

Effet de l'humidité de l'air et action du champ magnétique terrestre sur l'aspect de l'aurore boréale.

Par

Adam Paulsen.

(Présenté dans la séance du 8 mars 1895.)

Tous ceux qui dans les pays arctiques ont observé l'aurore boréale ont été frappés des ressemblances entre les aurores et certaines formes de nuages, de sorte qu'au crépuscule ou au clair de lune il est souvent impossible de distinguer si l'on a réellement devant les yeux une vraie aurore ou un nuage en forme d'aurore et illuminé par la clarté du crépuscule ou par le clair de lune.

Ainsi Bravais parle de certains nuages ayant même forme et même structure que l'aurore boréale¹⁾. Ces nuages étaient arrangés en forme d'arcs auroraux. Au clair de la lune on ne pouvait pas les discerner d'avec les aurores boréales. Dans le journal de l'expédition on a plusieurs fois noté comme aurore un phénomène que quelques minutes après on désignait sous le nom de cirrus, et *vice versa*.

«A l'époque du crépuscule du matin», dit Bravais, «il n'est pas rare de voir ces bandes nuageuses se substituer aux bandes aurorales. D'autres fois les nuages arqués existent sur

¹⁾ Voyages en Scandinavie, etc.; Aurores boréales, p. 532.

le ciel avant l'arrivée de la nuit, et c'est l'aurore au contraire qui paraît venir les remplacer. Ainsi les deux phénomènes peuvent exister ensemble, ou paraître se succéder; dans ce dernier cas, les bandes aurorales peuvent n'être que masquées par la lumière du jour et rester alliées aux bandes nuageuses diurnes.» Bravais parle aussi de certains nuages qui paraissent de jour et dont la forme et la structure rappellent celles des arcs de l'aurore. Dans ce cas on a observé que les bandes nuageuses offraient des stries transversales, perpendiculaires à l'axe de leur plus grande longueur. C'est précisément la même structure qui est caractéristique pour les zones aurorales, appelées bandes zénithales par Bravais.

Bravais est par ces analogies amené à supposer une certaine liaison entre les nuages et les aurores. Devons-nous en conclure», dit-il, «qu'une même cause règle ces deux ordres de phénomènes?» Il finit par conclure qu'il est bien permis de penser que la cause inconnue dont cette orientation est le résultat est aussi la même qui dirige les arcs de l'aurore boréale, ou du moins que ces causes ont toutes les deux une origine électrique.

Dans ses «Nordlichtbeobachtungen» Weyprecht relate des observations tout à fait semblables. Souvent on ne pouvait pas distinguer les formes nuageuses de l'aurore des nuages ordinaires, surtout à la clarté de la lune. Dans le journal des observations aurorales on trouve souvent répété cette phrase: «Les formes nuageuses de l'aurore ne peuvent pas être distinguées de nuages éclairés par la lune.»

Nous citerons ci-dessous textuellement, par exemple, les notes suivantes de Weyprecht:

«Le 9 nov. 1872, à 1^{1/2}^h du soir, des stries nuageuses blanchâtres à peu près parallèles se forment vers le nord en gagnant le zénith. Elles sont composées de vapeurs ténues qui ont un mouvement oscillatoire; elles s'allongent, se raccourcissent et se déplacent, tout en laissant nettement aper-

cevoir à travers elles Castor, Pollux et d'autres étoiles. L'ensemble du phénomène se meut lentement vers l'ouest en prenant plus de corps. A $3\frac{1}{4}^h$ il devient très lumineux et il disparaît lentement à $3\frac{3}{4}^h$ »

Je citerai une autre observation qui présente l'intérêt particulier d'être faite en plein jour :

«Le 22 février 1873 vers midi, le soleil étant à peu près à 1° au-dessus de l'horizon, le ciel légèrement couvert, on aperçut un arc nuageux très clair et nettement dessiné partant de l'est et gagnant le zénith pour s'étendre vers l'ouest. Vers le sud, s'élevant à une hauteur moindre que celle du premier arc, on aperçut encore quelques autres arcs moins nets à cause de la proximité du soleil. Les arcs nuageux n'étaient point des bandes de cirrus; ils étaient composés de masses nuageuses homogènes et on les aurait confondus avec des halos extraordinairement grands si le soleil n'eût pas été hors de leur centre. L'arc supérieur descendit lentement du zénith vers l'horizon du nord, puis il disparut. Les arcs étaient orientés dans la direction ordinaire des arcs auroraux; leurs sommets se trouvaient dans la direction du sud magnétique.»

Voici encore une observation, celle du 2 février: «A 9^h du matin, des bandes nuageuses éclairées par la lune et ressemblant à des bandes aurorales s'étendent à l'ouest en dépassant le zénith vers l'est. Les étoiles brillent à travers les bandes comme à travers une aurore. Entre 9^h5^m et 9^h10^m , mouvement oscillant comme celui d'une aurore boréale. L'ensemble du phénomène se condense lentement; le tout est transformé en nuages à 10^h »

Weyprecht cite encore plusieurs observations semblables; mais malgré toutes ces analogies il est pourtant d'avis qu'on ne doit pas attacher importance à ce fait que les nuages peuvent prendre la même forme qu'une aurore; l'un et l'autre phénomène sont changeants quant à la forme, il n'y a donc

pas lieu de s'étonner qu'ils prennent quelquefois des formes identiques.

Puisque les aurores ont été plus fréquentes dans les mois d'une grande nébulosité moyenne, Weyprecht en conclut que cependant il y a peut-être réellement une certaine relation entre les nuages et les aurores, de sorte que l'activité aurorale serait favorisée par une grande nébulosité.

Dans son ouvrage contenant les observations sur l'aurore boréale faites au Spitzberg en 1882—83, M. Carlheim-Gyllenskiöld relate aussi plusieurs cas où l'on est resté dans le doute sur la nature vraie des phénomènes observés. «Est-ce donc, peut-on demander», dit M. Carlheim-Gyllenskiöld, «que la lumière aurorale émane des nuages mêmes? Ou enfin n'y a-t-il pas de connexion entre les nuages et l'aurore boréale?» Néanmoins M. Gyllenskiöld en vient à cette conclusion: «Malgré toutes les analogies qui existent entre l'aurore boréale et les nuages ou les brouillards, je ne crois pas qu'il y ait la moindre relation entre ces deux phénomènes essentiellement différents.»

L'expédition allemande qui en 1882—83 était en station à Kingua-Fjord ($\varphi = 70^{\circ}27'$, $\lambda = -26^{\circ}12'$) a souvent observé que l'aurore boréale était suivie d'une formation de cirrus. La même observation a été faite par plusieurs autres observateurs des phénomènes auroraux. Ainsi, M. Vedel, membre de l'expédition danoise qui sous la direction de M. Ryder en 1891—92 hivernait à Scoresby-Sound, a fait plusieurs observations semblables. Une fois, à l'extinction d'une grande aurore, le ciel, qui avant l'apparition était serein, se couvrit de petits nuages semblables à des flocons de cirrus occupant précisément les mêmes points où les arcs auroraux étaient apparus. Hors de la partie qui avait été couverte par l'aurore, le ciel restait parfaitement serein.

Je serais entraîné trop loin, si je parlais de tous les faits relevés par des observateurs habiles et qui révèlent les ressemblances entre l'aurore et les nuages. Avant de donner les impressions que j'ai reçues moi-même de ces analogies, je vais

encore pourtant citer les observations suivantes parce qu'elles ont été faites par M. Hildebrandson, bien connu par ses profondes études sur les nuages. M. Hildebrandson a donné la description que voici de quelques phénomènes qu'il a classés comme nuages, mais qui, à mon avis, ont été de vraies aurores boréales¹⁾:

«Le 27 sept. 1880 à 6^h 24^m, à Upsal, des bandes de cirrus déliées et ayant une couleur gris-blanchâtre s'étendaient du N.E. au S.W. en se condensant lentement vers le N.W. Une telle bande s'étendait justement à travers Capella et Polaris. Cette bande montra dans l'intensité de sa lueur des variations rapides. Quelquefois elle s'affaiblissait jusqu'à disparaître pour, un moment après, apparaître très nettement dessinée sur le ciel. La bande voisine qui était située au S.E. présentait les mêmes fluctuations dans l'intensité de sa lueur, fluctuations qui pourtant étaient moins prononcées. Les périodes n'étaient pas de même durée; quelquefois l'intensité de la lumière restait presque constante pendant plusieurs minutes, parfois l'intensité était très variable pendant quelques secondes. Le phénomène fut visible pendant une demi-heure durant laquelle l'ensemble se mouvait vers le S.E.» M. Hildebrandson pense que les variations de l'intensité de la lumière étaient produites par des décharges électriques. Le même phénomène fut observé simultanément par M. Finemann.

Nous citerons encore une autre observation. A Upsal, le 24 novembre 1894, à 5^h du soir, MM. Hildebrandson et Westman ont observé sur un ciel parfaitement serein une strie nuageuse ayant une longueur de quelques degrés et qui émettait une assez forte lumière. Pendant que M. Hildebrandson allait chercher un spectroscopé, M. Westman vit le nuage disparaître subitement. M. Hildebrandson pense que la lueur de ce nuage provenait des rayons du soleil et

¹⁾ Meteorologische Zeitschrift. Années 1880, p. 451, et 1895, p. 71.

cherche à expliquer la disparition subite par le coucher du soleil au-dessous de l'horizon où se trouvait le nuage. D'après cette explication le nuage aurait été suspendu à une altitude de 138 km. M. Hildebrandson parle aussi d'un nuage semblable qui a été observé le 19 décembre 1892 au-dessus de la mer du Nord et dont la hauteur selon M. Mohn était de 132 km. M. Hildebrandson dit que pour le moment il n'est pas possible d'expliquer la nature de tels nuages.

Pour moi, je pense que ces nuages lumineux étaient des aurores boréales couvertes par une couche nuageuse produite par l'activité même de l'aurore.

Je vais maintenant décrire quelques observations que j'ai faites moi-même et rappeler les impressions que m'ont faites ces phénomènes.

Ainsi je me souviens que pendant mon séjour en Groenland j'ai observé au crépuscule un phénomène que d'abord j'ai pris pour un nuage dont la forme attirait mon attention. Le phénomène avait la forme d'une draperie nuageuse illuminée par la clarté du crépuscule. Mais ce qui surtout excita mon intérêt c'était le mouvement singulier du phénomène. Cette draperie nuageuse cheminait avec une grande vitesse dans la direction du méridien magnétique. Le phénomène se rapprocha et sa nature vraie me fut révélée par le mouvement ondulatoire qui caractérise les aurores boréales. En passant au zénith il ressemblait à une strie claire et oscillante. A la nuit tombante je reconnus la lueur propre du phénomène. Le tout me fit l'effet d'un nuage dans lequel s'était cachée une aurore boréale, ainsi que je le dis alors aux autres membres de l'expédition. Il était impossible de nier et la nature nuageuse et la nature aurorale de ce singulier phénomène.

Le clair de lune produisant une illumination beaucoup plus grande que la lueur aurorale, je pensais d'abord qu'il serait impossible de voir les aurores quand la pleine lune était au-dessus de l'horizon. On sait qu'il n'en est pas ainsi. Mais ce

qui me frappa ce fut l'aspect particulier sous lequel l'aurore boréale se présenta en pareilles circonstances. Les aurores ressemblaient à des formations nuageuses qui n'étaient visibles que par la lumière reflétée du clair de lune. Les draperies ressemblaient à des voiles de brouillard légers et blancs flottant dans l'air. Par le clair de lune il était souvent absolument impossible de discerner une strie de nuage d'une bande aurorale; et en effet, dire que, par le clair de lune, nous avons très souvent vu des nuages ayant la forme et le mouvement d'une aurore boréale, sans que la lueur propre de ce phénomène, c'est-à-dire l'aurore elle-même, nous fût visible, c'est répéter exactement ce qu'on a vu et ce qu'on a pu voir dans ces circonstances.

Je dirai maintenant quelques mots d'une autre particularité dans l'apparence de l'aurore. Par une nuit obscure et par un ciel serein je me suis souvent étonné de l'apparence sombre d'une aurore. Pendant qu'une portion d'une bande resplendissait, on pouvait à peine distinguer la lueur propre de l'autre partie de l'aurore. J'ai souvent vu toute une bande aurorale se détacher presque en sombre sur un ciel étoilé; à peine pouvait-on reconnaître la lueur propre du phénomène. Une telle aurore presque obscure peut subitement devenir resplendissante, mais cette variation brusque dans l'intensité est toujours liée à une ondulation ou à un autre mouvement.

Je dirai encore quelques mots des formes d'aurores dites nuageuses ou nébuleuses. On sait qu'une aurore faible se présente souvent sur le ciel comme une clarté semblable à l'aube du jour. Ces lueurs peuvent occuper une grande étendue du ciel. Mais souvent une aurore faible se montre aussi comme de petites taches lumineuses répandues sur un ciel qui semble être couvert d'un léger voile brumeux. On voit quelquefois aussi l'aurore sous forme d'un assez grand nuage isolé et très lumineux. A Godthaab j'ai vu souvent les grandes aurores s'élever de l'horizon au S.E. sous l'aspect d'une série d'arcs parallèles dont la lumière quoique intense semblait être transmise

à travers un milieu nébuleux. Quand ces arcs montaient vers le zénith, leurs intervalles étaient remplis comme d'une brume uniforme et luisante. En s'évanouissant, les aurores, surtout les grandes, laissent souvent comme résidu une espèce de nuage, quelquefois sous forme d'une grande masse de fumée luisante qui disparaissait peu à peu.

Sur ces phénomènes auroraux d'une forme nuageuse ou brumeuse, les savants qui se sont occupés de l'aurore ont émis des opinions différentes. Bravais les considère comme des formes dégénérées de l'aurore. De son côté, M. Wilcke s'exprime en ces termes : « Les arcs s'éteignent ou se dissipent laissant après eux des lueurs palpantes. Ces phénomènes méritent à peine une explication spéciale. Les couches de vapeur une fois enflammées restent lumineuses jusqu'à ce que l'électricité se soit écoulée; mais à mesure que les vapeurs, chargées d'électricité se confondent avec l'air, les phénomènes deviennent de plus en plus irréguliers.»¹⁾

M. Loomis croit que « cette vapeur d'aurore boréale est due à une extrême diffusion de la substance dont sont formés les arcs auroraux.»²⁾

Selon l'opinion de Weyprecht³⁾, les aurores dites nébuleuses ou nuageuses consistent en une certaine « matière lumineuse » à laquelle la lueur de l'aurore est intimement liée.

Quant à moi, j'ose prétendre que toutes ces formes nuageuses qui accompagnent l'aurore boréale sont des véritables nuages formés de globules d'eau ou de flocons de glace et qui sont produits par l'activité aurorale; ces nuages ne sont pas lumineux par eux-mêmes, mais seulement illuminés par l'aurore boréale qui les a produits.

¹⁾ Wilcke: Discours sur l'aurore boréale, p. 59.

²⁾ Loomis: The aurora borealis, p. 215.

³⁾ Weyprecht: Nordlichtbeobachtungen, pp. 21 et 22.

Dans un mémoire présenté à l'Académie¹⁾ j'ai cherché à montrer que les formes et les mouvements de l'aurore boréale ne permettent pas d'admettre que le phénomène provienne de courants électriques. Après la publication de ce mémoire, M. Angot, dans un traité sur les aurores, a émis l'hypothèse qu'il y a deux espèces d'aurores d'origine différente, savoir des aurores qui selon la théorie d'Edlund proviennent de l'induction unipolaire, et des aurores qui sont dues à des courants d'induction produits par les variations du champ magnétique terrestre²⁾. Mais même en négligeant les objections que suscitent les apparences de l'aurore contre l'explication du phénomène par des courants électriques, de tels courants d'une intensité un peu forte ne pourraient être causés par aucune sorte d'induction. D'abord les variations du champ magnétique terrestre qui, selon M. Angot, doivent produire ces courants électriques sont trop faibles pour engendrer des courants ayant pour effet les grands phénomènes de l'aurore; et surtout ces courants d'induction seraient — d'après une loi fondamentale de l'induction — soumis à des forces qui les déplaceraient, de sorte qu'ils seraient anéantis par leur propre mouvement. Or nous ne devons certainement pas supposer dans l'air un obstacle au déplacement de ces courants induits; en effet il n'y a pas dans l'atmosphère de phénomène plus mobile que l'aurore boréale. Mais plus une aurore est mobile, plus sa lumière est intense et plus ses effets magnétiques sont grands.

A la vérité, il me semble bien difficile d'admettre que l'aurore boréale doive son origine à des courants électriques dans l'atmosphère. Il sera donc juste, à mon avis, d'abandonner les théories qui assignent comme origine aux aurores boréales des courants électriques.

¹⁾ Adam Paulsen: Sur la nature et l'origine de l'aurore boréale; Bulletin de l'Académie Royale des Sciences de Danemark, 1894.

²⁾ A. Angot: Les aurores polaires, p. 228.

Le plus naturel me semble être de saisir la nature de l'aurore boréale d'après l'impression immédiate que nous produit l'observation de ce phénomène, c'est-à-dire d'y voir un phénomène dû à un rayonnement. Dans des rayons cathodiques ou, si l'on aime mieux, dans les rayons lumineux que peut émettre le pôle négatif d'une machine électrique dans de l'air très raréfié, nous trouvons toutes les qualités qui sont inhérentes aux rayons de l'aurore boréale. On sait que la marche des rayons cathodiques dépend de la direction des lignes de force dans un champ magnétique; les rayons cathodiques sont absorbés par l'air avec production de fluorescence. Les importantes expériences de M. Lenard montrent que l'air rendu fluorescent par des rayons cathodiques est bon conducteur de l'électricité. C'est dans cet effet de l'absorption de ces rayons par l'air qu'il faut, à mon avis, chercher l'explication de l'existence dans l'aurore boréale de courants électriques qui y prennent naissance par des différences de potentiel dans les parties de l'atmosphère qui absorbent les rayons auroraux. On comprend ainsi que les grandes aurores qui apparaissent dans les latitudes moyennes et dont la grandeur est de l'ordre de celle des grands continents de notre globe, doivent toujours être le siège de courants électriques. Dans les pays arctiques, au contraire, beaucoup d'aurores boréales sont des phénomènes locaux; il n'y peut donc naître des courants, sinon momentanément, quand l'aurore est stationnaire, tandis que, selon notre hypothèse, des courants doivent prendre naissance par le mouvement du phénomène, ce qui est aussi d'accord avec les faits. Et enfin, pour revenir à la question qui nous préoccupe, l'absorption des rayons cathodiques dans l'air produit une formation abondante d'ozone. En admettant que les rayons auroraux par leur absorption dans l'atmosphère produisent le même effet, la production de l'ozone par l'aurore boréale doit amener la formation de nuages.

En effet, M. Mascart a constaté que la présence de l'ozone conserve à l'air la faculté de provoquer des buées¹⁾; on sait encore que surtout l'existence de l'eau oxygénée, qui peut se former par la présence de l'ozone dans de l'air humide, donne des condensations sous forme de brouillards très épais. On pourrait peut-être objecter que dans les hautes régions de l'atmosphère où apparaissent les aurores boréales la température est si basse qu'on doit considérer comme nulle la quantité de vapeur d'eau qui peut s'y trouver réellement. Mais il faut remarquer que, à ces hauteurs, l'air peut être regardé comme absolument exempt de corpuscules en suspension, de sorte qu'il peut renfermer des quantités de vapeur beaucoup plus grandes que celles qui correspondent au point de saturation. On sait en outre que la production d'ozone par voie électrique est fortement favorisée par de basses températures.

Dans cette hypothèse on comprend, à mon avis, facilement la relation intime entre les aurores boréales et les nuages. Quand une aurore faible apparaît dans une atmosphère sèche, la formation de l'ozone n'y peut pas produire de condensations, et la lumière de l'aurore se présente comme une clarté faible mais sereine; c'est cette espèce d'aurore qu'on appelle ordinairement «lueurs faibles sans forme bien définie». Quand, au contraire, l'air, dans les régions où se forme l'aurore, est humide ou sursaturé, l'absorption des rayons auroraux produit un voile nuageux qui couvre le ciel dans toute l'étendue de l'aurore. Les taches lumineuses sous forme de petits nuages ne sont donc que des parties de ce voile de brume plus déliées que les autres et à travers lesquelles l'éclat de l'aurore nous devient visible. La variation dans l'épaisseur de la brume fait donc l'impression de la «palpitation» dans la lumière dont parlent Bravais, M. Carlheim-Gyllenskiöld et autres savants

¹⁾ Mascart: Traité d'optique. T. III, p. 405; id. Notice sur les Travaux scientifiques, p. 40.

observateurs de l'aurore boréale. On comprend aussi pourquoi ces «masses lumineuses semblables à des cumulus» disparaissent subitement pour reparaitre un instant après dans un autre lieu, «croissant rapidement en extension pour disparaître ensuite de nouveau»¹⁾. J'ai vu quelquefois une faible aurore sous forme de points lumineux palpitants qui donnaient l'impression d'une lueur phosphorescente remplissant le ciel. On comprend qu'un tel phénomène doit apparaitre quand le voile brumeux produit par l'aurore est ténu et très uniformément réparti sur le ciel.

En présence de la pleine lune on ne voit donc que le voile nuageux entourant l'aurore qui l'a formé, mais non l'aurore elle-même. Il est donc tout naturel qu'à la clarté de la lune Weyprecht ne sût pas faire la différence entre ce qu'il appelle «Nordlichtdunst», c'est-à-dire brume aurorale, et des nuages ordinaires, parce que ce «Nordlichtdunst» n'est nullement une forme particulière de l'aurore, mais simplement un amas de véritables nuages. Nous comprenons aussi comment des arcs auroraux, en disparaissant le matin devant la clarté du jour, peuvent être remplacés dans le ciel par des bandes de cirrus, et pourquoi des nuages qui se montrent d'abord dans la journée en forme d'arcs auroraux émettent, la nuit suivante, la lueur de l'aurore boréale. Le phénomène qu'on appelle «aurore en forme de panaches de fumée» et qui a été observé par Payer, Weyprecht, Holm et d'autres explorateurs des régions arctiques n'est donc pas une forme particulière de l'aurore, mais seulement une groupe de masses nébuleuses illuminées par l'aurore boréale qui leur a donné naissance.

Pour expliquer le «segment obscur», on a émis des opinions différentes. Beaucoup d'auteurs qui ont écrit sur l'aurore boréale attribuent ce segment à l'effet du contraste, tandis que d'autres admettent l'existence d'une matière spéciale dans le segment. Mais si le segment n'était pas autre chose que la

¹⁾ Carlheim-Gyllenskiöld: Aurore boréale, p. 141.

partie du ciel limitant le bord inférieur d'un arc auroral, la hauteur de celui-ci devrait croître dans une proportion encore plus grande que la latitude du lieu d'observation. On sait qu'il n'en est pas ainsi. Bravais est tenté de voir dans le segment obscur un amas de brumes ordinaires ou de nuages de stratus qu'on voit souvent près de l'horizon. Mais le bord du segment obscur affecte toujours la forme d'un arc auroral ayant en tous lieux son point culminant à peu près dans le méridien magnétique, ce qui montre que la forme arquée du bord du segment est due à un effet de perspective et que la matière dont est formée le segment doit, comme les arcs auroraux, être suspendue à des hauteurs surpassant de beaucoup celle des nuages ordinaires les plus élevés. Or, si le segment obscur est dû à la présence d'une brume, l'altitude de celle-ci doit être de même ordre que celle de l'aurore.

Si l'hypothèse que j'ai exposée sur la relation entre l'aurore et les nuages est juste, la formation du segment obscur me semble être une conséquence naturelle de l'activité aurorale. Dans les latitudes moyennes la partie principale de l'aurore est toujours située vers l'horizon Nord. La teinte sombre du segment provient et de la masse de brume formée par l'aurore et du chemin que doivent parcourir à travers la brume les rayons visuels. La hauteur pour laquelle la brume nous cache la lumière d'une aurore boréale, quand l'épaisseur de la couche est uniforme, doit donc être à peu près la même à différentes latitudes.

Le «segment obscur» est donc, à mon avis, un phénomène de même nature que la brume dont j'ai parlé plus haut (p. 289) qui se montre comme un produit de l'activité aurorale et dans laquelle les parties plus déliées que les autres affectent la forme de nuages lumineux. Aussi Bravais¹⁾ a-t-il vu des «plaques aurorales» apparaissant dans le segment obscur; le même ob-

¹⁾ Voyages en Scandinavie : Aurores boréales, p. 440 et 441.

servateur a quelquefois vu le segment, «au lieu de former une masse compacte et continue», présenter la forme de «cumulus plus ou moins isolés» les uns des autres: «ceux-ci paraissent alors se projeter sur un fond lumineux, et leurs bords peuvent prendre différents degrés d'éclairement.»

Je citerai encore quelques observations¹⁾ de Siljeström qui me semblent être très dignes d'attention. Dans les «Résultats des observations faites sur les aurores boréales de Bossekop» M. Siljeström remarque qu'il a souvent vu des lueurs brillantes à une très grande hauteur; «si ces mêmes lueurs restaient quelque temps au même endroit du ciel sans descendre jusqu'à l'horizon, il y avait toujours au-dessous d'elles un espace noir sur lequel elles reposaient ou duquel elles paraissaient provenir. Tel était, par exemple, le cas de l'arc peu élevé qui se présentait habituellement à l'horizon Nord, et dont j'ai fait mention plus haut; l'espace situé au-dessous de lui jusqu'à l'horizon formait un segment parfaitement noir, dont l'arc était le bord lumineux.

Les lueurs détachées paraissent aussi émaner de semblables espaces noirs, et souvent je voyais des colonnes de lumière entre deux espaces noirs superposés l'un à l'autre. Quelquefois j'observai des lueurs, entourées de tous côtés de semblables espaces noirs . . . D'après l'apparence de ces taches noires il me paraît évident qu'elles étaient réellement formées de vapeurs fort éloignées, mais très fines, puisque j'observai quelquefois des étoiles au travers d'elles.» Ces observations me semblent aussi rentrer dans l'explication que j'ai donnée sur la formation du segment obscur.

La production de nuages par l'activité aurorale nous rend aussi compte des phénomènes lumineux qui se montrent sous forme de nuances particulières dans la disposition de la lumière

¹⁾ Voyages en Scandinavie: Aurores boréales, p. 558.

de l'aurore ou comme des ondes lumineuses parcourant les bandes et les draperies.

L'aurore paraît souvent, dans les pays arctiques, sous forme d'une draperie ondulante, ce qui lui donne l'apparence d'un drapeau agité par le vent. Dans une telle forme d'aurore, la disposition de la lumière fait l'impression de plis verticaux en relief fortement luisants séparés par des plis en creux d'une lumière sombre. Quand une draperie se plisse, les parties situées en arrière paraissent toujours dans une lumière plus sombre, de sorte qu'on reçoit l'impression qu'elles sont ombragées par la partie tournée vers l'observateur¹). Cette impression de relief et de creux n'est pas une illusion d'optique, car la lumière des parties les plus éloignées de l'observateur paraît toujours plus sombre que celle des parties les plus rapprochées. Les nuances lumineuses ne peuvent pas être expliquées par une différence d'éloignement, puisque la clarté apparente d'un objet doit être indépendante de la distance s'il n'y a pas d'absorption par le milieu intermédiaire. Elles ne peuvent pas non plus provenir d'une disposition différente de l'intensité vraie de la lumière; car imaginons deux observateurs, l'un placé au nord et l'autre au sud d'une draperie; l'observateur au nord verra resplendir dans la plus grande intensité les mêmes parties du phénomène que l'autre verra dans une lumière sombre, et *vice versa*. La seule explication possible est que la lumière des parties en creux est atténuée par l'interposition d'un milieu sombre. Les nuances dans la lumière d'une draperie sont donc une conséquence nécessaire de la production de nuages. En effet quand la draperie ondule, les plis se mouvant vers l'observateur sortent de leur couche nuageuse et l'aurore nous apparaît dans toute sa nudité splendide, tandis que les plis en creux sont obscurcis par la brume dans laquelle ils se retirent.

¹) Ces nuances de lumière sont très bien représentées dans les beaux dessins de Bravais. Voir: Voyages en Scandinavie, etc.; Atlas de physique.

Dans les bandes aurorales on aperçoit souvent un mouvement de lumière auquel on a donné le nom d'«ondes lumineuses». Ces ondes lumineuses apparaissent comme des parties plus lumineuses que les autres, parcourant une bande généralement dans toute sa longueur. La direction du mouvement peut être de l'est à l'ouest ou inversement; on n'a pas trouvé de direction préférée par ces ondes. Quand une bande est parcourue par une onde lumineuse, elle est toujours en mouvement; les bords semblent prendre un mouvement bondissant quand ils sont frappés par l'onde. Si la bande est composée de rayons, l'onde, en les frappant, semble faire abaisser ou remonter les rayons, ce qu'on exprime en disant que les rayons «jouent» ou «dansent». «La vitesse et l'intensité des ondes dépendent de la forme et de l'intensité lumineuse de la bande. Dans un mouvement lent de la bande, les ondes lumineuses sont à peine visibles, le tout a donc un cachet d'immobilité»¹⁾.

Pour expliquer ce phénomène de mouvement lumineux dans les bandes, on a émis des opinions différentes. MM. Wilcke et Carlheim-Gyllenskiöld²⁾ voient dans ces ondes des éclairs faibles ou des décharges électriques entre les différentes parties de l'aurore. Mais quelque idée qu'on se fasse de la nature de l'aurore boréale, il me semble très difficile de considérer ces mouvements de lumière comme l'effet de décharges électriques. Ces ondes n'ont point de ressemblance avec des étincelles électriques ou des éclairs. Leur vitesse n'est pas tellement grande qu'on ne puisse suivre des yeux le mouvement; et encore ne se présentent-elles que comme des parties, souvent assez grandes, de l'aurore, d'une lueur plus brillante que celle des autres, mais non pas sous l'apparence bien connue d'une étincelle électrique. Même au cas où des décharges électriques auraient lieu dans une bande aurorale, celle-ci de-

¹⁾ Voir: Weyprecht, Nordlichtbeobachtungen, pp. 5 et 6.

²⁾ Carlheim-Gyllenskiöld: Aurores boréales, p. 139.

vrait être composée de parties conductrices séparées par des parties isolantes, ce qu'on n'a pas le droit de supposer.

Weyprecht admet que les ondes lumineuses proviennent d'un mouvement de la « matière lumineuse » qui selon lui est intimement liée à la lumière de l'aurore, et qui ferait luire d'une intensité particulière les parties de l'aurore qu'elle frappe¹⁾. Bravais²⁾ et M. Loomis sont aussi de l'opinion que les arcs auroraux sont formés d'une certaine « substance ».

Mais, à mon avis, il serait difficile d'admettre pour l'apparition des aurores une matière particulière. La pénétration réciproque des gaz et les vents empêcheraient l'isolement de cette matière dans l'atmosphère, et comment comprendre la qualité particulière qu'aurait cette matière de pouvoir courir le long des bandes aurorales, qui certainement ne pourraient pas résister à leur entraînement par le vent?

Les « ondes lumineuses » qui semblent parcourir les bandes s'expliquent, à mon avis, tout naturellement par la couche nuageuse que produit l'aurore. Remarquons d'abord que de telles « ondes », comme le remarque aussi Weyprecht, n'apparaissent que quand l'aurore est en mouvement. Dans une bande aurorale non agitée, quelques parties apparaissent souvent avec un éclat très brillant, tandis que d'autres sont sombres jusqu'à disparaître. Les parties brillantes proviennent, d'après notre hypothèse, des déchirures dans la couche nuageuse à travers lesquelles nous voyons l'aurore, tandis que les autres parties de la bande sont plus ou moins cachées par les nuages. Quand donc une bande se met en mouvement, on en voit, à travers la déchirure, les différentes parties resplendissantes dans toute l'intensité de leur lumière, ce qui donne l'illusion d'une onde lumineuse parcourant la bande. Par le mouvement ondulant de la bande, la partie du bord qu'on voit à travers la

¹⁾ Weyprecht: Nordlichtbeobachtungen, p. 21.

²⁾ Bravais: Voyages en Scandinavie; Aurores boréales, p. 519.

déchirure semble être dans un état alternatif de descente et de montée; il semble donc que les endroits de la bande qui sont frappés par «l'onde» prennent un mouvement bondissant.

D'après notre hypothèse, l'intensité vraie d'une aurore boréale est uniquement déterminée par le nombre des rayons qui sont absorbés par l'atmosphère. Quand donc l'intensité d'une bande croît, on voit la bande s'élargir et elle semble émettre des rayons; c'est là la seule preuve sûre d'un accroissement réel de l'intensité. En même temps que s'accroît le nombre des rayons absorbés, croît aussi l'intensité vraie de la lumière; mais il se peut que la lumière soit assombrie par la production de nuages. Ni l'intensité apparente de la lumière d'une aurore boréale ni ses effets magnétiques ne peuvent donc servir à mesurer l'intensité vraie du phénomène. Quand une aurore intense reste quelque temps sensiblement immobile, si l'air est assez humide, elle se cache dans sa couche nuageuse; voilà, à mon avis, pourquoi, comme le remarque Weyprecht, «les aurores sensiblement immobiles et d'une lumière brumeuse n'ont sur la position de l'aiguille aimantée aucun effet sensible.»

Nous venons de voir le rôle que joue l'humidité de l'air dans les apparences de l'aurore boréale et nous avons vu que, d'après notre hypothèse, toutes les formes d'un caractère nuageux ne sont que des phénomènes accidentels sans rapport avec la forme vraie de l'aurore, qui dépend seulement de la distribution et de l'intensité des rayons qui par leur absorption dans l'atmosphère produisent les phénomènes auroraux.

L'apparence la plus caractéristique de l'aurore boréale, celle qui a servi de base à notre hypothèse, c'est la structure rayonnante du phénomène. L'expérience montre que les rayons de l'aurore suivent les lignes de force du champ magnétique terrestre. D'après notre hypothèse, les arcs, les bandes et tous les phénomènes qui peuvent émettre ce que nous appelons des

rayons, proviennent de l'absorption d'un rayonnement dirigé suivant les lignes de force du champ terrestre.

Mais il y a une autre apparence aurorale dans laquelle on ne peut pas reconnaître une structure rayonnante: c'est la forme dite «lueurs vagues sans forme bien définie».

Cette forme de l'aurore se présente comme une lueur blanchâtre d'une intensité très variable: souvent à peine visible, elle peut quelquefois atteindre l'intensité de l'illumination du ciel par l'aube du jour quand le soleil n'est que de quelques degrés au-dessous de l'horizon. Cette variété d'aurore boréale n'émet jamais de rayons, et quelque grande que soit son intensité, on ne peut jamais y reconnaître la moindre trace de rayons.

Le fait que les rayons de l'aurore boréale prennent la direction des lignes de force du champ terrestre montre que l'action du champ sur les rayons est nulle dans ladite direction et que par conséquent cette action doit avoir son maximum pour un rayon émis tangentiellement à une surface de niveau.

Imaginons maintenant un rayon cathodique lancé dans la direction des lignes de force d'un champ magnétique homogène. A cause de la symétrie le rayon n'est pas dévié par l'action du champ. Imaginons encore un rayon cathodique dont la direction initiale est située dans une surface de niveau qui, dans le cas que nous considérons, est un plan. L'action du champ n'ayant pas de composante dans la direction des lignes de force, le rayon continuera de se mouvoir dans le plan de niveau en se courbant à droite ou à gauche selon la direction des lignes de force. Or, puisque nous avons supposé que le champ est homogène, le rayon va décrire une ligne ayant en tous ses points la même courbure; la trace du rayon sera donc un cercle qui passe par le point d'émission du rayon. Il est évident que la courbure de ce chemin circulaire doit croître avec l'intensité du champ et dépendre de la vitesse de propagation du rayon cathodique, de sorte que plus cette vitesse est

grande, plus le rayon de courbure l'est aussi. Supposons que l'action du champ soit telle que dans le même temps infiniment petit dt le rayon cathodique s'éloigne toujours d'une même quantité de la tangente correspondant au commencement du temps dt , il s'ensuit que les rayons des trajectoires circulaires doivent être proportionnels au carré de la vitesse avec laquelle se propagent les rayons cathodiques.

Considérons maintenant un rayon cathodique émis dans une direction qui fait avec les lignes de force un angle qui n'est pas droit. Décomposons la vitesse initiale en deux composantes: l'une parallèle aux lignes de force, et l'autre suivant une direction qui leur est perpendiculaire et qui par conséquent est située dans un plan de niveau. La projection du mouvement dans un plan de niveau étant un cercle, la trajectoire doit être une hélice dont l'axe coïncide avec la direction des lignes de force. Quand donc un point émet des rayons cathodiques, les rayons dont les directions initiales font des angles très petits avec les lignes de force se propageront le long de ces lignes qu'ils contourneront en hélice. De tels rayons peuvent donc parcourir un long chemin dans le sens des lignes de force avant que leur énergie soit absorbée par l'air. Quant aux rayons dont les directions initiales font de plus grands angles avec les lignes de force, ils se propageront aussi en hélice; mais puisque ces courbes sont appliquées sur la surface de cylindres ayant de grands diamètres, l'énergie de ces rayons est déjà absorbée dans les régions supérieures de l'air. Si notre supposition sur la relation entre la vitesse de propagation dans un plan de niveau et la courbure des rayons cathodiques émis dans ce plan est légitime, ce sont seulement les rayons dont la direction initiale coïncide sensiblement avec le sens des lignes de force qui se propageront le long de ces lignes.

Ces considérations sont justifiées par les belles expériences

de M. Hittorf¹⁾ sur l'action de l'aimant sur les rayons cathodiques (Glimmlicht). M. Hittorf s'est servi d'une cathode linéaire isolée dans toute sa longueur excepté à l'extrémité. Le tube de verre à air raréfié pour la production des rayons cathodiques était placé sur le pôle d'un électro-aimant. Quand l'axe de la cathode était parallèle à la surface polaire, les rayons cathodiques émis dans le sens de l'axe se courbaient, par une aimantation suffisamment forte, en un anneau circulaire dont le plan était perpendiculaire à la direction des lignes de force. De chaque côté de ce cercle les rayons divergents entouraient les lignes de force en spirales, de sorte qu'il se formait un cône lumineux dont les coupes transversales diminuaient vers le pôle à cause de l'accroissement de l'intensité du champ magnétique. Si la cathode était placée de la même manière par rapport aux lignes de force, mais entre deux pôles de même force et de noms contraires, l'anneau circulaire se formait aussi, mais les rayons divergents entouraient les lignes de force en hélices appliquées sur des surfaces cylindriques.

En plaçant le tube de sorte que l'axe de la cathode fût perpendiculaire à la surface polaire, si l'électro-aimant n'était pas aimanté, les rayons se propageaient en cône pour former sur la paroi du tube une tache phosphorescente circulaire et assez grande. En faisant circuler un courant dans les spires de l'électro-aimant, les rayons émis dans le sens des lignes de force conservaient leur direction, tandis que les rayons divergents se courbaient en spirale autour desdites lignes, et que le diamètre du cercle fluorescent diminuait. Une forte aimantation réduisait presque à un point le cercle fluorescent.

Quand donc des molécules électrisées négativement viennent dans les régions supérieures de l'atmosphère émettre un flux de rayons cathodiques, l'énergie de la plus grande partie de ces rayons est absorbée dans les couches les plus hautes de

¹⁾ Pogg. Ann. T. CXXXVI, pp. 213—222.

l'air. En se propageant en hélices appliquées sur des surfaces cylindriques de diamètres différents mais toujours assez grands, les trajectoires des rayons, qui sont émis des différents points de rayonnement, s'entrelacent et s'entre-croisent dans tous les sens pour former une toile ou un tissu de rayons dont l'absorption produit cette lumière blanchâtre et uniforme qui est connue sous le nom de «lueurs vagues sans forme bien définie».

Ce sont seulement les rayons lancés dans la direction des lignes de force ou qui font avec ces lignes des angles très petits, qui se détachent du tissu formé par les autres rayons pour se propager le long de ces lignes et produire le phénomène dit «rayon d'aurore boréale». Un tel rayon est donc, d'après notre hypothèse, composé d'un faisceau cylindrique de rayons cathodiques dont l'axe est formé par des rayons qui suivent exactement la direction de lignes de force du champ terrestre, tandis que les rayons cathodiques extérieurs se tordent autour des rayons centraux comme les torons autour de l'axe d'une corde.

La position presque verticale des lignes de force du champ terrestre dans les pays arctiques fait que les aurores boréales qui apparaissent dans ces contrées peuvent descendre jusqu'à des hauteurs peu considérables au-dessus du sol, tandis que, dans les latitudes basses où les lignes de force sont peu inclinées vers l'horizon, toute l'énergie des rayons auroraux est absorbée dans les hautes régions de l'atmosphère.

D'après notre hypothèse, l'apparence la plus générale sous laquelle se présente l'aurore doit donc être celle de «lueurs vagues sans forme bien définie». L'expérience montre aussi que cette forme d'aurore boréale apparaît en général sur une grande étendue du ciel et qu'elle accompagne toujours toutes les autres formes de l'aurore. Les arcs, les draperies et les bandes ne se projettent jamais sur un ciel parfaitement noir. Dans les latitudes basses une aurore boréale se présente en général

comme un arc lumineux bordant un segment obscur qui est situé vers le nord de l'horizon; mais au-dessus de ce bord lumineux on observe toujours une lueur blanchâtre qui s'efface vers le zénith, et qui persiste quand l'arc a cessé de darder ses rayons. Durant mon séjour au Groenland j'ai souvent remarqué une clarté particulière apparaissant pendant la nuit, en plein hiver et à des heures où l'influence du clair de lune était complètement écartée. Les nuits étaient tellement pleines de cette clarté qu'on distinguait de petits détails à des distances relativement considérables. Ainsi l'observateur voyait distinctement, sur une montagne distante d'environ 20 kilomètres, non seulement les endroits couverts de neige, mais encore ceux où il n'y en avait pas. La lueur en question formait un contraste frappant avec les ténèbres de la nuit telles qu'on les a sous de faibles latitudes. On sait en outre que de telles lueurs ont aussi été observées quelquefois dans les latitudes moyennes.

La lumière de l'aurore boréale étant essentiellement monochromatique, on peut par un spectroscopie convenablement construit constater la présence d'une lueur aurorale trop faible pour être observée à l'œil nu. On sait que, d'après les observations de M. Wright¹⁾, la ligne jaune-verdâtre de l'aurore boréale qu'on a trouvée dans le spectre de la lumière zodiacale est due à une lueur atmosphérique, et qu'on a souvent constaté à l'aide du spectroscopie que le ciel émet la lueur de l'aurore boréale même entre les tropiques. «On peut en effet», comme le remarque M. Vogel²⁾, «très souvent voir la ligne de l'aurore boréale sur presque tous les points du ciel.»

D'après notre hypothèse, c'est donc l'action du champ magnétique terrestre qui dispose l'aurore boréale sous forme de rayons, de draperies, de bandes et d'arcs. Si la terre n'était

¹⁾ A. W. Wright: Sur le spectre de la lumière zodiacale. The American Journal of science and arts. 3^e série, t. VIII, p. 39.

²⁾ Newcomb-Engelmanns populäre Astronomie; herausgegeben von Dr H. C. Vogel, p. 464.

pas entourée d'un champ magnétique, la lueur de l'aurore boréale, provenant d'une absorption de rayons dispersés, ne se montrerait que comme une illumination uniforme du ciel dont on aurait grand'peine à constater la structure rayonnante et qui dans un air humide nous serait plus ou moins cachée par le voile brumeux qu'elle produirait et à travers lequel l'aurore se présenterait sous forme de nuages lumineux.
