore polaire.