551.594

RMHnor

75C081813

NORDLYSOBSERVATORIET
TROMSØ

Hommage de l'Auteur

L'AURORE BORÉALE.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
11083 Quai des Grands-Augustins, 55.

NORDLYSOBSERVATORIET
TROMSØ

Tryckt hos F. Tilgmann, Helsingfors

L'AURORE BORÉALE.

ÉTUDE GÉNÉRALE

DES

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES

DE L'ATMOSPHÈRE;

PAR

M. LEMSTRÖM,
Professeur de Physique à l'Université d'Helsingfors.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1886
(Tous droits réservés.)

73:1

Universitetsbiblioteket
i Tromsø

551.594

TABLE ANALYTIQUE.

Pages

AUTEURS ET OUVRAGES CITÉS XI

AVANT-PROPOS XIII

INTRODUCTION 1

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

Apparence de l'aurore boréale.

1. *Aspect ordinaire de l'aurore boréale* 7

2. *Certaines formes particulières de lumières polaires des hautes régions arctiques* 11

Lueurs de l'aurore boréale autour des cimes des montagnes 11

Lueurs de l'aurore boréale près de la Terre 11

Expériences sur la nature des lueurs 14

3. *Apparitions des phénomènes particuliers de même origine que l'aurore boréale, en différents endroits de la Terre* 15

Lueurs de l'aurore boréale dans l'Amérique du Sud 15

Lueurs sur les Alpes, etc 16

Conclusions 17

CHAPITRE II.

Périodicité de l'aurore boréale.

1. *Périodicité séculaire* 18

Période de 11 et de 56 années 19

Périodicité des variations et perturbations magnétiques 22

Concordance entre les périodicités des aurores boréales, des variations magnétiques, des taches solaires, etc 23

2. *Périodes annuelles des aurores boréales* 26

3. *Période quotidienne de l'aurore boréale* 26

CHAPITRE III.

Étendue géographique de l'aurore boréale.

Pages.

1. *Exposé général* 28

2. *Zone maximum* 29

Limites de la zone maximum des isoclines et des isothermes 31

3. *Étendue géographique des orages* 32

4. *Observations de M. le Baron Ad. Nordenskiöld au détroit de Behring (1878-79)* 33

5. *Observations de M. Kleinsmidt à Godthaab en Groënland, 1864-80, calculées par M. S. Tromholt* 38

CHAPITRE IV.

Hauteur de l'aurore boréale au-dessus de la surface de la Terre.

1. *Méthodes et déterminations générales* 45

Remarques sur les méthodes 46

Mesures des différents savants 46

» françaises à Bossekop et Jupvig 47

» de Loomis en Amérique 47

» de Christie et Farquharson. Observations diverses 48

» danoises faites à Godthaab 50

2. *Discussions des méthodes employées* 53

L'aurore boréale est un espace lumineux 53

Première méthode 54

Cas différents des positions des observateurs par rapport à l'espace lumineux 54

Déterminations à Godthaab, à Sodankylà et à Bossekop 55

Deuxième méthode 57

Troisième méthode et déterminations de M. Nordenskiöld 58

Conclusions 59

CHAPITRE V.

Aperçu général sur le magnétisme terrestre.

1. *État magnétique actuel de la Terre* 60

Constantes magnétiques 60

Déclinaison 61

Inclinaison 63

Intensité 64

2. *Variations du magnétisme terrestre* 68

Variations séculaires 68

Variations annuelles et quotidiennes 69

Pages.

3. *Perturbations et tempêtes magnétiques* 70
Progrès apportés par l'Union magnétique de Göttingue 70
Tempêtes magnétiques..... 71
Résultats des recherches simultanées..... 73
Marche inverse des perturbations des deux côtés de la zone maximum. 73
Similitude entre les oscillations des périodes de l'aurore boréale et la marche inverse des tempêtes magnétiques 75
4. *Courants telluriques* 75
Méthodes et observations..... 75
Résultats de Lamont et d'Airy..... 75
Observations dans la Laponie finlandaise..... 77
Résultats de M. Wild..... 78
Observations de M. E. Blavier 82
Les courants telluriques sont la cause primaire des tempêtes magnétiques 83
5. *Théorie du magnétisme terrestre* 83
Diverses théories proposées..... 83
Théorie mathématique de Gauss..... 84
Magnétisme permanent ou courants galvaniques..... 85
Un seul système magnétique; conséquences de la théorie de Gauss... 86
Siège du magnétisme terrestre..... 87
La croûte terrestre et la couche magnétique..... 87
La couche magnétique aimantée par des courants provenant de la rotation de la Terre dans l'espace..... 88

CHAPITRE VI.

Effets et nature de l'aurore polaire.

1. *Effets sur les fils télégraphiques* 90
2. *Nature de la lumière produite par l'aurore boréale* 91
Analyse spectrale..... 91
Signification des raies du spectre de l'aurore boréale..... 94
Propriétés fluorescentes..... 94
3. *Illusions produites par les longs crépuscules et les lueurs polaires*... 95

DEUXIÈME PARTIE.

CHAPITRE VII.

Explication scientifique des aurores polaires.

1. *Historique des théories anciennes*..... 99
Opinions superstitieuses 99
Théorie de la réflexion 100
Théorie des poussières cosmiques 100
Théorie magnétique..... 103
Position de l'arc de l'aurore boréale 103

Pages.

2. *Théorie électrique de Peltier et de de La Rive* 105
Sur l'origine de la théorie électrique 105
Théorie de de la Rive 105
Points essentiels de la théorie, trois questions 107

CHAPITRE VIII.

Origine électrique de l'aurore boréale.

PREMIÈRE QUESTION.

Courants électriques produits par l'aurore boréale 108
Ressemblance de l'aurore avec la lumière électrique de l'air raréfié. 109
Preuves de l'analyse spectrale 109

CHAPITRE IX.

Électricité atmosphérique.

Existence de l'électricité atmosphérique et les lois qu'elle subit 111
Observations danoises à Godthaab 112

ORIGINE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. — DEUXIÈME QUESTION.

1. *L'induction unipolaire* 113
Phénomènes principaux. Explications de M. Edlund 113
Application de la théorie de M. Edlund 115
Conséquences 117
Production directe de l'électricité par l'induction unipolaire 117

2. *La vaporisation* 118
Historique 118
État actuel de la question suivant M. Tait 119
La vaporisation et l'induction unipolaire 121
La force produite par l'électricité négative de la Terre 121
Conclusions 122

CHAPITRE X.

Fréquence des aurores polaires autour des pôles de la Terre.

TROISIÈME QUESTION.

1. *L'opinion de de la Rive n'est pas satisfaisante* 124
2. *La Terre et l'atmosphère au point de vue de l'électricité* 125

PROPOSITIONS PRÉLIMINAIRES.

L'influence électrique 125
Phénomènes lumineux dans l'air raréfié des tubes de Geissler 127

Pages.
Expériences avec des tubes de Geissler 128
Appareil de l'aurore boréale 129
La Terre et l'atmosphère raréfiée, considérées comme conducteurs.. 131
Position mutuelle du conducteur atmosphérique et de la Terre..... 133
Distribution de l'électricité sur les deux conducteurs..... 135

CHAPITRE XI.

Les courants électriques de l'air.

LA REPRÉSENTATION EXPÉRIMENTALE DE L'AURORE BORÉALE. — EXPÉRIENCES DE L'EXPÉDITION FINLANDAISE POLAIRE.

1. *Les courants électriques de l'air étudiés avec l'appareil d'écoulement*.. 137
Réflexions sur les mesures de l'électricité atmosphérique..... 137
Expériences de 1871 et 1882 137
Expériences de 1883-84 138
Appareil d'écoulement..... 139
Méthode de mesure 139
Les appareils et les expériences de Kultala 140
Résultats 141
Étude sur l'électricité du voisinage de la Terre..... 142
2. *Étude des phénomènes de lumière produits par l'appareil d'écoulement*..... 144
Caractère météorologique de l'hiver 1883-84..... 144
Lumière en forme de lueur diffuse à Sodankylâ et à Kultala..... 145
Expériences avec la machine de Holtz 146
Résultats..... 147
Lumière en forme de rayons, le rayon sur le Piétarintunturi, le 29 décembre 1882..... 147

CHAPITRE XII.

Théorie actuelle de l'aurore polaire.

1. *Distribution de l'électricité atmosphérique*..... 150
Électricité des nuages..... 150
Électricité du conducteur atmosphérique..... 151
Courant qui produit l'aurore boréale..... 152
Causes qui exercent une influence sur la position mutuelle des conducteurs..... 154
2. *Concordance entre la théorie et les faits observés*..... 156
Causes des tempêtes magnétiques..... 156
Nature de la lumière de l'aurore boréale..... 156
La zone maximum des isothermes et des isoclines..... 157
Autres particularités..... 158
Résultats de l'analyse spectrale..... 158

Pages.

Double périodicité 160
Influence indirecte du Soleil 161
Périodes annuelles et journalières 162
Apparition simultanée de l'aurore aux deux pôles 162
Bruit de l'aurore boréale 163

Sur les recherches futures de l'aurore polaire 164

Notes I a XV ..... 166 à 179

PLANCHES.

Pages.

Planche I. — Aurore boréale observée le 18 octobre 1868, sur la côte septentrionale de la Norwège ..... *En frontispice.*

Planche II. — Aurore boréale observée le 19 novembre 1871, dans la Laponie finlandaise 9

Planche III. — Aurore boréale en forme de bande ondulante, observée au presbytère d'Enarc le 16 novembre 1871 10

Planche IV. — Lueur faible autour d'une cime de montagne au Spitzberg, 1868 12

Planche V. — Rayon d'aurore boréale, produit par l'apareil d'écoulement sur le Piétarintunturi près de Kultala le 29 décembre 1882 138

Planche VI. — Aurore boréale, en forme de draperie (Bossekop, le 21 janvier 1839 à 6^h du soir, dans le Nord-Est) 183

Planche VII. — Aurore boréale, en forme de draperie, avec une bande ondulante (Bossekop, le 30 décembre 1838, à $8^h 23^m$ du soir, dans le Nord-Ouest) 185

Planche VIII. — Aurore boréale, avec bande ondulante et rayons (Alaska, le 27 décembre 1868) 187

Planche IX. — Aurore boréale, avec arc incomplet et lueurs bizarres (3 mars 1879, à $9^h 50^m$ du soir. Voyage de la *Véga*) 189

Planche X. — Aurore boréale, avec deux arcs se croisant (5 mars 1879, à $1^h 25^m$ du matin. Voyage de la *Véga*) 191

Planche XI. — Aurore polaire avec nœuds de lumière, arc incomplet et rayons (Paris, le 5 février 1872) 193

Planche XII. — Aurore australe, avec arc large et traces d'arcs multiples [Melbourne (Australie), le 2 septembre 1850, à $10^h 26^m$ du soir] 195

Planche XIII. — Aurore boréale, avec lueurs bizarres [février 1874. Expédition Tegethof (Weyprecht et Prayer)] 197

Planche XIV. — Apparences successives de l'aurore boréale (Bossekop, 12 janvier 1839, de 1^h à $5^h 30^m$ du soir, et à $6^h 15^m$, $6^h 30^m$, 7^h, $7^h 20^m$) ... 199

AUTEURS ET OUVRAGES CITÉS.

(1) Dellmann, *Zeitschr. für Math. und Phys.*, 6ter Jahrg., 1861.

(2) Saussure, *Arch. des Sc. phys. et nat. de Genève*, t. XXXI.

(3) Roller, *Comptes rendus*, 1872.

(4, 4_b, 4_c) Fritz, *Das Polarlicht*. Leipzig, Brockhaus, 1881.

(5) Fritz, *Die Beziehungen der Sonnenflächen zu den magn. und meteorol. Erscheinungen der Erde.*

(6) Müller, *Die Kosmische Physik.*

(7) Loomis, *The Aurora borealis. Reports of Smiths. Inst.*, 1865.

(7) Köppen, *Nature*, 1874, p. 184-185.

(7) Meldrum, *Nature*, VI, 1872, p. 357-358.

(8) Lemström, *Finsk Tidskrift* (Journal finnois.)

(9) Nordenskiöld (A.-E. Baron de), *Sur les aurores boréales au détroit de Behring*, 1878-79. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, 1884.) Traduit par M. de Saporta.

(10) Tromholt (S.), *Sur les périodes de l'aurore boréale*. Copenhague, 1882. Hamberg et Cº.

(11) Bergmann (T.), *Opuscula*, vol. I. (*Sv. Vet. Akad. Handl.*, Band 26).

(12) Gaimard (P.), *Voyages en Scandinavie de* 1838-1839-1840. *Aurores boréales*, Lottin, Bravais Liljehöök et Siljeström.

(13) Weyprecht, *Die Nordlicht-Beob. der Austr. Ung. arct. Exp.* Wien, 1878.

(14) Wijkander, *Öfversigt of Sv. Vet. Akad. Förhandl.*, 1874.

(15) Fritz, *Bulletin de la Commission int. pol.*, 1882.

(16) Paulsen, *Résumé de l'exp. pol. danoise*. Copenhague, 1884.

(17) Erman et Petersan, *Grundlagen der Gaussischen Theorie und die Erscheinungen des Erdmagnetismus im Jahr* 1829. Berlin, 1874.

(18) Raulin, *Études sur le magnétisme terrestre*. Paris, 1867.

(19) Wijkander, *Observations magnétiques* (*Sv. Vet. Akad. Handl.*, Band 13, nº 15, et Band 14, nº 15).

(20) Wijkander, *Observations météorologiques* (*ibid.*, Band 12, nº 7.)

(21) Wild (H.), *Magnetische Ungewitter* (*Mém. de l'Académie des Sc. de Saint-Pétersbourg*, 1882).

(22) Lamont, *Der Erdstrom*. Leipzig, 1862.

(23) Airy (G.-B.), *Phil. Trans.*, 1868, vol. 158, p. II.

(24) Wild (H.), *Mélanges phys. et Chim.* Saint-Pétersbourg, 1883.

(25) Blavier (E.-E.), *Études des courants telluriques.*

(25) Chambers, *Phil. Trans.*, 1863, p. 503.

(26) Rand Capron, *Auroræ and their spectra.* London, 1879.

(27) Vogel, *Pogg. Ann.*, CXLVI, 1872, n° 8, p. 569.

(28) Mairan, *Traité de l'aurore boréale,* 1733-54.

(28) Groenemann, *Astron-Nachr.*, 1874.

(30) De la Rive, *Archives de Genève,* 1862.

(31) Edlund (E.), *Recherches sur l'induction unipolaire, l'électricité atmosphérique et l'aurore boréale* (*Actes de l'Acad. des Sc. de Suède,* t. XVI, n° 1; 1878.)

(32) Edlund (E.), *Sur la grandeur de l'induction unipolaire* (*ibid.*, t. XX, n° 7).

(33) Tait, *Nature*, march 27; 1884.

(34) Blake (L.-G.), *Ann. der Phys. und Chemie,* Band 19 (255), 1883, p. 319.

(36) Palmieri, *Rendic. di Nap.*, 1862, p. 58. *Ann. Vesuv.*, III, p. 69.

AVANT-PROPOS.

Le plan de cet Ouvrage et les motifs de sa publication sont exposés dans l'Introduction.

Les Planches en couleurs sont faites, en plus grande partie, aux frais de l'Université d'Helsingfors. D'après l'indication et les croquis de l'auteur, elles ont été dessinées en partie par l'artiste norvégien Collet et en partie par le peintre finlandais Maexmontan, et exécutées en chromolithographie dans les ateliers de M. F. Tilgman, à Helsingfors.

Il est impossible de reproduire exactement un phénomène si mobile et de couleurs aussi éclatantes; mais, si l'on ne peut atteindre à une ressemblance parfaite, on peut, tout au moins, essayer d'en faire un dessin qui donne une idée nette du phénomène, tel qu'il se présente en réalité.

En reproduisant le texte en langue française, l'auteur a été aidé par M. Maunoir, secrétaire général de la Société de Géographie, et par M. A. Sandoz : il considère comme un devoir bien cher de leur exprimer ici sa plus vive reconnaissance.

Nous sommes heureux de pouvoir reproduire à la fin de cet Ouvrage neuf dessins d'aurores boréales, qui ont été gravés d'après les documents fournis par M. Angot, météorologiste titulaire au Bureau central météorologique de France.

L'AURORE BORÉALE.

ÉTUDE GÉNÉRALE DES PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES DE L'ATMOSPHÈRE.

INTRODUCTION.

Le développement rapide que les sciences physiques ont pris de nos jours nous permet de saisir et de mieux comprendre les phénomènes complexes qui prennent naissance dans l'atmosphère, cet immense océan aérien qui environne notre globe.

La Science rattache ces phénomènes par leurs principaux caractères à ceux du même ordre dont elle connaît déjà les lois, et parvient ainsi à en donner une explication.

Parfois même, un tel rapprochement jette sur l'ensemble de ces phénomènes des clartés nouvelles qui font mieux ressortir les rapports entre les forces de la nature et leurs effets. C'est ce qui a lieu pour l'aurore boréale, comme un phénomène de l'électricité atmosphérique.

Dès 1752, l'illustre B. Franklin, ayant, à l'aide d'un cerf-volant, fait jaillir une étincelle électrique d'une nuée d'orage, personne ne doutait plus que l'éclair ne fût une immense décharge électrique entre deux nuages ou une décharge d'un nuage au sol. L'étincelle de Franklin fut donc, dans la double acception du terme, un trait de lumière.

L'idée qui guidait Franklin n'était pourtant pas nouvelle. Déjà en 1735 l'abbé Nollet, savant français, avait exprimé cette opinion que l'éclair n'était qu'une étincelle électrique, et il est bien probable que cette idée date de l'époque à laquelle le célèbre bourg-

mestre de Magdebourg, Otto de Guéricke, faisait pour la première fois jaillir une étincelle d'une machine électrique.

La gloire de Franklin n'en existe pas moins, car l'histoire de la Science nous montre que plusieurs penseurs ont parfois la même idée; l'honneur de la découverte appartient à celui qui sait démontrer que l'idée renferme une vérité incontestable.

Pour apprécier toute l'importance de la découverte de Franklin, il faut se rappeler comment avant cette époque l'homme envisageait l'orage et l'éclair.

Effrayé, il contemplait avec stupéfaction le phénomène incompréhensible qui se produisait à ses yeux; il n'y voyait qu'un signe de la colère des puissances surnaturelles ou un secret de la nature, secret d'autant plus terrible qu'il en ignorait absolument les causes et les lois.

La découverte de Franklin changea immédiatement cette manière de voir. Au point de vue scientifique, l'important phénomène a perdu tout ce qu'il avait de surnaturel et d'énigmatique. L'étude en fit, pour ainsi dire, la propriété de l'homme, et chez lui s'éveilla le désir d'approfondir les lois qui présidaient à cette convulsion et de la comparer à d'autres phénomènes déjà connus.

Que de préjugés furent alors détruits et quels pas de géant fit l'esprit humain pour secouer les entraves dont l'avait chargé son ignorance des lois de la nature!

L'aurore boréale, phénomène plus difficile à comprendre, exigeant des connaissances scientifiques plus étendues, est restée presque inexpliquée jusqu'à nos jours. Le phénomène énigmatique frappait vivement l'imagination et, comme il était arrivé pour le tonnerre, on y vit longtemps un fait surnaturel et souvent même un pronostic d'événements graves et néfastes.

Qui n'a entendu parler de ces armées que l'antiquité croyait voir s'entre-choquer dans l'air? Il est bien certain que ces visions fantastiques n'étaient que les phases diverses de l'aurore boréale.

Un grand nombre d'hypothèses ont été proposées pour expliquer ce météore; nous en pourrions citer plusieurs, toutes plus inadmissibles les unes que les autres. Nous en parlerons plus loin.

Malgré tout, ces vaines tentatives montrent jusqu'à quel point l'esprit humain peut s'égarer quand il n'est pas guidé par l'expérience.

Il n'est de doute pour personne aujourd'hui que l'aurore boréale n'ait la même origine que l'éclair.

Tous les deux proviennent des mouvements de l'électricité dans l'atmosphère : celle-là résulte des mouvements lents, celui-ci des mouvements violents.

Le tonnerre et les éclairs nous prouvent qu'il y a des phénomènes électriques dans l'air et, par une recherche minutieuse, nous savons que l'électricité agit perpétuellement dans les couches d'air voisines de la Terre. Toutefois nous aurions pu longtemps ignorer les phénomènes électriques des régions supérieures de l'atmosphère, si l'aurore boréale ne nous en avait pas démontré l'existence.

La conséquence en sera une théorie qui, établie sur les bases solides d'une expérience, nous donnera l'explication certaine de l'un des phénomènes les plus intéressants de la Météorologie.

L'aurore boréale tient donc une place importante dans les phénomènes électriques de l'atmosphère et joue probablement un grand rôle dans l'économie de la nature.

Mais si le tonnerre et l'aurore boréale appartiennent à la même famille, comment se fait-il que leurs manifestations soient si différentes?

On a dit avec raison que la nature ne marchait pas par sauts. Cette maxime se trouve ici bien justifiée, car entre l'éclair et l'aurore boréale il existe un intermédiaire appelé l'*éclair de second ordre* ou *éclair de chaleur,* provenant d'un mouvement électrique plus lent que celui de l'éclair, mais plus rapide que celui de la lumière polaire.

Tout le monde a pu observer pendant l'automne ces lueurs subites, d'un violet rougeâtre, qui illuminent le ciel, disparaissent avec rapidité et ne sont pas accompagnées de tonnerre. Au nord, on voit parfois des éclairs étendus sans entendre le tonnerre. Ces sortes d'éclairs sont justement l'intermédiaire dont nous venons de parler.

Nous avons donc dans l'atmosphère trois espèces de mouvements de l'électricité :

L'*éclair du tonnerre,*
L'*éclair de chaleur*,
L'*aurore boréale.*

Dans l'ensemble de ces phénomènes, le magnétisme terrestre occupe une place importante, bien qu'il soit d'une tout autre nature que l'électricité atmosphérique. L'influence importante qu'il exerce sur les phénomènes traités dans ce Mémoire nous obligera à en donner un exposé dans un Chapitre spécial.

Le but de ce Travail est de traiter aussi clairement et aussi complètement que possible ce que, dans l'état actuel de la Science, nous savons sur l'aurore boréale.

Nous montrerons les rapports qui les lient aux phénomènes connus, afin que l'étude en soit accessible au plus grand nombre de lecteurs.

Pour appeler l'attention sur cet Ouvrage, nous croyons devoir indiquer les motifs qui nous l'ont fait écrire.

L'auteur de ce Mémoire, préoccupé dès longtemps de ce phénomène énigmatique, fréquent dans son pays (la Finlande), eut la bonne fortune de faire partie de l'expédition polaire suédoise, accomplie en 1868 sous la direction du célèbre baron Ad. Nordenskiöld, sur le navire commandé par le baron de Otter, qui plus tard devint ministre de la marine en Suède. Les résultats de cette expédition sont connus et furent si remarqués que la Société de Géographie de Paris décerna à M. Nordenskiöld sa médaille d'or en 1869, et que la Société royale géographique de Londres, en 1870, lui accordait aussi une médaille.

Pendant cette expédition, l'auteur, dont la mission était d'étudier le magnétisme terrestre, fit sur l'aurore boréale plusieurs observations de nature à modifier beaucoup l'opinion qu'il en avait eue jusqu'alors. Ses observations, publiées en français dans les *Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève* (1870), attirèrent l'attention du regretté A. de la Rive.

L'intérêt bienveillant dont le savant genevois honora cette Notice était pour l'auteur le meilleur des encouragements pour continuer ses recherches.

Aux frais de la Société des Sciences de Finlande, l'auteur put visiter, en 1871, la Laponie finlandaise où il séjourna six semaines; il put non seulement répéter les observations précédentes, mais en faire de nouvelles. Tous ses résultats furent confirmés et des faits nouveaux furent apportés par d'autres observateurs, pendant l'expédition suédoise qui passa l'hiver de 1872-73 dans les régions polaires.

NORDLYSOBSERVATORIET
TROMSØ

Cherchant à réaliser un appareil qui pût produire artificiellement l'aurore boréale, l'auteur observa qu'on pouvait obtenir des phénomènes lumineux continus dans un tube de Geissler placé dans le voisinage d'une machine électrique en activité (1).

Partant de ce fait, il construisit, après une série de recherches (2), en 1871, un appareil pour la reproduction expérimentale de la lumière polaire, qui, sous le nom d'*appareil de l'aurore boréale,* sera décrit plus tard.

Vers le milieu de 1870, après le retour du voyage aventureux, mais glorieux, de l'expédition autrichienne, M. Weyprecht, encouragé par la générosité du célèbre comte Wilczeck, proposa une entreprise internationale dont le but était de faire des recherches physiques simultanées dans les régions polaires.

On sait que cette entreprise, qui honore l'humanité, fut exécutée en 1882-83. Partout elle trouva de vives sympathies et les résultats des travaux des différentes stations seront bientôt publiés.

Parmi les onze États participants se trouvait aussi la Finlande, qui établit une station dans la Laponie finlandaise à Sodankylä.

L'auteur, choisi par la Société des Sciences de Finlande, pour diriger les travaux de cette station, eut l'occasion de continuer ses recherches sur l'aurore boréale. Par ces expériences, la question de la nature de l'aurore boréale a été transportée du domaine de l'hypothèse à celui de la réalité.

Au lieu de conjectures plus ou moins probables, on a maintenant des faits scientifiques incontestables.

Des Notes placées à la fin de ce Mémoire traiteront quelques points essentiels d'une manière plus développée et seront suivies d'une liste des auteurs auxquels nous avons eu recours.

---

(1) Le tube de Geissler est un tube de verre traversé aux deux extrémités par des fils de platine et dans l'intérieur duquel on a raréfié l'air.

(2) Les résultats ont été publiés dans les *Archives des Sciences physiques et naturelles* (1875-76).

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

APPARENCE DE L'AURORE BORÉALE.

Aspect ordinaire de l'aurore boréale.

La plupart de nos lecteurs ont probablement vu la lumière polaire. Elle commence presque toujours comme un arc de lumière d'une blancheur jaunâtre, dont le point le plus élevé est situé assez souvent dans le méridien magnétique, c'est-à-dire dans la direction indiquée par la boussole. Dans les contrées méridionales, l'Europe centrale, par exemple, le phénomène ne présente ordinairement que cet aspect; parfois aussi, il se développe d'une manière splendide. Des rayons aux couleurs vives et variées paraissent subitement émerger de l'arc et former, en passant un peu au-dessus du zénith, une figure assez semblable à une couronne régulière nommée *corona borealis*. Cette forme de l'aurore boréale peut être considérée comme celle qui se reproduit sur tous les points de la Terre. Les rayons peuvent varier beaucoup en couleur et en disposition, mais le plus souvent ils se déploient en bandes longues et étroites dont la partie inférieure est jaunâtre, passant vers le milieu presque au vert, puis change plus haut en rouge et violet. L'extrémité supérieure des rayons se termine souvent en larges flammes rouges. La couronne est d'ordinaire d'un rouge de sang, mais ses nuances varient parfois.

Dans les contrées polaires, où l'aurore boréale brille, pour ainsi dire, chaque nuit pendant l'hiver, ses formes sont très variables. Toutes les relations des voyages polaires donnent des descriptions

du phénomène; nous pourrions donc facilement en citer plusieurs. Mais, ne voulant pas nous attarder à des descriptions de ces formes variées qui, en général, ont peu d'importance pour l'explication du phénomène, nous nous bornerons à faire connaître les formes et les qualités essentielles et surtout à signaler les cas qui présentent un intérêt scientifique spécial.

Pour atteindre ce but, nous choisirons quelques-unes des aurores boréales que nous avons observées nous-même pendant nos voyages dans le Nord. D'ailleurs, ces observations sont si nombreuses, qu'elles renferment presque toutes les formes essentielles du phénomène.

Le 15 octobre 1868, le bateau à vapeur suédois *Sophia,* revenant du Spitzberg, se trouvait devant l'île déserte Beeren Eiland. Un vent d'est terrible, une vraie tempête, soulevait la mer dont les vagues immenses, se brisant contre un banc sous-marin, venaient par intervalles inonder le pont du navire, en y laissant des couches d'eau immédiatement glacées.

La mer agitée présentait un spectacle admirable pendant le court crépuscule qui, dans l'automne de ces contrées, remplace le jour. Mais la scène prit un caractère encore plus imposant pendant la nuit éclairée par les lueurs vacillantes et mystérieuses de l'aurore boréale. Un peu avant minuit, un nuage noir se leva à l'horizon, en s'étendant sur un ciel bleu foncé où brillaient les étoiles couvertes çà et là d'un léger voile. Le nuage étant environ à 60° au-dessus de l'horizon, ses bords commencèrent à s'éclairer d'une lueur jaunâtre, et bientôt il en jaillit des jets lumineux d'un violet rougeâtre irisés de nuances jaunes et vertes. Près du zénith, les rayons formèrent une admirable *corona borealis* qui malheureusement disparut presque aussitôt. Durant le phénomène, une lueur magique éclaira tout à coup la mer, et nous pûmes un instant apercevoir les vagues mugissantes dont les sommets argentés d'écume se heurtaient contre le navire avec un bruit étourdissant, accompagné d'un chant formidable produit par la tempête dans les cordages du navire.

Aussitôt après, la lumière disparut et l'obscurité nous enveloppa plus profonde et plus sinistre qu'auparavant.

Enfin le 18 octobre, après une lutte violente, le navire s'approchait des côtes de la Norvège par un vent qui devint contraire au

Tryckt hos F. Tilgmann, Helsingfors.

dernier moment. A l'ouest de l'horizon, nous remarquâmes alors deux couches de nuages que séparait nettement une bande bleue du ciel croisée par une bande striée d'un jaune pâle. C'était le faible commencement d'une aurore boréale dont la splendeur devait bientôt surpasser tous les phénomènes du même genre que nous eussions observés jusqu'alors pendant le voyage. Les bords de la couche supérieure des nuages s'éclairèrent peu à peu, et bientôt nous en vîmes sortir des flammes isolées qui parfois montaient jusqu'au zénith. Subitement le phénomène embrassa tout l'horizon. Partout des flammes, partout des jets d'éclatante lumière, jaunes dans le bas, verts au milieu et rouge violet à l'extrémité supérieure. En un instant tous les rayons se réunirent en une couronne régulière et éblouissante qui se dessina sur le ciel au sud du zénith. Quand le phénomène fut arrivé à son maximum d'intensité, il nous fit l'effet de la voûte immense d'un temple au milieu de laquelle brillerait un lustre splendide. L'apparition ne dura que quelques minutes, mais, en s'effaçant, elle laissa encore après elle une zone lumineuse entre les couches de nuages. De la couche supérieure continuèrent à s'élancer, à de courts intervalles, des rayons isolés qui montaient jusqu'au zénith et y formaient les fragments d'une couronne. Les bords des couches des nuages restèrent lumineux alors même que les rayons eurent disparu.

La *Pl. I* donne une faible idée du phénomène dans sa plus grande splendeur. Cette figure ne reproduit que la demi-partie de l'horizon, c'est à l'imagination du lecteur d'ajouter ce qui manque.

Nous venons de décrire la forme la plus complète de l'aurore boréale, nous devons insister sur certains détails. La figure représente le nord de l'horizon; tout en bas, le ciel a pris une teinte plus foncée que d'habitude. Quand la lumière polaire a son aspect le plus ordinaire, cette partie du ciel est sombre. Elle est nommée la *bande foncée,* et résulte probablement du contraste des parties éclairées du firmament. La figure rend aussi la *base* d'un jaune pâle, et les *rayons* ou *bandes* comme on les appelle.

Les rayons paraissent çà et là séparés par de petites raies, qui parfois s'élargissent tant qu'elles deviennent elles-mêmes de vrais rayons naissant des contrastes, et nommés les *rayons foncés*. La figure ne donne que la moitié de la couronne, qui est très régulière et d'une couleur rouge de sang; le milieu est formé par une tache

rouge entourée d'un ruban jaunâtre. Les rayons latéraux, surtout ceux des bords de la couronne, étaient en réalité plus nombreux que ne l'indique la figure, mais la forme et la couleur en sont assez exactes.

La *Pl. II* représente une aurore boréale radieuse, observée le 19 novembre 1871, dans la Laponie finlandaise. Au début, et à 30° au-dessus de l'horizon, elle formait un arc d'où s'élevaient des jets de lumière.

Peu à peu l'arc s'éleva aussi. La figure reproduit le phénomène au moment où il avait atteint environ 60° au-dessus de l'horizon. Le ciel d'un bleu foncé était clair et parsemé d'étoiles. La base de l'aurore boréale était jaune et les rayons qui en sortaient étaient obliques, très brillants, mais d'une étendue très limitée. Les couleurs de la lumière polaire sont en général claires et vives quand l'atmosphère est pure, mais jamais elles n'avaient offert de plus splendides nuances.

Au bout de quelques minutes, l'aspect du phénomène changea, les rayons s'allongèrent et, aussitôt qu'ils eurent atteint le zénith, nous observâmes une belle couronne très régulière, quoique les rayons qui la composaient n'occupassent qu'une petite partie du firmament.

Dans les formes de l'aurore que nous avons déjà décrites, les rayons sont une partie importante du phénomène, bien qu'ils ne durent pas autant que l'arc jaunâtre dont ils se détachent. Dans les régions polaires, l'aurore boréale se présente assez souvent sous la forme d'une bande ondoyante semblable à un long voile étendu sur le firmament dans la direction de l'est à l'ouest; de temps en temps on voit cette bande avec quelques rayons partant de la courbure, ce qui fait supposer que ces bandes servent quelquefois de base à des jets de lumière.

Cette sorte d'aurore boréale commence presque toujours à l'horizon et s'approche du zénith avec des mouvements ondulés. Aussitôt qu'elle a dépassé cette limite, elle pâlit et disparaît lentement.

La *Pl. III* représente une aurore boréale de forme bizarre observée au presbytère d'Enare, le 16 novembre 1871. Cette fois, le phénomène a pris la forme d'un voile rouge replié en boucle dont la convexité se trouvait au zénith, tandis que les deux extré-

Lemström.
L'Aurore Boréale

p. 11.

64
62
60
58
25
20
15
10
5
360-5
360-15
360

mités du voile, tirant légèrement sur le jaune et le vert, ondoyaient vers l'est et l'ouest.

Une autre forme de la lumière polaire s'observe parfois dans les pays du nord. Le phénomène se montre au-dessous d'un nuage et ne peut être comparé qu'à une large draperie, qui en tomberait en plis souples, ondoyants en spirales assez régulières.

Quand l'aurore boréale se présente ainsi, ses parties supérieures sont probablement cachées par le nuage, parce qu'on peut voir aussi de telles *formes* avec des rayons ordinaires au-dessus.

Certaines formes particulières de lumières polaires des hautes contrées arctiques.

Lueurs de l'aurore boréale autour des cimes des montagnes. — Les aurores boréales que nous venons de décrire sont celles dont la splendeur et l'immense développement font la plus vive impression sur l'observateur. Mais les contrées polaires offrent aussi d'autres phénomènes de même origine qui, par leurs caractères singuliers, sont d'un grand intérêt pour la Science.

On voit de temps en temps, pendant l'automne, quand le ciel est sombre, des nuages aux bords lumineux. La lumière, souvent très intense, est d'un jaune blanchâtre et n'éclaire d'ordinaire que la couche supérieure des nuages. Parfois, elle fait l'effet d'une bande rayée jetée entre deux nuages.

La *Pl. IV* reproduit un phénomène très fréquent au Spitzberg et dans les contrées alpestres de la Laponie. Quand le temps est brumeux, on observe parfois, autour du sommet des montagnes, une lumière blanche et diffuse qui s'élève dans l'air brumeux et entoure le point culminant du sommet. Il serait impossible de dire à l'œil nu d'où provient cette lumière, mais, à l'aide du spectroscope, on arrive à reconnaître qu'elle est de la même nature que l'aurore boréale. Quelquefois cet éclairement prend la forme de flammes, d'une intensité très faible, qui, à de courts intervalles, s'élèvent du sommet de la montagne et peu à peu disparaissent dans l'air.

Lueurs de l'aurore boréale près de la Terre. — Dans la Laponie, nous vîmes, par un soir nébuleux, des flammes faibles flotter

tout autour d'un pic de montagne, et le spectroscope nous révéla qu'elles étaient du genre de l'aurore polaire. Un jour même, en dirigeant notre spectroscope autour de la place choisie pour nos observations, nous observâmes la raie spectrale de l'aurore polaire sur le toit d'une maison voisine, sur la neige dont la terre était couverte, sur la glace d'un lac, etc.

Pendant l'année 1882-1883 (époque des recherches polaires), les membres de l'expédition finlandaise eurent plusieurs fois l'occasion d'observer ces singuliers phénomènes lumineux.

L'aurore polaire se montrait à Sodankylâ souvent d'une intensité très grande, mais elle n'offrait pourtant pas beaucoup de variation. Elle commençait ordinairement par un arc faible au nord, qui se développait bientôt en *arc avec rayons* et quelquefois en draperies tendues de l'est à l'ouest, le plus souvent en se tournant un peu vers le nord. Les couleurs dans ces aurores, en forme de draperies, ne variaient pas beaucoup, de sorte qu'on observait généralement la raie jaune verdâtre dans le spectroscope. Le plus souvent elles avaient une couleur jaune blanchâtre avec une légère nuance verdâtre.

Mais ce qui fut plus intéressant, c'est qu'on pouvait observer, en *plusieurs occasions,* et dans toutes les directions, la raie caractéristique de l'aurore polaire ($\lambda = 5569$) sans que le phénomène même se montrât.

Puisque cette raie se produisait alors même que la terre n'était pas couverte de neige, il ne peut pas être question ici de réflexion, mais le fait est que les observations se faisaient au milieu d'un orage d'aurore polaire, qui était si faible qu'il ne se montrait pas en aurore perceptible. C'était donc le même phénomène qui fut observé à Enare, en 1871, et qui a été décrit plus haut.

Ces observations étaient presque toujours faites par M. Biese, qui découvrit aussi une autre singularité. Dans la direction sud-est de la station, il obtenait souvent la raie jaune dans un mince ruban de ciel près de l'horizon, quoiqu'il ne vît aucune aurore polaire. J'eus l'occasion de vérifier cette observation qui était souvent difficile à faire parce que l'œil devait être à l'abri de toute lumière étrangère pendant plusieurs minutes, avant qu'on pût découvrir cette raie. Dans la même direction se trouvaient quelques sommets assez élevés (300^{m}), à une distance d'environ 20^{km} à 30^{km}, et il est

Tryckt hos F. Tilgmann, Helsingfors.

probable que la raie était produite par les flammes dont nous avons parlé et que l'on voit quelquefois autour des sommets de la Laponie et au Spitzberg.

On a quelquefois remarqué aux contrées polaires, pendant les nuits, une lumière extraordinaire; il est cependant assez difficile de se convaincre de son existence, surtout à cause de la longueur du crépuscule des contrées polaires; le jour baisse peu à peu durant quelques heures, et rend peu sensible le passage du jour à la nuit.

Cependant, si l'on a une fois remarqué la faible lumière dont il s'agit, il n'est plus possible de se tromper. Déjà, au mois d'octobre, j'aperçus cette lumière et j'attirai sur elle l'attention des observateurs. Je vais citer les notes que j'ai prises immédiatement après avoir observé le phénomène en question.

Le 9 décembre 1882.

« La nuit au nord montre assez souvent une singulière lumière phosphorescente, qui se produit sous des formes un peu différentes. C'est une lumière blanche tendant au jaune, et qui peut rendre la nuit aussi claire qu'elle l'est par une lune légèrement voilée de nuages.

» Voici l'origine et la marche de ce phénomène intéressant, tel que je l'ai observé surtout pendant les nuits du 6 et du 8 décembre, où il se montrait avec une grande intensité. Le 6 décembre, je traversais une forêt; lorsque le crépuscule eut entièrement disparu, il resta si peu de lumière qu'on ne put distinguer qu'à grand'peine les contours des objets, ce qui dura jusqu'à $7^h 30^m$. A $7^h 40^m$, tout changea assez subitement pour que les contours des objets se dessinassent dans une lumière blanche jaunâtre un peu nébuleuse et d'une intensité très variée. Je n'avais, à ce moment, aucune échelle pour en déterminer l'intensité. La lumière resta ainsi pendant quelques heures. Le 8 décembre, à 5^h de l'après-midi, nous vîmes une lueur jaune blanchâtre, d'intensité variable, entourant tout l'horizon; mais, vingt minutes après, la lueur avait augmenté considérablement en intensité. Elle se montra le plus fortement au nord d'où elle diminuait graduellement vers le sud; là, le phénomène avait la plus faible intensité. Tout près de l'horizon, on pouvait à peine distinguer les étoiles; plus haut, on les voyait un peu mieux et à partir de 60° vers le zénith, le ciel était clair, mais d'une couleur gris pâle.

La comparaison avec la lumière de la Voie lactée était très intéressante. En effet, la lumière jaunâtre tranchait nettement, surtout au point où la Voie lactée en sortait. Cette lumière dura jusqu'à 7^h, quand une aurore polaire assez intense se produisit et dura jusqu'à 9^h.

Ces phénomènes ne donnèrent pas toujours la raie ordinaire avec les instruments que nous avions à notre disposition, mais il est probable qu'on l'aurait vue si notre spectroscope n'avait pas été aussi absorbant. Ainsi, un spectroscope à quatre prismes ne donnait pas la raie, quand un autre à deux prismes la faisait voir distinctement. Il n'y a donc pas de raison de les considérer comme des phénomènes appartenant à l'aurore boréale.

Après l'expérience de l'année 1882-1883, on pouvait s'attendre aux mêmes phénomènes pendant l'année suivante 1883-1884; mais il en fut autrement. Cette dernière année fait exception à toutes les règles. Il est bien rare en Laponie d'avoir un hiver aussi doux que celui de 1883-1884. La pluie et la neige tombèrent en petites quantités, mais sans discontinuer, ce qui caractérisa cet hiver.

Dans ces circonstances, les phénomènes lumineux se montraient bien rarement. C'est seulement à ciel clair qu'on peut les étudier avec avantage, et encore faut-il que le clair de lune ne soit pas un obstacle; car, les phénomènes en question étant faibles, ils cessent d'être visibles.

Le nombre des aurores n'atteignait pas $\frac{1}{10}$ du nombre ordinaire pour la latitude, et, outre cela, le petit nombre qui se produisait, étaient, à trois exceptions près, assez faibles.

Pendant l'hiver 1882-1883, on pouvait sans aucune difficulté voyager en pleine nuit dans les forêts les plus épaisses, mais, l'hiver suivant, presque toutes les nuits furent enveloppées d'une obscurité complète.

Expériences sur la nature des lueurs. — Il y eut cependant quelques exceptions, mais bien rares. Au mois de novembre, il y avait quelques soirées claires ou du moins un peu éclairées. Nous en profitâmes pour étudier la lumière diffuse et pour voir avec certitude si elle provenait de la réflexion seule ou si elle était produite dans l'air.

Le 20 novembre, à 7^h du soir, le spectroscope montrait la

raie jaune bien vive dans toutes les directions, et surtout quand il était dirigé vers la neige. En visant une maison toute noire, on pouvait encore voir nettement cette raie, à dix pas et encore plus près si l'instrument était tourné vers une maison grisâtre. La distance n'était que de quelques centimètres lorsque le spectroscope était dirigé vers une voile de toile blanche. Il est évident que la réflexion se faisait reconnaître dans les deux derniers cas, mais il semble aussi évident que la couche d'air entre l'instrument et la maison noire donnait la lumière dans le premier cas.

Si la raie observée provenait de la lumière *réfléchie* par la neige, elle devait être beaucoup plus renforcée si la réflexion se faisait par un miroir, mais on n'a pu trouver une différence de l'intensité de la raie jaune en dirigeant la fente du spectroscope tour à tour vers la neige et vers un miroir placé sur elle.

Ces observations sont importantes pour la détermination de la hauteur de la lumière polaire au-dessus de la surface de la Terre. Nous y reviendrons quand nous donnerons des explications scientifiques.

Nous voulons encore citer un fait dont l'examen nous sera également utile.

Une aurore boréale commence par un arc d'une blancheur jaunâtre, d'où émergent de larges flammes et des raies plus ou moins étroites qui s'élèvent au-dessus du zénith. Ce phénomène peut se montrer dans un ciel sans nuages; mais, si la nuit est calme, on peut, le lendemain, voir des bandes nuageuses légèrement éclairées s'étendre dans la même direction que les flammes. Il est permis d'en conclure que la production de lumière a lieu à une hauteur voisine de la région des nuages, et qu'elle est suivie d'une condensation des vapeurs sous la forme liquide ou cristalline.

Apparition des phénomènes particuliers de même origine que l'aurore boréale en différents endroits de la Terre.

Lueurs de l'aurore boréale dans l'Amérique du Sud. — Les météores de même nature que la lumière polaire se produisent-ils ailleurs que dans les régions polaires? Cette question est d'un vif intérêt pour l'explication scientifique de l'aurore polaire et nous pensons qu'on y peut répondre affirmativement. On les observe

dans d'autres contrées de la Terre, seulement ils y sont aussi rares que l'aurore boréale même.

Parmi le grand nombre d'exemples qui sont à notre disposition, nous allons citer quelques observations faites par les hommes les plus dignes de confiance.

Au Pérou, en Bolivie et au Chili, on voit souvent les sommets des montagnes éclairés par une lueur brillante. Les savants ont comparé à l'éclair de chaleur cette lumière qui se produit surtout pendant l'été. Elle commence dès que le Soleil est couché et dure jusqu'à minuit. Le phénomène se manifeste parfois jusqu'à quelques degrés au-dessus de l'horizon. C'est surtout pendant les nuits d'été qu'il apparaît d'une manière distincte, mais il ne se voit pas chaque nuit. Parfois il disparaît pour reparaître quelques minutes plus tard avec un nouvel éclat (1). Nous n'avons pas de preuves incontestables que cet éclairement ait les mêmes causes que la lumière polaire ; toutefois, nous n'hésitons pas à l'admettre. En cela, nous sommes d'accord avec plusieurs explorateurs qui ont pu l'observer et qui l'attribuent à un mouvement électrique lent, c'est-à-dire à la même cause que l'aurore boréale.

D'autres faits justifient, d'ailleurs, cette manière de voir. Dans le désert d'Atacama, situé en partie dans le Chili, en partie dans la Bolivie, par exemple, les orages sont très rares, mais l'électricité dans l'air a une telle intensité que les voyageurs en souffrent, et que souvent même on voit des jets de lumière sortir du bout des oreilles des bêtes de somme.

Les voyageurs eux-mêmes sont sujets à cet étrange phénomène. L'air est tellement sec que l'évaporation devient très grande et excessivement difficile à supporter. Mais cette sécheresse, désagréable pour celui qui parcourt la contrée, est très favorable aux phénomènes électriques.

Lueurs sur les Alpes. — On a souvent fait des observations semblables dans les Alpes de la Suisse. On cite plusieurs personnes, entre autres le célèbre de Saussure (2), qui se sont trouvées au milieu de pareils phénomènes électriques. De Saussure a vu l'électricité s'échapper par toutes les saillies des objets, et les voyageurs ont ressenti le picotement étrange que produit l'étincelle électrique quand elle jaillit d'un corps électrisé. Les mêmes obser-

vations ont été faites sur les plateaux élevés du Mexique et ailleurs. Mais c'est particulièrement dans les pays polaires que ces phénomènes sont fréquents. Nous en citerons encore deux exemples :

Un explorateur bien connu dans la Scandinavie, M. Malm, de Gothenbourg, fit en 1842 un voyage dans les parties septentrionales de la Laponie et du Finmark. Des circonstances imprévues le forcèrent à passer la nuit du 16 mars dans les Alpes laponnes, par un froid de 45°. Pendant cette nuit, il vit de larges rayons s'élever subitement du plateau de la montagne voisine. Le phénomène se passa si près de l'observateur qu'il se trouva positivement entre lui et la montagne. Au même moment, on entendait d'une manière très distincte un bruissement sonore dans l'air.

Nous nous rappelons l'attention générale qu'éveilla l'observation faite par M. Rolin, l'aéronaute dont le ballon, parti de Paris pendant le siège, vint tomber à Lide, en Norwège, à 1300^{m} au-dessus de la mer. M. Rolin s'exprime en ces termes :

« Par un brouillard léger, nous vîmes les rayons brillants d'une lumière polaire jetant une lueur magnifique sur tous les objets voisins. Bientôt nous entendîmes aussi un bruissement sonore, et une odeur très forte, presque suffocante, de soufre, se répandit dans l'air (3). »

Citons encore que le célèbre Brewster observa, pendant une aurore boréale, une lueur sur la tour d'une église; que le roi de Suède Oscar II fut témoin dans sa jeunesse, lors de son voyage dans les régions arctiques, du même phénomène sur les sommets des mâts alors qu'une aurore boréale régnait tout autour; enfin que des phénomènes semblables ont été vus sur les ponts des vaisseaux *Webfort* et *Southern Cross* aux environs du cap Horn, durant la splendide aurore australe du 1er septembre 1859.

Conclusions. — Il résulte de ces observations :

1° Que dans toutes les contrées il se produit des phénomènes semblables par leur nature aux lumières polaires;

2° Qu'ils sont plus ou moins fréquents suivant les contrées;

3° Que ces phénomènes se présentent de temps en temps près de la Terre et quelquefois à une centaine de mètres.

CHAPITRE II.

PÉRIODICITÉ DE L'AURORE BORÉALE.

Périodicité séculaire.

Période de onze et de cinquante-six années. — En général, la lumière polaire peut se produire à toute heure et en toute saison, seulement le nombre et l'intensité des apparitions varient suivant les heures et les époques. Toutes les années ne sont pas non plus également riches en aurores boréales, et il règne à cet égard de grandes différences. On a constaté que les aurores boréales subissent des fluctuations périodiques. Bien que nous ne possédions pas pour toute la Terre une série d'observations embrassant tout un siècle, on a réussi néanmoins, par le groupement d'observations faites en divers pays et à des époques différentes, à établir une loi assez probable sur la périodicité d'apparition de l'aurore boréale. Ces observations ont été rassemblées dans des relations dues à des institutions scientifiques ou à des savants privés. Elles embrassent en partie les mêmes époques, mais la plupart se rapportent à des temps différents, et il a été, de la sorte, possible d'en former une série assez complète comprenant presque deux cents ans.

Toutes les séries d'observations ont été réunies dans un Travail récent de M. Fritz (5) dans lequel les collections précieuses de MM. Wolf, Mairan, Loomis, Lovering, Argelander, ainsi que les séries étendues de New-Haven et Boston (1742-1850), d'Upsal (1716-1762), de Saint-Pétersbourg (1726-1743 et 1755-1811) et de plusieurs autres endroits ont trouvé leurs places.

A l'aide de ce Travail remarquable, nous pouvons avoir un aperçu complet des résultats par la comparaison de ces séries.

En étudiant avec soin ces registres, on trouve tout d'abord une variation dans le nombre des aurores boréales, embrassant presque

toujours un laps de temps de onze années. On voit ensuite que le nombre d'apparitions d'aurores polaires varie beaucoup pendant ces différentes périodes décennales, et dans ces variations même on peut saisir une loi assez bien déterminée. Nous allons donner d'après M. Fritz (5), sous forme de Tableau, un exposé sommaire des périodes en citant le nombre maximum et le nombre minimum des aurores boréales qui s'y sont produites.

Nombre variable des aurores polaires et des taches solaires.

ANNÉES de maxima et minima.	EUROPE 46° — 55°		EUROPE 55° — 66°		AMÉRIQUE 0° — 60°		EUROPE au sud du cercle polaire.		NOMBRES RELATIFS de Wolf des taches solaires.
	Nombre annuel.	Moyennes de 5 ans.	Nombre annuel.	Moyennes de 5 ans.	Nombre annuel.	Moyennes de 5 ans	Nombre annuel calculé.	Moyennes de 5 ans calculées.	
A	B	*b*	C	*c*	D	*d*	E	*e*	*w*
Max. 1705.5.	1	2,8	0	1,4	0	0	2	6,6	48,6
Min. 1712.0.	0	0,2	0	0	0	0	0	0,4	0,0
Max. 1718.2.	19	21,0	10	4,8	1	1,0	43	46,8	50,0
Min. 1723.5.	19	26,8	17	15,2	0	0,0	49	61,4	10,0
Max. 1727.5.	22	34,0	53	44,4	0	0,4	96	101,8	90,0
Min. 1734.0.	65	60,2	38	24,8	0	0	156	152,2	15,0
Max. 1738.7.	62	64,8	54	43,8	4	1,4	183	166,2	66,0
Min. 1745.0.	17	31,2	18	32,6	0	4,2	55	91,2	10,0
Max. 1750.3.	65	48,0	27	32,0	17	9,4	148	116,4	68,2
Min. 1755.2.	18	28,2	13	18,8	0	1,4	53	73,0	6,0
Max. 1761.5.	4	6,2	66	47,6	7	7,6	72	57,0	75,0
Min. 1766.5.	1	5,8	6	9,6	0	6,4	2	19,0	17,5
Max. 1769.7.	35	24,4	13	18,0	19	12,2	82	63,0	85,7
Min. 1775.5.	63	58,2	20	32,4	6	12,4	139	139,2	27,5
Max. 1778.4.	73	69,0	32	29,0	18	13,4	165	160,2	94,8
Min. 1784.7.	42	65,6	31	45,0	5	30,4	120	168,0	4,4
Max. 1788.1.	124	106,4	60	72,0	41	42,8	288	260,4	90,6
Min. 1798.3.	2	6,0	1	1,0	0	0	5	13,0	2,8
Max. 1804.2.	11	10,0	7	4,2	4	3,4	25	22,6	70,0
Min. 1810.6.	1	0,4	0	0,4	0	2,8	2	1,2	0,0
Max. 1816.4.	2	5,6	2	5,0	1	7,2	6	15,0	45,5
Min. 1823.3.	0	1,6	2	7,8	2	1,2	1	10,2	23,0
Max. 1829.9.	23	27,8	48	49,2	87	43,6	84	88,6	53,5
Min. 1833.9.	10	15,6	22	20,0	43	40,6	37	26,2	7,5
Max. 1837.2.	28	14,8	37	34,6	77	64,4	88	65,4	111,0
Min. 1843.5.	10	14,2	65	62,2	94	89,0	87	112,4	8,6
Max. 1848.1.	65	45,0	158	133,2	177	163,2	254	207,8	100,4
Min. 1856.0.	7	8,4	42	58,0	64	73,4	52	71,8	4,2
Max. 1860.1.	30	32,6	67	61,6	85	80,8	118	129,0	98,6
Min. 1867.2.	16	33,2	162	170,4	19	71,6	194	218,2	7,0
Max. 1870.6.	93	77,2	193	188,8	226	189,6	353	360,6	139,1
Min. 1876...									

La colonne A de ce Tableau renferme les années où les maxima et les minima ont eu lieu; la colonne B, le nombre annuel des aurores polaires entre 46° et 55° de latitude nord en Europe, et la colonne C, celles qui sont apparues entre 55° et le cercle polaire, pour les années où ont eu lieu les maxima et les minima.

Les colonnes *b* et *c* contiennent les nombres moyens des cinq années précédentes.

Dans les colonnes D et *d*, se trouvent les mêmes dates pour l'Amérique. Les nombres des colonnes E et *e* sont obtenus de la manière suivante : Toutes les dates pour l'Europe, prises dans les registres complets, ont été partagées en cinq groupes. Dans le premier groupe ont été placées les observations faites dans les lieux au-dessus de 55° de latitude N.; dans le second groupe, les observations des lieux entre 46° et 55°; dans le troisième, celles des lieux au-dessous de 46°; le groupe 4 comprend toutes les aurores boréales très répandues dans le milieu de l'Europe, et le groupe 5 les phénomènes rares et grandioses où presque toute la Terre a été en même temps éclairée d'aurore boréale, comme cela a eu lieu, par exemple, en 1831, le 7 janvier; 1859, le 28 août et le 1er septembre; 1870, le 24 et le 25 octobre, etc.

Avant d'avoir été mis dans la colonne E, chaque groupe a été multiplié par son numéro d'ordre, le premier par 1, le second par 2, etc., pour aplanir quelque peu les défauts des observations. Il est clair qu'une aurore boréale, étendue et grandiose, doit avoir une tout autre signification, dans l'évaluation de la longueur des périodes, qu'une faible lumière au bord de l'horizon.

Dans la colonne *w*, on a inscrit les nombres relatifs de M. Wolf pour les variations des taches solaires.

Les années des maxima et des minima ont été déterminées par une méthode graphique en prenant la moyenne des chiffres placés dans les quatre premières colonnes, d'où résulte l'accord parfait avec les nombres relatifs de M. Wolf pour les taches du Soleil (Note I).

Un examen attentif permet de remarquer une coïncidence parfaite entre les observations faites en Europe et celles qui ont été faites en Amérique, surtout dans ces derniers temps. Dans l'une et l'autre série d'observations se manifeste d'abord une périodicité de onze ans, puis on constate assez distinctement ensuite une autre

période de cinquante-cinq à cinquante-six ans environ (Note I).

En 1737, le nombre des aurores boréales fut si grand que toutes les séries donnent comme nombre moyen jusqu'à 110 apparitions, Depuis cette époque, le nombre diminue d'une manière très remarquable jusqu'en 1755, où l'augmentation recommence pour continuer jusqu'en 1788. Alors la décroissance se produit de nouveau, pour ne cesser qu'en 1815 où l'accroissement recommence et se poursuit graduellement jusqu'en 1848. Nous voyons donc là deux périodes très distinctes et parfaitement déterminées, alternativement croissantes et décroissantes, d'environ 56 ans. L'ensemble des observations qu'on a pu recueillir pour les temps les plus anciens, et celles faites de nos jours, paraissent confirmer cette loi, et nous pouvons regarder comme un fait certain que les lumières boréales ont une double périodicité de 11 ans et de 56 ans environ.

Périodicité des variations et perturbations magnétiques. — Tout le monde sait qu'une aiguille aimantée, suspendue par son milieu dans un plan horizontal, prend une direction qui est à peu près nord-sud. En observant attentivement cette aiguille, on voit qu'elle oscille perpétuellement à la recherche de son équilibre, et l'on découvre bientôt que ce mouvement oscillatoire varie régulièrement avec les heures de la journée.

L'extrémité nord de l'aiguille se dirige, dès le matin, vers l'Est et atteint sa plus grande déviation en hiver à 9^h et en été à 7^h; puis, jusqu'à 2^h, l'aiguille revient vers l'ouest. Alors recommence le mouvement en sens contraire, qui ne cesse qu'à 10^h du soir, heure à laquelle l'aiguille a repris sa position primitive Le même mouvement se produit pendant la nuit, mais moins fortement. A 3^h du matin, l'aiguille atteint sa plus grande déviation vers l'ouest et recommence à s'écarter vers l'est.

L'amplitude de ce mouvement régulier diffère dans les diverses contrées de la Terre. Dans les régions situées sous l'équateur, l'écart est seulement de $1'$ à $2'$, mais plus on s'approche des pôles, plus le mouvement devient grand, puisqu'il atteint et dépasse même $30'$.

La régularité de ce mouvement est souvent altérée, particulièrement dans des contrées boréales, par des oscillations violentes nommées *perturbations* ou *tempêtes magnétiques*.

Ces tempêtes se produisent toujours avec plus ou moins d'intensité au moment de l'apparition des lumières polaires. L'aiguille aimantée commence à s'agiter aussitôt que l'arc de l'aurore boréale se lève sur l'horizon ; cette agitation, qui augmente à mesure que le phénomène se développe davantage, atteint son plus haut degré quand les rayons flamboient sur le ciel.

Cette influence de l'aurore boréale sur l'aiguille magnétique a été découverte, il y a plus d'un siècle, par Celsius et Hyorter, à Upsal.

De longues séries d'observations, continues et bien faites, prouvent que l'étendue des variations annuelles de l'aiguille magnétique change chaque année dans le même lieu. Ce changement est périodique et s'accorde parfaitement avec la périodicité de l'aurore boréale.

L'étendue des variations de l'aiguille magnétique est proportionnelle au nombre des aurores polaires, c'est-à-dire qu'à un petit nombre d'aurores correspondent de petites variations de l'aiguille magnétique, et que les aurores nombreuses sont accompagnées de grandes variations de l'aiguille.

L'ensemble des observations faites par plusieurs savants de 1777 à 1864 atteste la concordance presque parfaite entre les apparitions d'aurores boréales et les mouvements de l'aiguille de déclinaison (6).

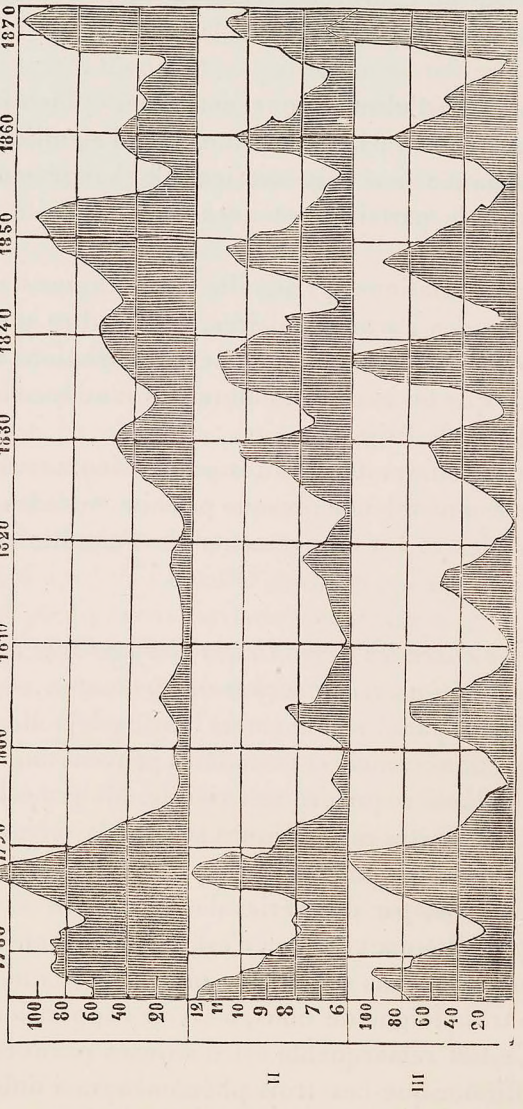
Concordance entre les périodicités des aurores boréales, des variations magnétiques, des taches solaires, etc... — La lumière polaire occasionne donc, comme nous l'avons déjà mentionné, des tempêtes magnétiques, mais ces tempêtes peuvent aussi bien avoir lieu sans que la lumière polaire soit visible. Malgré cela, il est manifeste que les tempêtes magnétiques suivent la même périodicité que l'aurore boréale ; cela a été bien prouvé, au moins pour une période de onze ans, par des séries d'observations assez longues.

Ce qui est plus étonnant encore, c'est que nous trouvons la même marche périodique dans un autre phénomène qui se produit dans un astre très éloigné de nous, à savoir l'apparition des *taches du Soleil.* Ce fait remarquable est d'ailleurs prouvé ; nous pouvons donc affirmer que ces trois phénomènes, si différents entre eux, sont soumis à la même périodicité double. Quand le nombre

des taches du Soleil est maximum, il en est de même du nombre des aurores boréales et aussi de l'amplitude des variations magnétiques et réciproquement.

Nous empruntons à M. Loomis une représentation graphique de ces trois phénomènes, qui montre parfaitement leur concordance depuis 1780 jusqu'à 1870 (7) (voir *fig.* 1).

Fig. 1.



I représente le nombre des aurores boréales observées chaque année.
II » la déviation moyenne de l'aiguille de déclinaison.
III » l'extension relative des taches solaires.

Les observations météorologiques sur lesquelles nous pouvons

compter embrassent un laps de temps trop court pour qu'il nous soit permis d'établir avec certitude les lois qui régissent les changements de l'atmosphère. Toutefois, en comparant les observations faites sur les perturbations de l'atmosphère appelées *cyclones* ou *bourrasques*, on obtient la probabilité d'une périodicité qui s'accorde avec la période déjà mentionnée de 11 ans.

Quant à la période de 56 ans, nous n'osons pas l'affirmer, faute d'observations.

Néanmoins, M. Fritz a signalé dans son Mémoire des résultats très remarquables que nous allons citer :

Pendant le temps où les taches du Soleil sont dans leur maximum, les pluies, les neiges et les grêles sont plus abondantes que pendant le temps du minimum.

La variabilité dans la pression de l'air marche aussi parallèlement avec les grandes périodes des aurores boréales et des taches du Soleil.

Les tempêtes et les mouvements violents dans l'atmosphère ont lieu plus souvent au temps des maxima qu'au temps des minima, et au contraire les beaux jours semblent être plus nombreux dans le dernier cas que dans le premier.

On n'a pu découvrir une influence certaine sur le nombre des orages et sur la marche générale de l'électricité atmosphérique.

Il est clair que s'il existe une périodicité dans les phénomènes rapportés plus haut, elle doit se montrer aussi dans la qualité des récoltes. Nous avons essayé un rapprochement pour la Finlande (8) et nous avons trouvé qu'aux plus grands minima des taches du Soleil, comme dans les années 1696-7, 1750-3, 1810-12, 1867-8, il y a toujours eu des famines, excepté pendant les années 1750-3, pour lesquelles on n'a pas de renseignements certains; on sait seulement que les récoltes de ces années-là ont été assez médiocres.

En suivant d'année en année, de 1810 jusqu'en 1868, la marche des récoltes, nous trouvons pendant ce laps de temps cinq périodes très marquées pendant lesquelles les résultats de la récolte ont varié beaucoup, de telle sorte que les mauvaises années ou les années de disette ont eu lieu aux minima des taches du Soleil et les bonnes années aux maxima. Nous pouvons donc être parfai-

tement d'accord avec le résultat général auquel M. Fritz est arrivé dans son Mémoire, c'est-à-dire qu'il y a des relations certaines entre la variabilité des taches du Soleil et les variations de la déclinaison magnétique, ainsi qu'avec le nombre des aurores polaires; et que les relations entre les variations des taches du Soleil et les phénomènes météorologiques sont très probables.

Périodes annuelles des aurores boréales.

Les lumières polaires apparaissent en toutes saisons, mais le nombre des apparitions est variable. Il est évident que la longueur des jours exerce une notable influence, puisque la lumière du jour empêche de voir les aurores. Cependant, les observations prouvent que le nombre des aurores boréales est plus grand en été qu'en hiver. Ainsi, il résulte d'observations faites à New-York, que durant une période de temps de vingt-cinq ans les aurores boréales ont été réparties comme suit entre les différents mois :

Janvier.....	76	Juillet.....	100
Février.....	86	Août.....	122
Mars.....	106	Septembre.....	131
Avril.....	125	Octobre.....	110
Mai.....	83	Novembre.....	74
Juin.....	79	Décembre.....	60
Le printemps.....	314	L'automne.....	315
L'été.....	301	L'hiver.....	222

Des observations faites en d'autres endroits ayant donné des chiffres parfaitement d'accord avec ceux de ce Tableau, nous pouvons conclure que c'est au printemps et en automne que le nombre des aurores est plus grand. Ce nombre atteint évidemment son maximum pendant les mois d'avril et de septembre, et son minimum en juin et en décembre (*46*).

Période quotidienne de l'aurore boréale.

La lumière polaire, qui apparaît en toute saison, se montre aussi à toute heure du jour et de la nuit, bien qu'il ne soit évi-

demment pas possible de l'observer pendant que le Soleil est au-dessus de l'horizon.

Il a été établi que la fréquence des aurores varie suivant les heures de la nuit; leur nombre augmente de 6^h à 11^h du soir, pour décroître lentement jusqu'à 2^h du matin, mais, après ce moment, la décroissance est rapide jusqu'à 6^h du matin.

Sous les hautes régions arctiques, en deux occasions, il nous a été donné d'observer pendant la journée des aurores boréales. Les circonstances étaient exceptionnellement favorables, car la lumière se manifestait devant une nappe de nuages noirs.

La première fois, le phénomène eut lieu à $11^h 30^m$, et, comme d'ordinaire, il montra cet état ondoyant qui le fait aisément distinguer de tous les autres météores lumineux.

D'autres observateurs ont eu occasion de voir le même phénomène. La moyenne des observations fait voir que la période quotidienne a son maximum environ à 10^h du soir (4_c).

CHAPITRE III.

ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE DE L'AURORE BORÉALE.

Exposé général.

L'aurore boréale peut apparaître avec toute sa splendeur en un point quelconque de la surface terrestre; cependant les régions polaires boréales et australes sont les plus favorisées. Nous savons peu de chose relativement à l'étendue des aurores des contrées australes; pour les contrées boréales, nos connaissances sont plus complètes, mais néanmoins elles ne laissent pas que d'offrir encore un vaste champ aux observateurs futurs. L'ensemble des observations déjà accomplies manifeste des particularités assez curieuses pour éveiller l'intérêt et engager les savants à tenter de nouvelles recherches.

Le phénomène est si rare sous l'équateur qu'on l'y voit à peine une fois tous les dix ans. Toutefois, l'augmentation que l'on constate dans sa fréquence à mesure qu'on s'approche des pôles n'est point partout identique; elle offre des différences sensibles, sur lesquelles nous allons essayer d'attirer plus spécialement l'attention en citant quelques faits particuliers.

En prenant l'équateur comme point de départ, et en suivant deux méridiens, par exemple celui de Washington, en Amérique, et celui de Saint-Pétersbourg, nous trouvons que le nombre des apparitions varie de la manière suivante. Nos chiffres résultent d'un ensemble d'observations faites en 128 endroits différents.

En suivant le méridien de Washington, nous avons annuellement :

A	40°	latitude N.	environ	10	aurores
	45°	»	»	20	»
	50°	»	»	40	»
	55°	»	»	100	»

Entre 55° et 62°, on en aperçoit presque chaque nuit dans des circonstances favorables et l'on peut certainement en fixer le chiffre minimum annuel à 80.

A 62°	latitude N.	encore	40 aurores
65°	»	moins de	10 »

Sur le méridien de Saint-Pétersbourg, nous constatons la même distribution, avec cette seule différence que 100 aurores de plus apparaissent annuellement à 13° plus au nord, c'est-à-dire entre 68° et 75°. La région du nombre maximum des lumières polaires s'est donc rapprochée du nord, bien que le sens général de la répartition ne subisse pas de modification.

Zone maximum.

Si nous portons l'ensemble de toutes les observations sur une Carte, en nous attachant principalement aux lieux où le nombre d'aurores boréales soit de 100 au moins par an, nous verrons autour du pôle nord se dessiner, sur cette Carte, une zone maximum située en Europe entre 66° et 75° de latitude N.; mais, en Amérique, elle descend, tout en s'élargissant, entre 55° et 62°. De chaque côté de cette zone, il en existe deux autres, l'une vers le sud, l'autre vers le nord, et sur chacune de celles-ci le nombre des lumières polaires est de 40 par an.

Ces zones successives forment autour du pôle nord une ceinture ovale, dans laquelle l'un des foyers est assez excentrique.

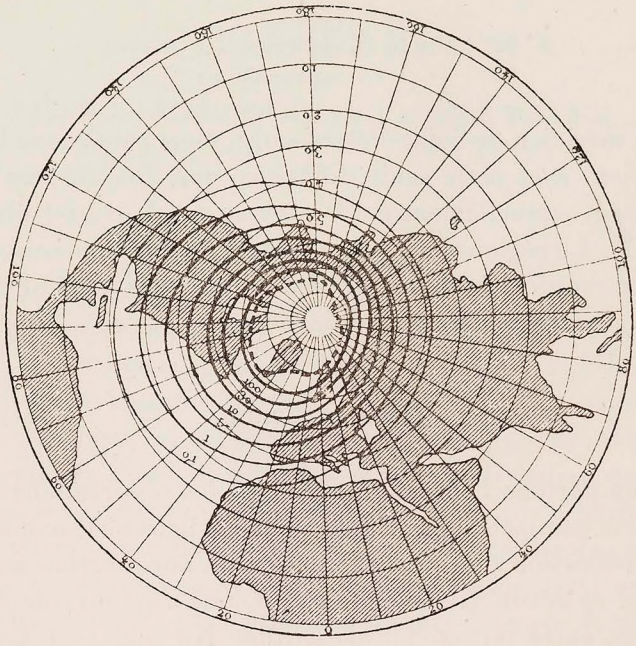
Entre les limites de la zone maximum les lumières polaires se montrent aussi souvent au sud qu'au nord et, si l'on sort de la zone pour se diriger vers le nord, la plus grande partie des lumières polaires est visible au sud (5 et 7).

Dans le Travail déjà cité de M. Fritz (4) se trouve une Carte où est figuré un système de lignes d'égal nombre annuel des aurores boréales. Ces lignes, qu'il nomme *isochasmes*, sont tracées d'après des nombres moyens, calculés pour plusieurs endroits, à l'aide de son grand catalogue des aurores (5).

Ce système, dont la ligne indiquant le nombre maximum (plus de 100 aurores par an) coïncide avec le milieu de la zone maxi-

mum (*fig.* 2), montre que la fréquence d'aurores polaires aug-

Fig. 2.



mente assez lentement du sud au nord jusqu'aux bords de cette zone, où l'augmentation est subite ; ainsi, nous trouvons le nombre annuel aux différents méridiens comme l'indique le Tableau suivant :

Nombre annuel.	Europe. A 0° de long. de Gr. — Latitude.	Asie. A 40° de long. E. de Gr. — Latitude.	Amérique. 270° de long. E. de Gr — Latitude.
	o	o	o
0,1	38	48	21
1	46	56	31
5	51	62	36
10	53	65	43
30	57	70	48
100	63	74	55
Zone maximum.	68	77	60
Ligne neutre...	70	82	63

La ligne neutre tirée en points marque les endroits où l'on voit l'aurore boréale aussi souvent au sud qu'au nord.

La position de la zone maximum reste la même, et le fait essen-

tiel de son existence ressort encore mieux du travail de M. Fritz.

On ne connaît qu'imparfaitement, ainsi qu'il est dit plus haut, l'extension des lumières polaires autour du pôle austral; les observations regardées comme les plus exactes ont été faites à l'observatoire anglais d'Hobart-Town, dans la Terre de van Diemen, situé par 42°52′ lat. S. Ces observations, commencées en 1841 et allant jusqu'en 1848, rendent compte de 34 aurores. En les comparant avec celles de l'hémisphère septentrional de l'Europe et de l'Amérique, on acquiert la conviction que, chaque fois que l'on a observé une lumière polaire à Hobart-Town, le même phénomène a été visible en quelque endroit de l'hémisphère boréal, ou bien que son existence s'est manifestée par l'agitation de l'aiguille aimantée annonçant une tempête magnétique. Si l'on était en droit de tirer une conclusion des quelques observations dont nous disposons, on pourrait dire qu'une lumière polaire d'une certaine intensité n'est jamais visible dans les régions australes sans être accompagnée d'une semblable apparition au nord de notre globe. Nous ne croyons pas toutefois cette conclusion applicable aux lumières polaires de toute espèce, dont quelques-unes n'ont qu'une faible étendue.

Malgré l'insuffisance des observations faites dans l'hémisphère austral, celles-ci n'en accusent pas moins une aire géographique analogue à celle de l'hémisphère boréal, mais dont les limites ne sont pas encore exactement déterminées.

Limites de la zone maximum des isoclines et des isothermes. — Les singularités de la répartition de l'aurore polaire ont conduit à comparer les limites de la zone maximum avec des lignes marquant d'autres phénomènes sur la Terre. On trouve, il est vrai, une certaine ressemblance entre la ligne isoclinique de 80° et le milieu de la zone maximum, mais la coïncidence n'est point parfaite et l'on pourrait aussi bien comparer les limites en question avec les lignes isothermiques. En effet, si l'on suit les lignes isothermiques, c'est-à-dire celles qui marquent une température moyenne annuelle de 0° et 10°, on trouve dans l'Europe et dans l'Amérique que la première coïncide avec le bord sud et la deuxième avec le bord nord de la zone maximum. Bien que la concordance ne soit pas parfaite, on verra dans notre explication que le magnétisme ter-

restre et la température jouent un rôle important dans les apparitions des aurores boréales, et c'est pourquoi nous ne pouvons regarder la concordance comme tout à fait fortuite.

Étendue géographique des orages.

Plus on s'éloigne de l'équateur, plus le nombre et l'intensité des orages diminuent. L'intensité décroît d'une manière si sensible qu'elle est très faible dans les contrées centrales et septentrionales des zones tempérées. La série d'observations suivantes le montre d'une manière frappante :

Latitude.	Nombre moyen annuel des orages.
Entre 0° (équateur) et 30°	52
30 50	20
50 60	15
60 70	10
A environ 70	0

Il importe toutefois de mentionner ici une singularité d'un grand intérêt pour la Science. Bien que, vers 70° de latitude, les orages soient en très petit nombre, leur violence est extrême et ils rappellent tout à fait ceux des contrées équatoriales. Ils sont souvent suivis de coups de foudre qui tuent bêtes et gens. Pendant nos voyages en Laponie, je n'ai rencontré que très peu de personnes n'ayant point vu ou ressenti elles-mêmes les effets de la foudre. Ce fait devient encore plus significatif quand on prend en considération la faible densité de la population de ce pays. Il faut attribuer cette singularité à une cause déterminée, et nous ne tarderons pas à voir que la théorie l'explique d'une manière satisfaisante.

En comparant l'étendue géographique respective de la zone des orages et de celle de la lumière polaire, nous observons immédiatement que les orages cessent dans les contrées où le nombre des lumières polaires est le plus grand.

Faute d'observation, on ignore encore si les orages cessent justement au bord de la ceinture où les lumières polaires se manifestent le plus fréquemment.

Observations de M. le baron Ad. Nordenskiöld au détroit de Behring (1878-79).

Le baron Ad. Nordenskiöld, pendant son célèbre voyage sur la *Véga*, en 1878-79, eut l'occasion de faire des observations sur l'aurore boréale, qui offrent un intérêt spécial. Il vit, dans les environs du détroit de Behring, l'aurore boréale prendre un tout autre aspect que celui qu'elle a au nord de la Norwège et du Spitzberg, où elle se déploie dans toute sa splendeur.

Au nord-nord-est, se montrait, chaque jour où les observations étaient possibles, depuis le mois d'octobre jusqu'au mois d'avril, un phénomène lumineux qui s'étendait en forme d'arc sous-tendant environ 90° de l'horizon, ayant une hauteur de 5° à 12° et une largeur de 10°. Le phénomène était très faible, si on le comparait à celui d'une aurore polaire d'éclat moyen.

L'intensité du phénomène était variable et la raie jaune caractéristique n'apparaissait que par instants, au moment où l'intensité était assez forte.

La lueur de cet arc était le plus souvent stationnaire. Quelquefois cependant, il se développa en plusieurs arcs accompagnés de jets de lumière allant jusqu'au zénith. Un noyau de lumière plus éclatante se montrait plus intense en divers points de l'arc.

Dans le Mémoire que M. Nordenskiöld a publié sur ces phénomènes, on trouve des Tableaux pour les mois d'hiver renfermant le nombre d'arcs mesurés, les limites dans lesquelles ont varié les hauteurs (γ) et l'étendue (2β) qui sont les suivants :

	1878.			1879.		
	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Janvier.	Février.	Mars.
Nombre.....	4	3	7	18	20	49
Étendue 2β...	110°	90°	68°-135°	78°-135°	72°-112°	78°-170°
Hauteur γ ...	20°	10°	4°-15°	5°-30°	4°-27°	4°-145°

On voit par ce Tableau que les mesures ont donné des résultats très variés; mais, en considérant le temps pendant lequel durait le phénomène, les suppositions faites par M. Nordenskiöld semblent toutes justes. Il dit en effet :

« Le Tableau précédent ne saurait indiquer combien le phéno-

mène était constant dans son essence. A tout moment, quand le ciel était clair et que la faible lumière du météore n'était pas dissimulée par la clarté du Soleil ou de la Lune, on pouvait, passé 9^h du soir, s'attendre à découvrir l'arc ordinaire au côté nord-est du firmament, presque avec autant de certitude que la Voie lactée dans une autre partie du ciel. Le météore était du reste si peu remarquable que, en fait d'observations qui s'y rapportaient, je n'ai cité que celles qui étaient accompagnées de chiffres, ou celles qui portaient la mention expresse que l'aurore était en forme d'arc. »

Des notes telles que : « aurore boréale au nord-est », « aurore faible », « aurore voisine de l'horizon de nord-ouest au nord-est », ont été supprimées pour plus de brièveté. Il est certain que ces phénomènes lumineux provenaient presque toujours d'arcs à demi formés ou masqués par la Lune, ou de voiles dans le plan de la Gloire (la couronne lumineuse dans l'espace). En général, les observations d'aurores boréales faites au détroit de Behring de 1878-79 peuvent être caractérisées de la manière suivante :

« *Aurore boréale en forme d'arc*, phénomène ordinaire presque régulier après 9^h du soir, avec le sommet de l'arc au nord-nord-est.

» *L'aurore boréale à draperie* ne se développa dans sa totalité qu'une fois.

» *Les étoiles luisant seules sans clair de lune ni aurore perceptible.*

» Ce fait s'est peut-être présenté une ou deux nuits du 1er novembre au 14 avril. Avant le mois de novembre, nous n'avions pas examiné le phénomène avec une attention suffisante, et après le mois d'avril les nuits ne furent pas assez sombres pour nous permettre d'observer les phénomènes lumineux peu intenses dont il a été question dans cette Note. »

C'est avec raison que M. Nordenskiöld suppose que « l'arc ordinaire » avait une étendue de $2\beta = 90^\circ$ et une hauteur $\gamma = 10^\circ$ avec largeur changeante.

Les mesures ont été faites avec la précision que le comportait un tel phénomène.

M. Nordenskiöld suppose que « l'arc ordinaire » est une partie d'une couronne de lumière située à une hauteur considérable, au-

dessus de la surface de la Terre, autour d'un point placé près du pôle magnétique. Cette couronne est en forme de *gloire,* ce qui lui a fait donner ce dernier nom par M. Nordenskiöld. Il pose du reste les hypothèses suivantes :

« 1° La couronne de lumière est située dans un plan perpendiculaire au rayon terrestre qui passe par son point central, ou, ce qui revient au même, sa partie inférieure est située partout à la même hauteur au-dessus de la surface du globe. Si tel n'était pas le cas, certaines parties de l'anneau seraient plus près de cette surface que d'autres segments, et il faudrait imaginer, à l'occasion de cette circonstance, des conditions différentes dans la génération de la lumière des diverses parties. L'arc lumineux perdrait totalement le caractère d'homogénéité et d'uniformité qui cependant apparaît si nettement.

» 2° La couronne est circulaire.

» Comme preuve à l'appui signalons la régularité de la courbure de l'arc et l'uniformité de l'éclat des diverses parties. Assurément il n'est pas impossible qu'il ne se produise quelques inégalités en connexion avec les perturbations dans l'équilibre des forces magnétiques autour du pôle; mais, en tout cas, l'importance de ces anomalies paraît être minime. Plus tard, sans doute, il sera nécessaire de les étudier attentivement; mais, pour le moment, il faut bien se garder de renoncer à ce résultat de l'observation, qui semble constituer le caractère fondamental de cette curieuse variété d'aurore.

» 3° On connaît la projection du centre du cercle lumineux sur la surface de la Terre. Deux observations simultanées, faites en deux stations bien choisies, permettraient de résoudre sûrement et facilement la question. Jusqu'à présent, il n'a pourtant rien été fait dans ce but; mais, connaissant la relation qui règne entre les aurores et les forces magnétiques, rapport déjà très bien remarqué du temps de Celsius et d'Hiorter, et surtout possédant la donnée que le sommet des arcs d'aurore boréale est toujours sensiblement situé dans le méridien magnétique, il est clair que l'on doit chercher le centre de la *gloire* dans le voisinage du pôle magnétique.

» Qu'on place le pôle vers 70° de latitude N. et 97° de longitude O. de Greenwich, sa distance au lieu d'hivernage de la *Véga,* mesurée sur la surface du globe, sera de 26° 14′, et l'angle formé

par le méridien de la *Véga* et le grand cercle qui réunira ces deux points sera égal à N. 49 E. Au contraire, suivant la théorie de Gauss, le pôle magnétique était situé, en 1829, par 73°21′ de latitude N. et par 39°36 de longitude O. de Greenwich, ce qui fournirait pour la distance de l'emplacement du navire 25°30′ et un angle de N. 41°. Près du lieu d'hivernage, le méridien magnétique fait avec le méridien géographique du lieu un angle d'environ N. 20° E. Les Tables qu'on trouvera à la fin de ce travail établissent que le sommet de l'arc lumineux est situé presque toujours entre le nord (sens de l'est) et le nord-est (sens nord), le plus souvent dans l'azimut nord-nord-est. Les résultats des meilleures observations d'aurores boréales que j'aie pu obtenir montrent ainsi, d'une manière claire, que le point central des arcs qui se présentent le plus fréquemment n'est pas à chercher dans le voisinage de la région où l'on suppose communément que le pôle magnétique est placé, mais que ce centre est plus près du pôle nord. J'accepte donc un point situé à 81° latitude N. et 80° longitude O. de Greenwich. Pour éviter toute confusion, à l'avenir je désignerai ce point sous le nom de *pôle des aurores boréales*. »

Partant de ces suppositions, M. Nordenskiöld établit des formules pour calculer la hauteur de l'arc lumineux au-dessus de la Terre et le diamètre de la *gloire*. Ses meilleures observations ont donné les nombres suivants :

V.	β′ (1).	β (1)	*h*.	
5°	35°	32°	0,033	rayon terrestre.
10	46	45	0,030	»
15	55	53°30′	0,028	»
20	63	62	0,033	»
144	85	85	0,034	»

La valeur moyenne de *h* est égale à 0,03 rayon terrestre = 191^{km}, la valeur moyenne du rayon de la Terre étant $6367^{km},8$.

Dans le calcul, μ (angle formé par les rayons terrestres passant par le point d'hivernage de la *Vega* et le pôle des aurores) a été

(1) β′, largeur apparente de l'arc ordinaire.
β, largeur réelle de l'arc ordinaire après correction de la réfraction.
h, hauteur calculée.

supposé égal à 25° et le point le plus élevé de l'arc au nord à 22° 30′ vers l'est, et au sud à 22° 30′ vers l'ouest. (Note II).

De l'ensemble de ses observations et de ses calculs il tire la conclusion suivante :

« D'après ce que nous avons vu au détroit de Behring, nous croyons pouvoir affirmer les propositions suivantes :

» Même durant les années où les aurores boréales descendent à leur minimum d'intensité, notre globe est entouré d'une couronne lumineuse à peu près constante, simple, double ou multiple, dont la limite inférieure pendant l'hiver de 1878-1879 aurait été habituellement à une hauteur de 0,03 du rayon terrestre au-dessus de la surface de notre globe et dont le centre coïnciderait avec un point situé au-dessous de cette surface, un peu au nord du pôle magnétique. La couronne, avec un diamètre d'environ 0,32 de rayon terrestre, s'étendait dans un plan perpendiculaire à ce même rayon et passant par son centre. »

Quand apparaissent des arcs multiples, ce phénomène s'explique par plusieurs couronnes lumineuses placées les unes dans les autres et situées ordinairement dans le même plan. Selon l'opinion de M. Nordenskiöld, cette supposition a un rapport intime avec le phénomène des arcs elliptiques qui se montraient souvent.

M. Nordenskiöld trouve une preuve certaine de l'existence de la gloire dans ce fait, qu'elle ne se voyait plus le matin, alors que le Soleil commençait à éclairer la partie de l'atmosphère où, d'après ses calculs, se trouvait la couronne lumineuse.

Le Mémoire de M. Nordenskiöld est accompagné d'une Carte comprenant cinq zones circulaires avec le pôle d'aurore boréale comme centre.

D'après les distances différentes de ces zones au pôle de l'aurore boréale et la zone où est située la gloire, l'aspect du phénomène ne doit pas être le même. M. Nordenskiöld fait une différence entre la lumière de la gloire de l'aurore boréale et les aurores en forme de draperies ou de rayons, pour lesquelles l'éclat se change rapidement. Dans ces formes il comprend tous les phénomènes lumineux dont les *Pl. I, II* et *III* donnent un exemple.

Pour rendre son idée plus nette, il compare la lumière station-

naire et tranquille de la gloire avec les moussons et la lumière vive et changeante en forme de draperies avec les tempêtes et les vents irréguliers du nord.

La fréquence des apparitions de la gloire est ensuite comparée avec les observations faites auparavant dans les contrées polaires des hivernages. Il résulte de là que l'apparition de la gloire doit se montrer le plus souvent dans la quatrième zone, située entre les cercles d'un rayon de 20° et de 28° mesurés sur la surface de la Terre. Cette quatrième zone se confond presque avec la zone maximum des aurores polaires.

M. Nordenskiöld regarde donc ce fait comme une preuve à l'appui de ses idées; aussi trouve-t-il que les observations des expéditions d'hivernage donnent au moins des indications dans ce sens-là.

Sans vouloir nier la possibilité de l'existence de la gloire d'aurore boréale, nous ne saurions partager les opinions de M. Nordenskiöld sur l'importance de l'arc ordinaire et nous reviendrons à ce sujet dans le Chapitre des déterminations de la hauteur de l'aurore boréale au-dessus de la Terre.

Observations de l'aurore boréale faites par M. Kleinsmidt à Godthaab, en Groenland, 1864-1880, calculées par M. Tromholt (10).

Le professeur norwégien S. Tromholt, bien connu par ses recherches sur l'aurore boréale, a publié en 1882 un Mémoire sur les périodes de l'aurore boréale, d'après les observations faites à Godthaab par M. Kleinsmidt, professeur au séminaire (10).

Ces observations, qui comprennent quinze années, sont jugées par M. Tromholt comme très remarquables sous tous les rapports. Avec un zèle infatigable, M. Kleinsmidt a poursuivi pendant ces quinze années les observations météorologiques trois fois par jour (1), en portant toujours une attention spéciale sur l'aurore boréale.

Le directeur de l'Institut météorologique de Copenhague, M. le

(1) Les observations ont été faites à 4^h ou 5^h du matin (plus tard à 8^h), à midi ou à 1^h de la journée et à 9^h du soir.

capitaine Hoffmayer, dont la mort prématurée est une grande perte pour la Science, avait engagé M. Tromholt à entreprendre ces observations; celui-ci, en leur vouant un soin particulier, s'est acquitté du travail avec une perspicacité qui mérite beaucoup d'éloges. Aussi M. Tromholt en a-t-il été récompensé par des résultats remarquables, qui nous fournissent de nouvelles données sur la manifestation des aurores boréales dans les régions arctiques.

La marche périodique des aurores boréales n'étant pas aussi manifeste dans les contrées polaires que dans les contrées plus méridionales, on a pensé que ce n'était pas le nombre annuel des aurores boréales qui changeait, mais plutôt les limites de leur apparition. Les observations de M. Kleinsmidt confirment cette opinion de la manière la plus éclatante.

Nous allons rendre compte des principaux résultats trouvés par M. Tromholt.

Parmi les causes qui ont une grande influence sur le nombre des aurores observées, la quantité de nuages est une des plus importantes, mais le clair de lune et la longueur du jour y jouent aussi un rôle.

La comparaison du nombre des aurores boréales avec la quantité de nuages conduit M. Tromholt à établir que le nombre des aurores boréales est en raison inverse de la quantité de nuages.

M. Tromholt fait remarquer qu'il ne parle que de l'influence qu'exerce la quantité de nuages placée comme un écran devant l'œil de l'observateur, et non pas de l'influence possible que pourraient avoir les nuages sur la production de l'aurore boréale.

La longueur du jour rendant impossible l'observation de l'aurore boréale à Godthaab (64°11′ latitude N. + et 54°6′ longitude O. de Paris) pendant les mois d'été, on réunit à la même période annuelle les observations des mois d'août à décembre de l'année précédente et de janvier à mai de l'année suivante.

Le Tableau suivant montre les premiers résultats importants :

Années.	*a*.	*b*.	*c*.	W.	*c'*.	$c - c'$.
1865-66.....	97	2,4	86,2	23,5	83,0	+ 3,2
66-67.....	112	2,2	91,3	6,1	89,4	+ 1,9
67-68.....	65	2,8	67,4	18,3	84,9	—17,5
68-69.....	84	2,6	80,9	60,1	69,3	+11,6
69-70.....	45	3,1	51,7	107,0	51,9	— 0,2

Années.	a.	b.	c.	W.		$c - c'$.
70-71.....	61	2,5	56,5	133,5	42,0	+14,5
71-72.....	32	2,5	32,0	98,6	55,0	—23,0
72-73.....	46	2,7	46,0	89,4	58,4	—12,4
73-74.....	73	2,9	78,4	51,7	72,5	+ 5,9
74-75.....	97	2,7	97,0	32,1	79,8	+17,2
75-76.....	95	2,7	95,0	11,6	87,4	+ 7,6
76-77.....	102	2,7	102,0	13,5	86,7	+15,3
77-78.....	68	2,9	73,0	6,8	89,2	—16,2
78-79.....	100	2,3	85,2	2,2	90,9	— 5,7
79-80.....	75	3,0	83,3	16,3	85,6	— 2,3
Moyenne...		2,7				±13,2

La colonne a contient le nombre annuel des aurores boréales à Godthaab; b, la moyenne annuelle de la quantité de nuages.

Les nombres inscrits dans la colonne c ont été ainsi obtenus : chaque nombre de b, étant divisé par 2,7 (moyenne de cette dernière colonne), est ensuite multiplié par le nombre qui lui correspond dans la colonne a.

Si, par exemple, la quantité de nuages pendant l'année 1865-1866 a été de 2,7, on obtiendra 97 aurores boréales au lieu de 86,2.

La colonne W contient les nombres relatifs annuels de M. Wolf, pour les taches solaires.

Les nombres mensuels ont été formés ici, de telle manière que la moyenne de chaque année a été prise depuis le mois de juin d'une année jusqu'au mois de mai de l'autre; d'où il résulte un nombre qui répond le mieux à la quantité d'aurores boréales observées pendant l'année.

c' donne les nombres obtenus en appliquant la formule

$$c' = k + h.\,\mathrm{W},$$

k et h étant des constantes à déterminer par le calcul;

$c - c'$ est la différence de chaque année entre les nombres de la colonne c et ceux de c'.

Le premier résultat important qui résulte de la comparaison entre le nombre annuel des aurores boréales et le nombre correspondant des taches solaires est qu'*il existe non seulement une période de onze années, mais encore que cette période n'est pas, comme dans les contrées méridionales, parallèle à la période*

des taches solaires, mais au contraire se montre presque diamétralement opposée, en ce que les maxima de celles-là correspondent avec les minima de celles-ci et *inversement.*

Au moyen d'autres séries d'observations faites dans les contrées polaires par l'Institut météorologique de Copenhague, on démontre que ce résultat n'est pas accidentel :

1° A Jacobshavn, en Groenland (69° 13′ latitude N., 53° 15′ longitude W. de Paris), du mois de janvier 1840 au mois d'avril 1851 et de 1873 à 1880 (observations de M. Rudolph);

2° A Godthaab, du mois de septembre 1841 au mois d'avril 1846 (observations de M. Bloch);

3° A Upernivik, en Groenland (72° 47′ latitude N.), pendant les cinq hivers 1874-1875 et 1879-1880;

4° A Iviktut, en Groenland (61° 12′ latitude N., 50° 31′ longitude W. de Paris), pendant quatre hivers, 1875, 1876, 1879 et 1880;

5° A Suckertoppen, en Groenland (65° 6′ latitude N., 55° 14′ longitude W. de Paris), pendant quatre hivers, 1875, 1876, 1879 et 1880.

Outre ces observations, celles de Jacobshavn et d'Iviktut affirment sous tous les rapports les résultats de Godthaab. Les séries plus courtes y contribuent autant qu'on puisse le demander.

Toutes ces séries ont été prises au Groenland; une assez longue, (de 1846-1847-1872-1873) de Stykkisholm, en Islande (65° 5′ latitude N., 25° 6′ longitude W. de Paris), donne les mêmes résultats; bien que les variations dans le nombre annuel des aurores boréales soient ici plus petites, il résulte clairement qu'elles suivent la même loi qu'à Godthaab par rapport aux taches solaires.

Les observations ayant été faites aussi bien le soir que le matin, M. Tromholt trouve nécessaire de distinguer celles-là de celles-ci et d'examiner séparément les séries obtenues.

On voit que les observations du soir donnent le même résultat que l'ensemble des observations; les calculs fournissaient même la différence $c - c'$ moindre ($\pm 11,7$); mais, par contre, les observations du matin, dont le nombre est en général plus petit, amènent une plus grande déviation. M. Tromholt pense que cela tient seulement à ce que l'heure de ces observations a été changée.

Les observations de Godthaab ont été notées avec une grande exactitude. On a indiqué non seulement l'endroit du ciel où le phé-

nomène s'est montré, mais encore on a rapporté chaque phénomène à un des huit types définis. En même temps on a indiqué l'intensité sous quatre rubriques et marqué séparément le moment où l'aurore boréale s'est montrée au zénith et quand elle a couvert tout le ciel.

Par cette raison, M. Tromholt a pu diviser les observations en deux groupes : l'un où le phénomène ne s'est montré qu'au sud, l'autre où il apparaissait vers le zénith ou plus au nord.

Les Tableaux ainsi faits montrent très distinctement que les aurores boréales qui apparaissent au zénith ont leur maximum au mois de décembre, c'est-à-dire à l'époque du solstice d'hiver. Deux autres maxima apparaissent aux mois d'octobre et de mars, c'est-à-dire à l'équinoxe, mais d'une manière moins accusée. M. Tromholt conclut d'abord avec M. Weyprecht que *la zone maximum des aurores boréales change tous les ans de position,* en avançant à l'équinoxe vers le sud, puis vers le nord; occupe au solstice la position la plus septentrionale et tourne ensuite vers le sud pour *atteindre* à l'équinoxe du printemps sa position la plus *méridionale.*

Il résulte des mouvements de la zone maximum que plus on avance vers le nord, plus les deux maxima, qui apparaissent à l'équinoxe dans les zones tempérées, s'approchent l'un de l'autre pour coïncider enfin avec le maximum du solstice d'hiver.

Tandis que les maxima apparaissent à 60° latitude N. en Europe aux mois de septembre et de mars, ils se montrent à 70° aux mois de décembre et de janvier.

Dans les séries d'Upernivik, Jacobshavn et Iviktut, qui est la station la plus méridionale, le maximum annuel se montre distinctement au mois de janvier, ainsi qu'un maximum secondaire à l'équinoxe d'automne. A Jacobshavn, 8° plus au nord, un maximum se montre assez distinctement au mois de janvier et à Upernivik, 3°,5 plus au nord, il apparaît avec une évidence qui n'a encore été observée nulle part.

La série de Stykkisholm offre le même résultat.

En séparant les observations du matin de celles du soir, on voit que le nombre des aurores boréales qui apparaissent le soir au sud et au zénith est à peu près le même; mais celles qui sont observées le matin au zénith sont plus nombreuses que celles vues au sud.

Il résulte clairement de cette circonstance que la zone de maximum avance aussi pendant vingt-quatre heures du sud au nord.

En effet, l'observation montre que l'heure du maximum des aurores boréales est d'autant plus avancée que l'endroit est plus au nord. Cela se voit clairement par les heures trouvées dans l'Amérique du Nord.

Kendal	Québec.	Fort Simpson.
$9^h 30^m$	$9^h 45^m$	$12^h 0^m$

Fort Chipmyan.	Lake Alhabasca.	Point Barrow.
$12^h 15^m$	$12^h 45^m$	$13^h 30^m$ ($1^h 30^m$)

On a aussi obtenu en Europe dans quelques stations une affirmation de ce fait.

Une recherche continuelle des rapports existants entre les aurores boréales au sud et au zénith, pendant les différentes années, démontre qu'au temps du maximum le nombre absolu, aussi bien que le nombre relatif, des aurores boréales au zénith ou plus vers le nord, dépasse le même nombre au temps du minimum. Il s'ensuit que *la zone maximum se déplace même pendant la période de onze ans, de manière qu'au minimum des taches solaires elle se tient plus au nord que dans leur maximum.*

Après avoir examiné la périodicité des différents types d'aurores boréales et observé sur elles le même changement, M. Tromholt a aussi remarqué que les formes les plus différentes apparaissent au temps des maxima. En comparant la périodicité des aurores boréales avec les variations des autres phénomènes météorologiques, il trouve surtout pour les cirrus une périodicité qui s'accorde assez bien avec celle des aurores boréales.

Il est bien rare qu'une seule série d'observations comme celle de Godthaab ait donné lieu à tant de lois concernant un seul phénomène de la nature. Aussi la Science devra-t-elle beaucoup aux travaux de MM. Kleinsmidt et Tromholt.

On peut ainsi résumer tous les résultats :

La zone autour du pôle nord de la Terre où le nombre d'aurores polaires atteint son maximum n'est pas située au même endroit, mais elle apparaît dans sa position la plus méridionale, à l'époque où les taches solaires atteignent leur maximum.

Puis elle se déplace peu à peu vers le nord, et prend sa position la plus septentrionale quand les taches solaires sont à leur minimum. Un semblable déplacement de la zone se montre pendant toute l'année et tous les jours. Ces mouvements de la zone du maximum sont la cause des périodes journalières, annuelles et de onze ans de l'aurore boréale. Ils déterminent aussi dans les contrées arctiques la marche périodique des taches solaires et des aurores boréales opposée à celle des zones tempérées.

Nous reviendrons sur ce sujet en traitant des perturbations magnétiques.

CHAPITRE IV.

HAUTEUR DE L'AURORE BORÉALE AU-DESSUS DE LA SURFACE DE LA TERRE.

Méthodes et déterminations générales.

On a fait un grand nombre d'observations sur la hauteur de l'aurore boréale au-dessus de la surface de la Terre, qui malheureusement ont donné des résultats très peu concordants.

Les méthodes suivies pour déterminer cette hauteur peuvent être classées dans l'ordre suivant :

Première méthode. — La hauteur de l'arc de l'aurore boréale est déterminée, en même temps, en deux stations A et B, situées à peu près sur le même méridien, et dont on connaît la distance qui les sépare. Les résultats obtenus sont calculés d'après la formule de M. Hansteen.

Deuxième méthode. — On observe un point bien caractérisé de l'arc, et de deux stations A′ et B′ situées sur des méridiens différents l'on détermine la hauteur du point et l'azimut des lignes de vision.

Troisième méthode. — La hauteur et l'étendue de l'arc lumineux sont mesurées d'une station. En supposant que cet arc fasse partie d'un cercle lumineux situé dans le même plan et ayant son centre au voisinage du pôle magnétique, on cherche une formule par laquelle on puisse calculer la hauteur au-dessus du sol (Note II).

Quatrième méthode. — La hauteur peut aussi être évaluée en la comparant avec quelques objets terrestres : montagnes, nuages, etc.

Remarques sur les méthodes.

La première méthode demande nécessairement que les deux observateurs placés aux stations A et B voient réellement au même instant le même phénomène, c'est-à-dire que l'aurore boréale soit telle qu'on puisse se figurer son arc comme une partie d'une bande lumineuse relativement mince dans toutes les directions.

La seconde méthode suppose une observation simultanée des deux stations et que le même point de l'arc soit visé.

Pour la troisième méthode, il faut faire toutes les suppositions qu'a faites M. Nordenskiöld et que nous avons exposées brièvement (p. 35).

Mesures des différents savants. — Les résultats que donne l'application de ces trois méthodes sont tout à fait différents. Gilbert obtient par des observations faites à Berlin et à Halle (22 octobre 1804)

$$(377^{km}),$$

tandis que le baron Wrede, dans la Suède, trouve pour le même phénomène une hauteur de

$$(1313^{km}).$$

Ainsi T. Bergman a trouvé, en calculant ses observations personnelles et celles de plusieurs savants célèbres, faites en différents endroits du milieu de l'Europe (de 1726 à 1764), une hauteur de

$$(770^{km}),$$

variant entre les limites

$$(1625^{km} \text{ et } 213^{km}).$$

Dalton donna en 1826 pour hauteur

$$(163^{km});$$

Cavendish obtint le résultat

$$(118^{km},7 \text{ à } 82^{km});$$

Potter, par des observations assez sûres, de

$$(107^{l.m},5 \text{ à } 96^{km},5);$$

Airy obtint en 1833 de

$$(96^{km} \text{ à } 82^{m}).$$

Mesures françaises à Bossekop et Jupvig. — D'après les observations (4 et 11) faites sous la direction de Bravais pendant le voyage de la corvette française *la Recherche* en 1839, la hauteur a été trouvée égale à

$$(150^{km} \text{ à } 90^{km}).$$

Ces observations méritent une attention spéciale, ayant été faites avec beaucoup de soin. Les deux stations Bossekop et Jupvig, où elles se firent, sont situées à une distance de $15^{km},625$ dans la direction du N.-S. 16° E.

Sept observations simultanées ont été faites. Elles donnèrent, après avoir été réduites au même horizon, les résultats suivants :

	Station du S. Bossekop.	Station du N. Jupvig.	Parallaxe.
	° ′	° ′	° ′
1.....	29.49	26. 7	— 3.42
2.....	13.20	15.33	2.13
3.....	134. 4	143.56	9.42
4.....	12.33	12.25	— 0. 8
5.....	140. 2	138.28	— 1. 4
6.....	9.20	10.23	1. 4
7.....	6.30	7.15	0.45

Parmi ces observations les numéros (1) et (4) ont été rejetés comme impossibles, parce que l'arc d'aurore boréale s'est montré plus bas vu de la station nord que vu de la station sud.

En réduisant (3) et (5) à l'horizon nord et prenant la moyenne, on obtient pour

Bossekop.	Jupvig.	Parall. moy.
28° 18′	22° 31′	1° 13′

et comme hauteur

$$(107^{km},6).$$

Nous voulons seulement faire remarquer que cette manière d'utiliser les observations n'est pas justifiée et nous y reviendrons plus tard.

Mesures de Loomis en Amérique. — Nous avons, pour l'Amérique du Nord, les déterminations faites par M. Loomis (1) en deux circonstances où l'aurore boréale apparaissait avec une splendeur exceptionnelle, et avait une étendue si considérable qu'elle embrassa une grande partie du nouveau monde.

En 1859, le 28 août, on put observer de plusieurs endroits de l'Amérique septentrionale une aurore boréale magnifique. En choisissant parmi les points d'observation ceux qui sont situés sur le même méridien et séparés l'un de l'autre par une distance suffisante, on put fixer approximativement la hauteur d'après la première méthode. Les mesures comprenaient la hauteur des limites inférieures et supérieures de l'arc au-dessus de l'horizon. Le phénomène s'étendait sur la Virginie de 36°40′ à 38°50′ de latitude. Le calcul donna pour le bord inférieur 70^{km} et pour le bord supérieur jusqu'à 800^{km}.

Le 2 septembre de la même année, apparut de nouveau une aurore boréale très développée, dont la hauteur fut déterminée de la même manière et qui donna pour le bord inférieur de 23^{km} à 75^{km}, et pour le bord supérieur 730^{km} (4). Cette fois-ci, le phénomène se montra au-dessous de Cuba et de la Floride de 22°30′ jusqu'à 25°15′ latitude N.

Dans ces déterminations, la distance entre les stations était environ de 290^{km}. Aux stations situées plus au nord, on voyait à chacune des deux déterminations l'aurore boréale au zénith, et aux stations plus méridionales l'aurore apparaissait à quelques degrés au-dessus de l'horizon.

Comme nous l'avons vu (p. 36), M. Ad. Nordenskiöld obtint une hauteur de 191^{km}, en raison des suppositions qu'il avait faites. Nous trouvons dans les déterminations que nous venons de citer, et dont le nombre pourrait être encore plus grand, que la hauteur a presque toujours surpassé 75^{km}.

Il y a cependant, dans les observations anciennes, des mesures qui donnent une hauteur bien plus petite.

Mesures de Christie et Farquharson. — Observations diverses. — Ainsi, d'après différentes observations, Christie obtint une hauteur de $7^{km},4$, et Farquharson (en 1839) ne trouva que 752^{m}.

Toutes les déterminations précédentes sont fondées sur des mesures directes. En plusieurs occasions et surtout dans les contrées polaires, les évaluations de la hauteur ont été faites en comparant le phénomène à des objets terrestres. On pourrait citer un grand nombre de ces comparaisons, mais nous nous bornerons à quelques-unes parmi les plus sûres.

Le célèbre investigateur des contrées arctiques, Ross, trouva en plusieurs occasions en Amérique, comme les savants français à Bossekop et à Jupvig, que la lumière polaire se montrait entre l'observateur et des hauteurs voisines. Bravais a prétendu que ces observations étaient des illusions, mais les motifs qu'il donne ne sont pas admissibles.

On a encore dans le nord-ouest de l'Amérique des observations sûres dans ce sens-là.

Henry Bannister observa, le 23 août 1866, à Saint-Michael (63° lat. N.), entre Aljaska et le détroit de Behring, une couronne d'aurore boréale rayonnant de tous côtés, tandis qu'un nuage couvrait tout le ciel à l'est. Devant ce fond sombre les rayons parurent plus brillants qu'ailleurs; ainsi ils ont dû se trouver entre l'observateur et le nuage, à environ 10^{km} de la Terre. H. Bannister avait déjà observé un phénomène semblable au mois d'octobre 1865.

A Alouluk (64° lat. N.), près du détroit de Norton, Pease et Ketchum virent (en novembre 1865) l'aurore boréale contre la pente d'une montagne située à une distance d'environ 30^{km}. On voyait distinctement la cime de la montagne au-dessus du phénomène de lumière. La température était de 34° et la lumière si forte qu'on pouvait lire même l'écriture la plus fine. Un pétillement extraordinaire se fit entendre en même temps. Les observateurs étaient des employés du télégraphe; leur récit mérite toute confiance. Celui qui a rapporté ces dates dit qu'elles concordent avec des observations faites par d'autres voyageurs dans les contrées arctiques et qu'on n'a aucun droit d'en douter.

Parry, Franklin et Hardisty sont d'accord pour affirmer que l'aurore boréale se montre dans la région des nuages et au-dessous. Weyprecht se prononce, à l'appui de nombreuses observations, pour que l'aurore boréale apparaisse à des hauteurs bien différentes, mais pas très grandes. Aux îles de Shetland, dans la Norvège septentrionale, et au Spitzberg, plusieurs observations semblables ont été faites.

Au Spitzberg et au nord de la Laponie finlandaise, nous avons eu l'occasion de vérifier ces observations. Comme nous l'avons dit au commencement de ce Mémoire, on a parfaitement vu de magnifiques phénomènes d'aurores boréales, dont la hauteur ne dépassait pas celle de la région des nuages.

Pendant les voyages de 1868-70 (14), des lueurs fréquentes se produisaient autour des sommets des montagnes de l'île d'Amsterdam, au Spitzberg, et de la Laponie ; le spectroscope montra qu'elles étaient de la même nature que l'aurore boréale.

A cette catégorie appartiennent aussi les singuliers phénomènes de lumière blanche jaunâtre que l'on remarqua près de la surface du sol en Laponie finlandaise, pendant l'automne et l'hiver de 1882-83.

Des phénomènes semblables ont été observés et rapportés par les navigateurs dans la mer Glaciale.

Mesures danoises faites à Godthaab. — Les mesures de la hauteur de l'aurore boréale faites à Godthaab confirment de la manière la plus éclatante la justesse de ces observations. L'ingénieur danois Fritze s'exprime ainsi (15) :

« Contrairement aux nombres élevés qui ont été obtenus pour la hauteur de l'aurore boréale, je puis présenter des nombres très petits fondés sur des déterminations exactes et simultanées. De deux stations situées sur la même ligne horizontale, à quelque distance l'une de l'autre, on a visé le bord inférieur de l'aurore boréale.

» Le 15 mars, la détermination faite à Ivigtut (61° 15′ lat. N., 48° 30′ long. O.) donna pour la hauteur de l'aurore boréale 650 pieds au-dessus de la surface de la mer et à une distance de 1700 pieds de l'observateur. Le 26 février de la même année, on obtenait 170 pieds pour la hauteur à la distance de 380 pieds de l'observateur.

» Il n'est pas rare que l'aurore boréale suive les contours des montagnes et des vallées du paysage au-dessus duquel elle apparaît. »

M. Paulsen rend compte comme il suit des belles observations que faisait l'expédition polaire danoise sous sa direction, à Godthaab, 1882-83 (16).

« En octobre et décembre, l'expédition a effectué plusieurs déterminations relatives à la parallaxe des aurores boréales. La distance entre les deux points d'observations mesurait 58^{km} et leur ligne de jonction coïncidait avec le méridien magnétique. On n'a effectué de mensurations que dans le plan vertical contenant les deux stations. Les observations ont été faites synchroniquement

à l'aide de signaux lumineux préconcertés; on s'est borné à mesurer la hauteur du bord inférieur des bandes aurorales, car c'est presque toujours la ligne la plus nette.

» Pendant les soirées mentionnées, nous avons en tout mesuré la hauteur de 32 bords.

» Les résultats ci-dessous montrent que les limites inférieures des aurores boréales peuvent être beaucoup plus basses qu'on ne l'admet généralement.

» Ainsi, sur trente-deux bords d'aurores mesurés de la sorte, on constata que dix seulement avaient une parallaxe inférieure à 1°; pour cinq bords, la parallaxe était de 1° à 2°; quatre avaient 3° à 4° de parallaxe; trois entre 5° et 6°; pour quatre, elle fut de 7° à 8° et enfin pour six bords, respectivement de 10°, 14°, 15°, 17°, 86° et 143°.

» En négligeant les aurores dont la parallaxe est inférieure à 1°, nous avons trouvé pour les vingt-deux autres bords inférieurs les hauteurs suivantes :

km	km
67,81	7,43
59,60	6,16
54,73	5,28
46,94	3,72
45,04	3,69
38,07	3,22
29,81	2,87
19,14	1,99
9,76	1,96
9,40	1,35
7,67	0,61

» Les trois hauteurs de $1^{km},99$, $2^{km},87$ et $3^{km},22$ correspondent à la même bande dont les mensurations furent séparées par des intervalles de 2 minutes. Les deux aurores à $1^{km},35$ et $0^{km},61$ de hauteur *planaient sur le golfe entre les deux points d'observations*.

» De la station la plus au sud, on les vit à des hauteurs respectives de 13°,6 et 30°,3 au-dessus de l'horizon nord. La station la plus au nord trouva pour hauteurs au-dessus de l'horizon sud 80°,5 et 7°,3. Ces deux aurores-là et la troisième précitée, dont la hauteur a été mesurée trois fois, avaient la forme de rideaux à nombreux plis.

» Relativement à la faible hauteur à laquelle les aurores boréales peuvent apparaître à Godthaab, je ferai remarquer qu'outre moi trois observateurs croient tous avoir eu des signes qui constatent l'apparition des aurores au-dessous des nuages. Dans ce nombre, il faut encore ranger M. Kleinschmidt, observateur depuis longtemps familier avec les détails des aurores.

» Relativement à ce qu'on a cité à propos de la faible hauteur de l'aurore boréale dans sa région propre, je communiquerai quelques observations sur les brouillards, qui semblent être lumineux par eux-mêmes, observés pendant le séjour de l'expédition à Godthaab. Le 21 août 1882, à 1^h45^m (t. l.), on remarqua dans le nord-est une lumière verte d'un éclat pur derrière les sommets des hauteurs les plus rapprochées dans ladite direction; cette lumière était à une faible hauteur, car le sommet de la Selle (montagne d'environ 1200^m de hauteur) s'apercevait distinctement au-dessus de la surface lumineuse, qui ressemblait à s'y méprendre à une nappe d'eau éclairée par la Lune. Le phénomène se dissipa promptement sur ce point, tandis qu'une lueur dans les nuages au nord-ouest, se maintint un peu plus longtemps. A 2^h45^m apparut au sud une lueur qui ressemblait tout à fait à la lumière du jour naissant; elle se contracta bientôt en une nuée allongée, faiblement lumineuse, qui se déplaça lentement sous le Hjortetakken et la Grande Malène (1) dont les sommets se dessinaient avec netteté au-dessus de la nue lumineuse; elle présentait parfois de petites taches d'un éclat plus vif, ainsi qu'on en a constaté surtout quand elle franchissait le sommet d'une colline. A 3^h4^m, la nue avait atteint le versant de la Petite Malène (2) et alors la lueur augmenta subitement d'intensité; en même temps un tourbillon brumeux d'un blanc éblouissant roula sur le sommet d'une colline au nord-est, où se trouve un mât parfaitement distinct à la vue. Au fur et à mesure que la nue glissait par derrière la colline, la lueur affectait une teinte de plus en plus jaunâtre et s'encadrait d'un ruban coloré. A 3^h10^m, elle projeta trois rayons rouges, d'un éclat faible et qui ne faisait que peu de saillie dans le ciel, puis le tout s'éva-

(1) Deux montagnes au sud-est et à l'est de la station, vues à 8^{km} et 12^{km} de distance. Hauteurs respectives, 900^m et 1200^m.

(2) Petite Malène, montagne du nord-est, d'une hauteur d'environ 600^m et vue à la distance de 8^{km}.

nouit. Le ciel était constamment couvert d'un pallium (nébulosité 10); la Lune, au premier quartier, était couchée depuis $8^h 30^m$ du soir précédent. »

De toutes les déterminations et des mesures précédentes on tire facilement ces deux conclusions :

1° *L'aurore boréale apparaît à une hauteur qui peut varier entre quelques centaines de mètres et plusieurs dizaines de kilomètres.*

2° *Les plus petites hauteurs ayant le plus souvent été obtenues dans les contrées polaires, il semble que l'aurore boréale s'y montre toujours plus près de la surface de la Terre.*

Discussion des méthodes employées.

L'aurore boréale est un espace lumineux. — Les déterminations faites au siècle dernier (comme celles de Bergmann) et celles de nos jours ayant donné, pour la hauteur, des nombres très élevés, il est nécessaire d'examiner si les résultats obtenus sont admissibles.

Il n'est pas douteux que les mesures aient été faites d'une manière satisfaisante; mais la nature du phénomène permet-elle d'obtenir des résultats précis, en appliquant, pour résoudre le problème, l'une des méthodes citées plus haut?

L'aurore boréale étant sans aucun doute, comme nous le montrerons dans ce Mémoire, un phénomène produit par un courant électrique dans l'atmosphère, il est clair qu'elle doit avoir, en général, une grande étendue. La théorie et l'expérience prouvent, ce que nous allons montrer, que, l'espace devenant lumineux par le courant électrique, il doit s'étendre en partie le long de la zone maximum de l'aurore boréale, de sorte que sa plus grande étendue coïncide avec cette direction. Son étendue dans le nord-sud (magnétique) et sa largeur dans le sens vertical seront aussi considérables. Celle-là doit sûrement être mesurée par des centaines de kilomètres et celle-ci par des dizaines.

Il est évident que ce phénomène doit se montrer aux observateurs comme un arc-en-ciel nord, quand ceux-ci sont placés au sud de l'espace lumineux. Puisque cet espace lumineux s'étend le long

de la zone maximum de l'aurore boréale, le point le plus élevé de l'arc doit à peu près coïncider avec le méridien magnétique qui lui est presque rectangulaire.

Cependant, comme l'intensité de la lumière dans cet espace est en général faible et subit des variations considérables dans le sens horizontal et dans le sens vertical, il est clair que la condition susdite n'est pas toujours remplie.

Première méthode.

Cas différents des positions des observateurs par rapport à l'espace lumineux. — Figurons-nous deux stations, A et B, situées sur le méridien magnétique à la distance a l'une de l'autre et telle que A soit plus au sud que B; les cas suivants peuvent se présenter :

1° Les deux stations se trouvent au sud de l'espace lumineux. Les observateurs placés en A et en B doivent voir, à l'horizon nord, un arc dont la hauteur et l'étendue dépendent de la distance entre les stations de l'espace lumineux et aussi de la distance a qui les sépare.

Si la distance des stations à l'espace lumineux est grande, par exemple, égale à 100 ou 1000 fois a, les mesures de l'étendue de l'arc donnent à peu près le même résultat pour les deux stations. La différence entre les angles que font les lignes de visée avec le plan horizontal, ou *la parallaxe,* devient très petite. Pour obtenir, maintenant, la hauteur avec certitude, cette petite parallaxe doit être mesurée avec une grande précision; ce qui est très difficile, sinon impossible, en raison des contours estompés de l'arc d'aurore boréale. Comme l'intensité de la lumière dans un point de l'arc dépend de l'étendue de l'espace lumineux dans la direction de la ligne de visée, la partie la plus intense de l'arc lumineux doit paraître aux endroits où cette étendue est la plus grande (Note III).

Cette direction étant différente aux deux stations, deux arcs, situés différemment, seront vus de A et de B, bien que dans le cas présent ils coïncident à peu près. Si les stations A et B se rapprochent de l'espace lumineux, la parallaxe augmente, mais les arcs différents qu'on voit de A et B se séparent de plus en plus, ce qui contribue de nouveau à diminuer cette grandeur.

Si l'étendue de l'espace lumineux est grande dans le sens nord-sud, les lignes de visée tendent à devenir parallèles, ce qui donne le résultat

$$h = \text{hauteur} = \infty .$$

2° Les stations A et B se trouvent toutes les deux au-dessous de l'espace lumineux. Quand celui-ci est très étendu au nord-sud (magnétique), les observateurs verront de nouveau des arcs différents et les lignes visuelles tendront à devenir parallèles, en supposant que l'intensité de la lumière soit distribuée également dans l'espace lumineux et que la lumière soit faible, ce qui arrive le plus souvent. Seulement, dans le cas où l'espace lumineux a peu d'étendue au nord-sud, on peut obtenir des valeurs assez approximatives; ce qui arrive aussi dans les cas précédents.

Si, par exemple, l'intensité de la lumière augmente en quelque endroit, et qu'on l'observe en même temps de A et de B, on peut obtenir la hauteur assez sûrement.

Déterminations à Godthaab, à Sodankylà et à Bossekop. — Une bonne détermination sera aussi faite lorsque les stations A et B seront à une petite distance l'une de l'autre et que l'on mesurera la hauteur du bord inférieur de l'arc d'aurore boréale. C'est pourquoi les mesures faites par l'expédition danoise méritent beaucoup de confiance, ainsi que les déterminations de M. Fritz. Mais les mesures suivantes, faites à Sodankylà, le 8 décembre 1882, prouvent cependant que, même dans ce cas, les déterminations peuvent devenir incertaines.

L'expédition finlandaise avait achevé tous les préparatifs et pouvait entreprendre une détermination de la hauteur de l'arc dans le méridien magnétique. Le fil conducteur qui était placé du nord au sud pour l'étude du courant terrestre servit en même temps au téléphone, de sorte que les observations furent faites d'après des signaux téléphoniques. Deux théodolites munis de dioptres et de cercles verticaux furent placés, l'un à la station de Sodankylà, l'autre à une distance d'environ $4^{km},5$ vers le nord, près de l'embouchure du Kelujoki.

Les observations furent faites par M. Biese à la station sud, et par M. Pétrélius à la station nord. L'aurore boréale parut au nord avec une lumière douce, de temps en temps un peu changeante.

On avait au nord un arc de l'aurore et une bande ondulante, et on obtenait les angles suivants avec le plan horizontal :

	Sur le bord inférieur de l'arc.				Sur le bord inférieur de la bande.		
	Station sud.	Diff.	Station nord.		Station sud.	Diff.	Station nord.
	° ′	° ′	° ′		° ′	° ′	° ′
1°...	7.16	+0. 1	7.17	6°...	10.13	—2.36	7.37
2°...	9.37	—0.49	8.48	7°...	6.38	—4. 7	2.31
3°...	11.19	—2.55	8.24				
4°...	12.17	—2.26	9.51				
5°...	12.49	—2. 4	10.45				
.....	.....	.....	.....				
8°...	5.19	+1.39	6.58				

Nous obtenons en moyenne :

Pour l'arc ..... { —1°.38′ (5 obs.) / +1.39 (1 obs.) plus tard.

Pour la bande ondulante ..... —3.21,5 (2 obs.)

En supposant que les deux observateurs aient vraiment vu le même phénomène, ce résultat (excepté le n° 8) serait absurde; car, si l'arc de l'aurore polaire s'était trouvé à une distance infinie, les angles seraient devenus tout au plus de même grandeur; du reste, l'angle de la station nord aurait dû être plus grand; mais, au lieu de cela, il fut trouvé plus petit; il s'ensuit donc que les deux observateurs ne virent pas le même phénomène. Une autre preuve de ce fait, c'est que M. Biese envoya la dépêche téléphonique suivante : « Fixez le lieu où se trouve le rayon rouge », et qu'à la station nord on ne voyait pas la trace d'un tel rayon.

Lorsque deux observateurs placés à une distance de $4^{km},5$ peuvent voir des phénomènes différents, il est bien clair que les déterminations faites avec des bases très grandes doivent être très incertaines, sinon tout à fait fausses.

Les observations françaises de Bossekop et de Jupvig conduisent au même résultat. Il n'y a rien qui nous donne le droit de réprouver trois séries d'observations, parce qu'elles donnent une parallaxe négative. Cela prouve seulement que les observateurs *ont vu des arcs différents* appartenant à un espace lumineux projeté sur le ciel nord.

Les déterminations les plus sûres sont, sans aucun doute, celles dans lesquelles la parallaxe est la plus grande, telles que les n^{os} 2, 3 et 6, etc.

Conformément à ce que fit M. Paulsen à Godthaab, nous allons omettre les observations pour lesquelles la parallaxe est plus petite que 1°.

En calculant les autres, on obtient :

	Hauteur. km	Distance. °
3°	29,45	43,53
2°	24,19	101,95
6°	23,54	143,73

Les observations étant déjà réduites au même plan horizontal sont applicables sans correction pour la courbure terrestre.

Nous voyons par là que ces observations, regardées par tout le monde comme étant très bien faites, donnent des valeurs qui s'approchent des déterminations danoises du Groenland. Lorsque les stations se trouvent au nord de l'espace lumineux, un arc apparaît au sud.

Il est clair que les mêmes erreurs peuvent se produire lorsque l'on mesure la hauteur au sud dans le méridien.

En général, on peut dire que la plus grande partie des mesures calculées d'après cette méthode doivent être fausses, car c'est par exception que les observateurs ont réellement vu le même arc. Les hauteurs deviennent toujours trop grandes, parce que les lignes de visée tendent à devenir parallèles.

M. Tromholt a proposé une autre méthode, qui consiste à mesurer des deux stations les bords supérieurs et inférieurs de l'arc et à calculer la hauteur d'après ces données.

Il faut convenir que cette méthode donnerait dans plusieurs cas (lorsque les stations se trouvent au sud ou au nord de l'espace lumineux) un résultat assez exact, mais seulement quand l'espace lumineux a une petite étendue au nord-sud.

Deuxième méthode.

La deuxième méthode citée plus haut (p. 45) devrait donner les résultats les plus sûrs, si les observations, faites des deux stations situées à peu de distance, sont parfaitement simultanées et si le point lumineux dont on détermine la hauteur se distingue assez bien de son entourage. Cependant cette méthode a été appliquée très rarement et, d'après ce que l'on sait, jamais dans des

circonstances assez favorables pour qu'on puisse en tirer des conclusions certaines.

Troisième méthode et déterminations de M. Nordenskiöld.

La troisième méthode doit toujours demeurer la plus incertaine, car il faut admettre les suppositions citées précédemment, c'est-à-dire, 1° que l'arc est une partie d'une bande lumineuse circulaire placée dans l'espace, ayant son centre à proximité du pôle magnétique; 2° que cette bande est située dans un plan faisant des angles droits avec le rayon terrestre passant par le centre.

Cette méthode a souvent été employée et a toujours donné des nombres très élevés pour la hauteur : 200^{km} et davantage. Comme nous l'avons vu, elle a été appliquée dernièrement par M. Nordenskiöld qui en a tiré les conclusions citées (p. 36).

Ce qui est à remarquer ici, c'est qu'un espace lumineux s'étendant le long de la zone maximum d'aurore boréale, ayant une hauteur de quelques dizaines de kilomètres et située à une distance d'une centaine de kilomètres d'une station, se montrera, à peu près, comme l'arc ordinaire que M. Nordenskiöld a observé dans les environs du détroit de Behring. La position de l'arc au méridien magnétique reste la même ainsi que sa courbure, mais *la distance* du spectateur et *la hauteur* du phénomène au-dessus de la surface terrestre sont tout à fait différentes.

Nous supposons un espace lumineux ayant une hauteur de 22^{km}, une étendue nord-sud de 120^{km}, et située à une distance de la station égale aussi à 120^{km}. Un tel espace lumineux, dont l'étendue le long de la zone maximum mesure au moins 500^{km}, doit se montrer en forme d'arc occupant environ 90° de l'horizon et dont le point le plus élevé au méridien magnétique a une hauteur de 10°. La lumière de l'arc est presque homogène avec des bords estompés; fait bien connu de tous les observateurs de l'aurore boréale.

D'où vient-il que la détermination de la hauteur de l'arc ordinaire de M. Nordenskiöld donne une altitude si grande? Cela résulte de ce que les extrémités de l'espace lumineux semblent s'abaisser sous l'horizon et, par cette raison, les mesures de l'étendue de l'arc donnent toujours des nombres trop petits.

Notre avis est donc que M. Nordenskiöld a vu, à une distance de 150 à 300^{km}, un espace lumineux ayant une hauteur de 20 à 40^{km}.

Un tel phénomène donnera toujours à peu près les nombres inscrits dans ses Tableaux d'observations. L'hivernage de la *Véga* s'accomplit à une distance de 500 à 600^{km} de la zone maximum, si les limites de cette zone sont bien déterminées (Note III).

Dans ces derniers temps, MM. Donati, Tromholt et Rand Capron ont donné de nouvelles déterminations, mais la discussion des valeurs trouvées nous mènerait trop loin et n'apporterait aucune nouvelle preuve.

Conclusions. — Les mesures que nous avons assez longuement citées ne nous font pas connaître la *limite supérieure* à laquelle peut s'élever la lumière polaire dans l'atmosphère. Nous devons donc nous contenter d'une valeur approximative et, en supposant une hauteur entre 35^{km} et 70^{km}, nous nous approchons de la vérité (Note IV). On peut regarder comme certain le fait que, même dans les contrées méridionales, l'aurore boréale se montre souvent bien plus bas, à quelques kilomètres au-dessus de la surface terrestre. Certaines formes de l'aurore boréale, de préférence celles qui apparaissent comme de faibles flammes, peuvent même être vues tout près du sol, surtout sur les cimes des montagnes, dans les contrées polaires.

Un grand nombre d'aurores boréales, même intenses, apparaissent dans les régions des nuages et même au-dessous; ce qui est montré par les nombreuses observations citées plus haut, d'après lesquelles on a pu évaluer approximativement la hauteur de l'aurore boréale en la comparant avec la hauteur d'objets terrestres.

CHAPITRE V.

APERÇU GÉNÉRAL SUR LE MAGNÉTISME TERRESTRE.

État magnétique actuel de la Terre.

Constantes magnétiques. — Nous avons déjà fait remarquer le merveilleux rapport existant entre les variations quotidiennes du magnétisme, les tempêtes magnétiques et la lumière polaire. Pour laisser apprécier toute la signification de ce fait, nous allons donner, dans l'aperçu suivant, un court exposé de nos connaissances actuelles sur l'état magnétique de la Terre.

On sait qu'une aiguille aimantée ordinaire, suspendue par son centre de manière à se mouvoir librement dans le plan horizontal, garde sensiblement la même direction nord-sud. Si on l'écarte de cette direction et qu'on l'abandonne ensuite à elle-même, elle reprend aussitôt, après quelques oscillations, sa position primitive.

Elle y est donc ramenée par une certaine force particulière. C'est cette force que l'on nomme le *magnétisme terrestre*. Comme toute autre force, celle-ci n'est déterminée qu'autant que l'on connaît son intensité et sa direction.

Si nous regardons dans quelle direction l'aiguille aimantée se trouve par rapport au méridien d'un lieu, nous constatons immédiatement que son axe s'en écarte et forme avec lui un angle nommé *déclinaison de l'aiguille*. La ligne que nous imaginons, menée sur la Terre par un plan vertical, dans la même direction que l'axe de l'aiguille, est appelée le *méridien magnétique* de ce lieu.

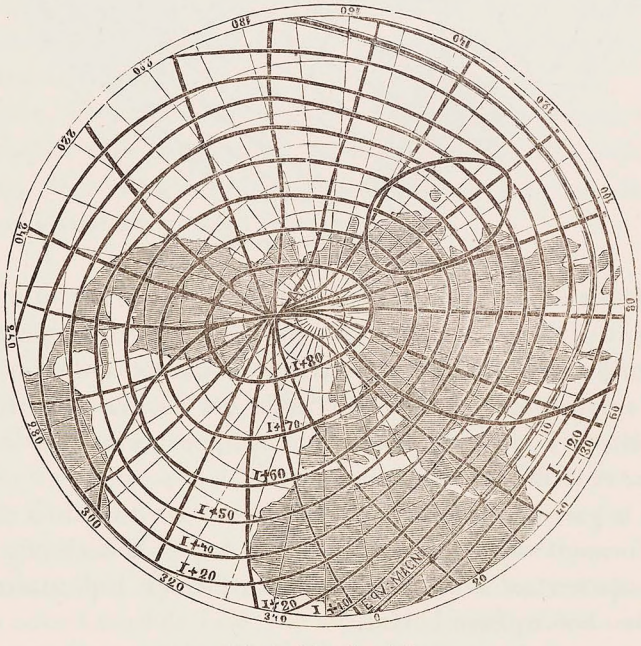
En suspendant l'aiguille de façon qu'elle puisse se mouvoir librement autour d'un axe horizontal et dans le plan vertical du méridien magnétique, nous voyons qu'elle forme avec le plan horizontal un certain angle appelé *inclinaison*. Si nous pouvions accrocher l'aiguille de manière qu'elle pût se mouvoir à la fois dans les deux plans, vertical et horizontal, elle déclinerait jus-

qu'au moment où son axe serait dans le plan du méridien magnétique : elle formerait alors avec le plan horizontal un angle égal à l'inclinaison. Une aiguille ainsi placée montrerait la vraie direction de la force magnétique terrestre.

En mesurant l'intensité de cette force pour chaque lieu, on trouve ce qu'on appelle les *constantes magnétiques* du lieu, c'est-à-dire la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité, et l'on possède alors la complète détermination de la force magnétique.

Déclinaison. — La valeur des trois constantes varie suivant les différents points de la Terre. La déclinaison, qui, pour le moment, dans toute l'Europe, est dirigée du côté de l'ouest, diminue à mesure que l'observateur se porte lui-même vers l'est; elle s'annule alors, passe ensuite à l'est, et, continuant notre route en marchant toujours dans le même sens, nous trouverons encore une contrée où la déclinaison sera nulle. Si nous menons une ligne

Fig. 3.

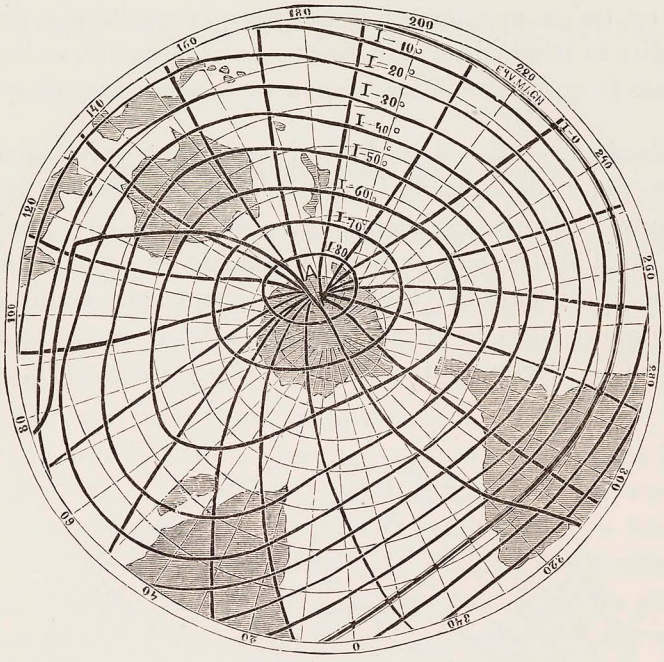


Hémisphère boréal.

continue sur le globe passant par toutes les contrées dans lesquelles la déclinaison est nulle, cette ligne devra coïncider avec la ligne

que nous voyons sur les cartes (*fig.* 3 et 4). En suivant, par exemple, le 50e parallèle qui coupe le méridien de Paris, origine des longitudes françaises, la déclinaison y est d'environ 20°; à 20°

Fig. 4.



Hémisphère austral.

de longitude est de Paris, elle a déjà diminué de 10°, et à un peu plus de 40° elle est nulle. Puis elle passe à l'est, augmente très lentement, monte jusqu'à 20° environ, et décroît enfin jusqu'à 0°, ce qui arrive vers 180° de longitude est de Paris environ. Elle revient alors à l'ouest jusqu'à 38° environ, ce qui arrive à 40° à l'est de Paris, et la diminution recommence.

Dans la partie orientale de l'Asie, on trouve toutefois un grand espace formant une figure fermée, dans lequel la déclinaison varie de 0° jusqu'à 2°45′ seulement. Cette surface est reproduite sur la *fig.* 3 de l'hémisphère boréal.

Nous nous abstenons de mentionner diverses autres particularités se rapportant aux variations de la déclinaison, parce que notre intention se borne à ne donner ici qu'un bref aperçu des phénomènes.

Nous aurons un aperçu clair des variations de déclinaisons du magnétisme terrestre dans le système de lignes qui fut introduit par Duperrey dans sa Carte magnétique de 1838, et qui a reçu le nom de *méridiens magnétiques*. En effet, si l'on imagine des lignes partant des points de l'équateur et tirées dans la direction de l'aiguille de déclinaison, puis continuées de lieu en lieu, constamment dans la direction de cette aiguille, aussi bien vers le nord que vers le sud, il en résulte un système de méridiens magnétiques de la Terre. Ces lignes sont loin de former un système parfaitement régulier, semblable aux méridiens astronomiques, mais elles montrent pourtant une assez grande régularité dans la distribution du magnétisme terrestre.

En considérant une Carte sur laquelle ces lignes sont tracées, (*fig.* 3 et 4), on trouve facilement qu'elles convergent toutes vers deux points, l'un situé dans l'hémisphère nord (latitude 73°35′ et longitude 264°21′ de Greenwich); l'autre dans l'hémisphère sud (latitude 72°35′ et longitude 152°30′).

Quoique la direction de ces lignes soit en général dérivée d'observations, on a cependant rempli les lacunes par le calcul (selon la théorie de Gauss).

Du reste, les lignes sont tracées par chaque vingtième de degré de longitude, commençant par un des points dans lesquels l'équateur magnétique coupe celui de la Terre; le second point de section aura alors aussi son méridien magnétique.

Inclinaison. — L'inclinaison change aussi d'une contrée à une autre, mais elle reste toujours entre 0° et 90°. Si nous imaginons une ligne passant par toutes les contrées où l'inclinaison est nulle, cette ligne entourera toute la Terre près de l'équateur qu'elle coupera en deux points situés aux deux extrémités d'un même diamètre de la sphère terrestre : l'un d'eux est à l'ouest de l'Afrique, dans le golfe de Guinée, l'autre dans l'océan Pacifique. Les *fig.* 3 et 4 nous montrent la direction de cet *équateur magnétique*.

En passant de l'équateur au nord, l'inclinaison augmente, c'est-à-dire la pointe nord de l'aiguille aimantée se baisse et la pointe sud se relève, et si nous continuons notre marche vers le nord, l'inclinaison s'accroît continuellement, de sorte qu'en un lieu situé vers 261°21′ de longitude est de Greenwich et 70°7′ de latitude nord, sur

la côte occidentale de l'île Boothia Felix, l'inclinaison atteint 90°. La direction de l'aiguille aimantée est donc perpendiculaire au plan de l'horizon. Ce point, qu'atteignit en 1830 le célèbre capitaine Ross, est donc le *pôle nord magnétique de la Terre.*

En allant de l'équateur vers le sud, l'aiguille aimantée s'incline en sens contraire, de manière que c'est la pointe sud qui s'abaisse au-dessous du plan horizontal; cette inclinaison grandit continuellement, jusqu'à atteindre 90° en un point situé vers 134° de longitude est de Paris et 72° de latitude sud, appelé de même le *pôle sud magnétique* (Note V).

Les Cartes (*fig.* 3 et 4) donnent la direction des lignes menées par les contrées ayant la même inclinaison. Ces lignes forment autour du globe des *parallèles,* assez différents cependant des petits cercles terrestres ou parallèles astronomiques.

Intensité. — Comme toute autre force, on peut mesurer l'intensité du magnétisme terrestre, c'est-à-dire la comparer à une autre force dont la puissance est connue. On la comparera, par exemple, à la force qui donnerait à une masse de $0^{gr},001$ l'accélération de $0^{m},001$ en une seconde. En disant que l'intensité du magnétisme est 5, nous entendons que l'aiguille aimantée, c'est-à-dire l'aiguille d'inclinaison placée dans le méridien magnétique, est retenue dans sa direction par une force 5 fois plus grande que celle qui donnerait à $0^{gr},001$ l'accélération de $0^{m},001$ en une seconde (1).

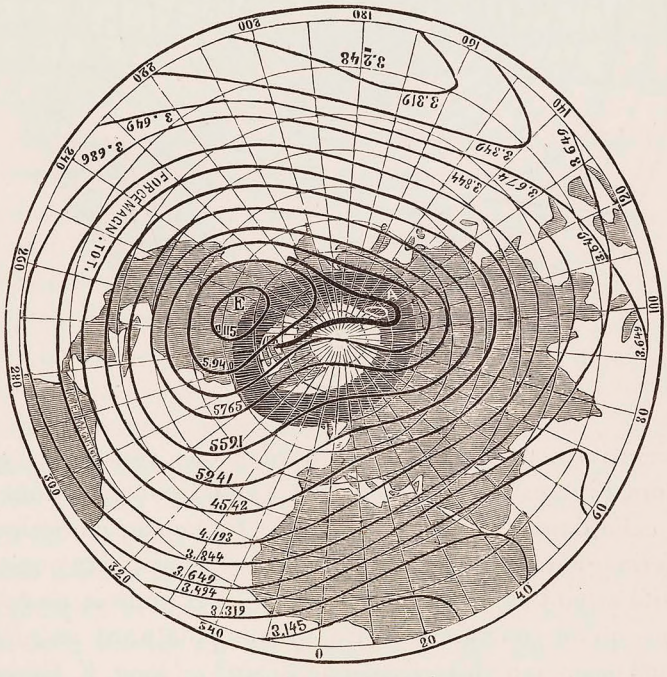
Pour déterminer l'intensité magnétique d'une contrée, on a trouvé plus commode de ne mesurer que la composante de la force qui agit dans le plan horizontal et qui est située dans le plan du méridien magnétique. Cette portion se nomme la *composante horizontale* du magnétisme terrestre. L'autre portion, située dans le plan vertical, et perpendiculaire à la première, est appelée la *composante verticale.* La résultante de ces deux composantes représente naturellement toute la force du magnétisme terrestre. En mesurant en un lieu quelconque l'inclinaison et la composante horizontale, on peut facilement déterminer l'intensité totale (Note VI). Pour les contrées situées à l'équateur magnétique,

(1) Le système C. G. S, adopté aujourd'hui, remplace ces quantités par le gramme, le centimètre et la seconde.

où la composante verticale est nulle, la composante horizontale représente évidemment toute la force magnétique, et réciproquement, si l'on s'éloigne de l'équateur, la composante horizontale ne cesse de décroître et devient nulle au-dessus des pôles magnétiques.

D'ailleurs, la composante verticale augmente dans la même mesure. Observons toutefois que la décroissance de l'une et l'accroissement de l'autre ne sont pas proportionnels à la distance à l'équateur. Tous ces faits sont exprimés par les changements éprouvés par les valeurs variables de l'intensité totale, changements marqués sur les Cartes (*fig.* 5 et 6) au moyen de lignes traversant toutes les régions de même intensité magnétique.

Fig. 5.



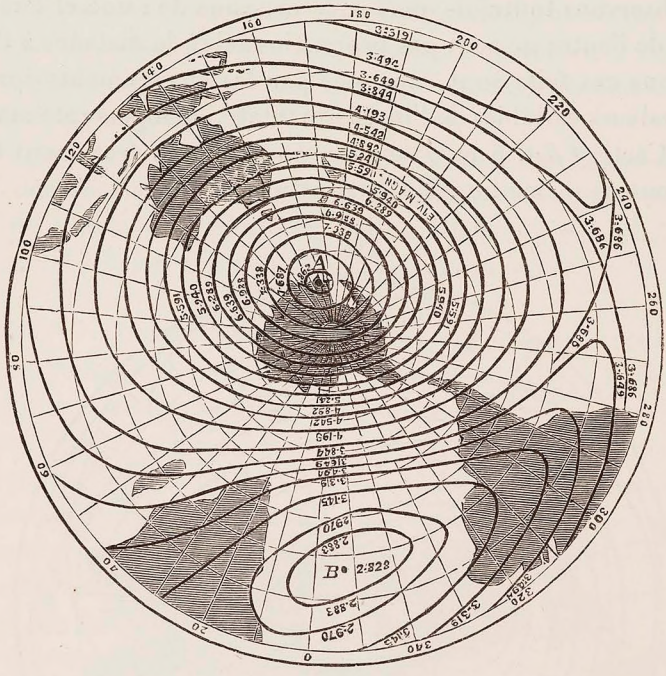
Hémisphère boréal.

Ainsi nous voyons d'abord un endroit, près de l'île de Sainte-Hélène, où l'intensité est minimum et représentée par le chiffre 2,828 (point B, *fig.* 6).

Cette contrée est limitée par une ligne dont la force est 3,145 ;

autour de cette première ligne, il en existe une seconde dont la force a augmenté et a atteint 3,494; au delà, nous trouvons au sud et au nord d'autres lignes qui entourent la Terre et indiquent que la force augmente peu à peu jusqu'à 4,193 et 5,241. En considé-

Fig. 6.



rant exclusivement l'hémisphère nord, nous constatons que la ligne dont l'intensité est 5,8 environ s'étend encore autour de la Terre; celle dont l'intensité est 5,940 forme, au contraire, une figure fermée autour d'un point situé dans l'hémisphère ouest et où l'intensité atteint son maximum (6,161). Cet endroit ne coïncide pas, ainsi qu'on pourrait le croire, avec le pôle nord magnétique, il est situé beaucoup plus au sud-ouest (261° 27′ long. E. Greenwich et 54°,32′ lat N. (point E, *fig.* 5).

Dans la partie orientale de l'hémisphère nord, nous trouvons un autre point (119° 57′ long. E. de Greenwich et 71° 20′ lat. N.; point A (*fig.* 5), où l'intensité atteint un maximum de 5,912, chiffre inférieur au précédent. Il y a donc dans l'hémisphère nord

deux points où la force magnétique est maximum, mais leurs intensités respectives sont inégales (¹).

L'examen des lignes de l'hémisphère sud nous montre que l'intensité augmente continuellement et que toutes les lignes, même celle qui indique la force de 6,933, vont autour de l'axe de la Terre sans en suivre les parallèles. Les autres lignes entourent un point où l'intensité atteint un maximum de 7,898; ce point n'est pas exactement connu, mais doit être situé à peu près où se trouve le point A (*fig.* 6).

On voit immédiatement que la force magnétique a sa valeur minimum au milieu de la Terre et qu'elle augmente vers les deux pôles, à proximité desquels se trouvent des contrées où la force devient maximum. Même dans ces contrées, l'intensité varie. Remarquons, en outre, que la force est presque 0,2 fois plus grande dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord, et que son accroissement s'y manifeste beaucoup plus vite à mesure que l'on s'approche des régions polaires.

Tel est, en résumé, le grand système magnétique qui règne sur la Terre. Des savants illustres, appartenant à toutes les nations, ont contribué à en faire connaître les lois; quelques-uns, parmi eux, méritent d'être cités à part, en raison des importants services qu'ils ont rendus à la science et à l'humanité. Citons d'abord le Norvégien Hansteen, qui parcourait la Sibérie au prix des plus atroces privations, et dont les recherches ont été d'une si grande valeur pour la science.

Le major Sabine, par son infatigable persévérance, a considérablement enrichi nos connaissances sur le magnétisme des régions polaires, et nous devons la même reconnaissance aux explorateurs anglais de ces contrées désolées; le capitaine Ross occupe parmi eux une place d'honneur. Le célèbre savant allemand Alexandre de Humboldt et l'astronome Lamont ont beaucoup contribué à établir cette science sur des bases solides par leurs voyages et par la construction d'instruments d'une valeur inappréciable. Au nombre de ceux qui ont surtout travaillé au perfectionnement

---

(¹) Les recherches nouvelles publiées par MM. Erman et Petersen (17) ont établi que le premier maximum n'existe pas et qu'il y a un seul maximum (6,282) situé à l'endroit du premier maximum désigné ci-dessus.

des méthodes de mesures, nous mentionnerons Gauss et Weber. Nous sommes redevables au premier d'une des meilleures théories mathématiques du magnétisme qui aient été faites (Note VII). En partant de cette supposition que chaque mètre cube de la Terre renferme une certaine quantité de fluide magnétique, ce savant prouve qu'on peut déterminer la direction et l'intensité de la force magnétique au moyen d'une simple formule, à la condition qu'on connaîtra d'avance la valeur des constantes magnétiques d'un certain nombre de contrées.

Aux noms si célèbres que nous venons de citer, ajoutons encore ceux de Poisson, Arago, Kupffer, Bravais et Becquerel.

Variations du magnétisme terrestre.

Variations séculaires. — Le magnétisme n'a pas toujours été distribué de la même manière sur la surface de la Terre. Des observations précises prouvent que l'intensité, la déclinaison et l'inclinaison, c'est-à-dire les trois constantes, sont soumises à des changements continuels. Ces variations se partagent en deux groupes : les variations séculaires et les variations quotidiennes.

En étudiant la marche des observations faites de la déclinaison à Paris, on voit dans le Tableau ci-dessous les changements qu'elle a subis.

Années.	Déclinaison.
1580	11°.30′ à l'Est.
1618	8 »
1663	0 »
1770	8.10 à l'Ouest.
1780	19.55 »
1805	22.5 »
1814	22.34 »
1819	22.29 »
1822	22.11 »
1832	22.3 »
1842	21.25 »
1852	20.20 »

Ainsi donc, en 1663 ou 1664, la déclinaison, qui était d'abord à l'est, tomba à 0° pour passer ensuite à l'ouest. En 1814, sa direction atteignait son maximum à l'ouest et la décroissance recommença. Les variations ne sont pas les mêmes chaque année. L'in-

clinaison et l'intensité sont aussi soumises à des changements.

L'étude comparative des observations magnètiques exécutées à différentes époques permet d'énoncer les conclusions suivantes :

Les pôles magnétiques tournent autour de l'axe de la Terre à une distance du pôle vrai qui va jusqu'au 70e parallèle environ.

Le temps nécessaire pour une rotation complète est de six cents ans environ.

Il est certain que l'admission de l'hypothèse précéden te explique assez clairement les variations séculaires du magnétisme terrestre. En nous rappelant, par exemple, qu'en 1664 la déclinaison était nulle, nous pouvons supposer que le pôle magnétique était situé sur le méridien de Paris, et à l'intérieur de la Terre, du même côté du pôle nord; il en résulte que l'inclinaison avait atteint sa valeur maximum, que nous savons avoir été alors de 75°. Quand le pôle magnétique a tourné à l'ouest, la déclinaison a dû augmenter dans la même direction et l'inclinaison diminuer, décroissance qui a continué jusqu'en 1814, c'est-à-dire pendant une période de cent cinquante ans. A cette époque, la déclinaison et l'inclinaison ont diminué toutes les deux, ce qui s'accorde parfaitement avec la supposition qu'en 1814 le pôle magnétique avait atteint la direction la plus occidentale possible, et qu'il était situé près du plan d'un méridien perpendiculaire au plan du méridien de Paris. Si ce mouvement continue régulièrement, la déclinaison pour Paris sera nulle en 1964 et l'inclinaison sera minimum; en effet, le pôle magnétique sera alors près du méridien de Paris, mais cette fois il sera de l'autre côté du pôle nord de la Terre. C'est aux observateurs futurs que revient la tâche de vérifier ces suppositions; mais il est certain qu'aujourd'hui, à Paris, la déclinaison et l'inclinaison décroissent continuellement (18).

Variations annuelles et quotidiennes. — Nous avons déjà mentionné la période quotidienne des variations de la déclinaison; nous savons, en outre, que les mouvements de l'aiguille changent en grandeur pendant certaines années, et que ces changements forment une période spéciale de onze ans.

Ainsi, à Göttingue, de décembre à février, la grandeur moyenne des mouvements de l'aiguille de déclinaison est d'environ $6',4$; de mars à mai, elle est de $12',8$; de juin à août $12',5$, et enfin,

de septembre à novembre 9′,7. Les trois constantes sont soumises aux changements quotidiens; mais, tandis que l'inclinaison est maximum vers 10^h du matin et minimum vers 10^h du soir, l'intensité, au contraire, est maximum vers 10^h du soir et minimum vers 10^h du matin. Ces variations se produisent aussi dans l'hémisphère sud, mais toujours en sens contraire. Un résumé des observations nous donne les résultats généraux suivants :

Toutes les variations magnétiques quotidiennes dépendent du Soleil. Dans les latitudes moyennes, elles ont une période de douze heures; mais, comme l'amplitude d'oscillation de la période nocturne est moindre, la marche du phénomène semble indiquer la présence de deux périodes simultanées, l'une de 24, l'autre de 12 heures. Les phénomènes dépendent naturellement de la latitude géographique. A l'équateur, une partie des variations ne montrent qu'une période simple de 12 heures, tandis que la période plus longue a disparu.

Les observations qui ont été faites pendant l'hivernage de l'expédition polaire suédoise au Spitzberg en 1872-73 (19) démontrent assez clairement que la variation quotidienne y a changé de caractère, ce que nous voyons par la comparaison suivante :

Zone tempérée.			Spitzberg.		
Max.	Min.	Max.	Min.	Min.	Max.
2^h—3^h	8^h—9^h	13^h—14^h	21^h—22^h	4^h	20^h

Les variations quotidiennes de l'intensité horizontale et verticale et de l'inclinaison ont aussi subi des changements semblables.

Outre ces changements assez réguliers, le magnétisme terrestre est encore soumis à d'autres agitations, dont nous avons déjà parlé sous le nom de *tempêtes magnétiques*. Nous allons justement nous occuper de ces tempêtes, parce qu'elles ont un rapport intime avec notre sujet.

Perturbations et tempêtes magnétiques.

Progrès apportés par l'Union magnétique de Göttingue. — On savait depuis longtemps que le magnétisme terrestre était soumis à des variations fortuites d'une nature particulière, à l'époque où, par suite des efforts de l'Union magnétique de Göt-

tingue, nos connaissances sur cette branche des sciences physiques prirent tout à coup un développement remarquable. Grâce à l'initiative d'Alexandre de Humboldt, on avait exécuté déjà, de 1828 à 1830, des observations simultanées sur les mouvements de l'aiguille de déclinaison en diverses contrées de la Terre. Ces observations montrèrent une grande concordance dans les mouvements constatés. Les résultats obtenus poussèrent à de nouvelles recherches. En 1834, à cette même époque où Gauss améliorait la méthode employée jusqu'alors aux observations, et où se fondait l'Union magnétique, on recommençait une série d'observations dans toute l'Europe. Ces observations se sont plus tard étendues jusqu'en Asie et en Amérique, ainsi qu'en plusieurs endroits de l'hémisphère sud. D'après les résultats fournis par ces observations, il est démontré que la plupart des tempêtes magnétiques observées dans l'Europe centrale se sont fait sentir presque simultanément sur la plus grande partie de la Terre. La grandeur des changements que subissent la direction et l'intensité du magnétisme terrestre est assez faible aux environs de l'équateur, et elle augmente à mesure que l'on s'approche des pôles.

Tempêtes magnétiques. — Décrivons quelques-unes de ces tempêtes.

Le 25 septembre 1841, le magnétisme terrestre subit une perturbation exceptionnelle, relative à la fois à la direction et à l'intensité. A Greenwich, on observa que les oscillations de l'aiguille aimantée furent occasionnées par des secousses violentes. Après chaque secousse dans un sens, l'aiguille s'arrêtait quelques secondes, puis le mouvement recommençait en sens contraire. Le même jour, on éprouva à Toronto (États-Unis d'Amérique), à 5200^{km} environ de Greenwich, une tempête magnétique remarquable.

Elle commença presque en même temps que celle de Greenwich, et les mouvements furent en général les mêmes. Une agitation semblable était observée à la même heure à Sainte-Hélène (7200^{km} de Londres et 9000^{km} de Toronto), au cap de Bonne-Espérance et en plusieurs points des Indes. Il est probable que cette perturbation magnétique eut lieu sur toute la Terre. Le même jour on vit des lumières polaires dans l'Amérique du Nord, en Angleterre, en Norwège et à la Terre de Van Diemen dans l'hémisphère sud.

Pendant l'aurore boréale du 2 septembre 1859, les mouvements de l'aiguille magnétique furent encore plus grands et plus remarquables. La tempête se fit sentir en Amérique, en Europe, dans l'Asie septentrionale et dans la Nouvelle-Hollande. A Toronto, les variations de la déclinaison atteignirent 3°45′ et celles de l'inclinaison dépassèrent 2°49′, car l'échelle sur laquelle on les mesurait devint insuffisante. A Rome, l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée fut de 4°13′ à l'est et de 4°13′ à l'ouest; le changement de l'intensité fut de $\frac{1}{8}$ de la force totale. A Paris et à Saint-Pétersbourg, les variations furent si considérables qu'on ne put les mesurer avec l'échelle ordinaire. A Christiania, le changement de l'intensité fut de $\frac{1}{13}$; à Melbourne, son changement fut de $\frac{1}{30}$ et celui de la déclinaison de 1°9′.

Ces exemples montrent clairement la force et l'extension des tempêtes magnétiques; mais, bien que les variations mentionnées soient rares, elles ne le sont que dans les contrées situées près de l'équateur.

Dans les régions polaires, des altérations semblables sont très fréquentes et la déclinaison varie souvent de 8° à 10°.

Pendant l'expédition polaire de 1868, nous eûmes plusieurs fois l'occasion de voir de semblables agitations. Souvent l'aiguille aimantée recevait une secousse si violente que les oscillations s'accomplissaient dans une étendue de 10° avec une telle rapidité que l'œil ne pouvait les suivre sur l'échelle à miroir; le mouvement ne s'arrêtait qu'après quelques minutes, en nous laissant tout le loisir de les observer. Cependant, il nous était presque toujours impossible d'enregistrer exactement les mouvements de l'aiguille, tant ils étaient irréguliers et en quelque sorte capricieux.

Ces phénomènes ont été observés par tous les explorateurs qui se sont occupés du magnétisme dans les régions polaires, quoique souvent confinés sur un espace restreint comme les aurores boréales.

Pendant l'expédition de la corvette *la Recherche,* on observa plusieurs fois les mouvements de l'aiguille aimantée aux jours fixés par l'Union magnétique de Göttingue. Les comparaisons faites entre ces observations et celles des contrées plus australes montrent que l'accord est peu sensible, et même qu'à certaines époques il n'en existe aucun. Des observations récentes ont démontré qu'une

grande partie des tempêtes magnétiques dans les régions arctiques ont une très petite étendue.

Résultats des recherches simultanées. — Les résultats que Sabine a obtenus concernant les perturbations, en comparant les observations qui ont été faites en plusieurs endroits dans les colonies anglaises, sont les suivants :

(*a*). L'apparition *simultanée* des perturbations est confirmée entre autres par les observations de Prague et de Breslau en Europe, et de Toronto et Philadelphie en Amérique; leur apparition s'est montrée en général accidentelle, mais elles sont toutes caractérisées par des altérations plus ou moins distinctes du magnétisme terrestre, qui ont été remarquées dans les stations les plus éloignées.

(*b*). Il est démontré que les perturbations, si irrégulières qu'elles soient, considérées une à une, sont, dans leurs effets moyens, des phénomènes distinctement périodiques. Elles suivent partout une loi qui dépend du vrai temps solaire. Cette loi regarde les perturbations dans chacun des éléments du magnétisme terrestre, si l'on prend la moyenne pour un grand nombre de jours.

Marche inverse des perturbations des deux côtés de la zone maximum. — En partageant ces perturbations de la déclinaison en perturbations de l'est et en perturbations de l'ouest, on aura :

Perturbations de l'ouest.

Max.	Min.	
7^h — 14^h	20^h — 22^h	Kew.
8^h	20^h — 23^h	Toronto.
6^h	20^h	Philadelphie.
8^h — 10^h	19^h — 1^h	Nertschinsk (Sibérie).
9^h — 11^h	23^h — 2^h	Pékin.

Perturbations de l'est.

Max.	Min.	
23^h	6^h — 16^h	Kew.
22^h	8^h — 15^h	Toronto.
20^h	8^h — 14^h	Philadelphie.
»	»	Nertschinsk.
»	»	Pékin.

Les régions polaires font ici une exception démontrée, d'une

très belle manière, par M. Wijkander, à l'aide des observations de 1872-1873 de Polhem, jointes à celles de Port-Kennedy et de Point-Barrow (20).

Perturbations de l'est.

	Max.	Min.
Port-Kennedy.....	9^h — 14^h	20^h — 4^h
Point-Barrow.....	8^h	16^h
Polhem.....	6^h	18^h — 20^h

Perturbations de l'ouest.

	Max.	Min.
Port-Kennedy.....	23^h — 24^h	5^h — 20^h
Point-Barrow.....	24^h	7^h — 17^h
Polhem.....	19^h	3^h — 11^h

Dans un Mémoire que vient de publier M. Wild (21) à Saint-Pétersbourg, il a étudié en détail une grande perturbation magnétique, avec les observations enregistrées à cinq observatoires différents. Il a réussi à montrer la marche de ce phénomène sur une grande partie de la surface terrestre. Le Mémoire est suivi de courbes représentant les variations de la déclinaison et de l'intensité horizontale et verticale aussi bien que celles de l'intensité totale. Une comparaison entre les courbes de Toronto ($43°39'$ latitude N.) et celles de Pawlowsk montre que la marche des variations en ces lieux s'est faite en sens contraire. Lorsque la déclinaison ou l'intensité augmenta à Pawlowsk, elle diminua à Toronto et *vice versa*. Aux stations méridionales, le phénomène montra la même marche qu'à Pawlowsk.

Nous trouvons donc que le sens des perturbations a changé, en ce que les perturbations de l'est dans les régions polaires remplacent celles de l'ouest, dans les zones tempérées, et *vice versa*. Les perturbations de l'intensité verticale et de l'inclinaison suivent la même loi, mais celle de l'intensité horizontale semble rester intacte.

Quant au nombre des variations des perturbations annuelles, il résulte des observations : qu'elles ont un maximum au mois de juin, un minimum au mois de décembre avec maximum secondaire en février et mars.

En comparant les résultats trouvés sur les perturbations magné-

tiques avec ceux que nous avons appris à connaître touchant la périodicité de l'aurore boréale dans les contrées arctiques, nous trouvons un accord très remarquable.

Similitude entre les oscillations des périodes de l'aurore boréale et la marche inverse des tempêtes magnétiques. — Les travaux de M. Tromholt nous ont appris que les périodes des aurores boréales dans les contrées arctiques se produisent en *sens contraire* avec celles des pays plus au sud. On voit par les recherches de M. Wijkander qu'il en est de même pour les tempêtes magnétiques. Lorsque les perturbations de déclinaison dans les contrées arctiques sont à l'ouest, celles des contrées méridionales sont à l'est et *vice versa*. Les résultats de M. Wijkander sont confirmés par les recherches de M. Wild.

Dans certains phénomènes météorologiques on a cru voir aussi la même marche en sens contraire, mais jusqu'à présent nos connaissances ne sont pas assez étendues pour que nous puissions l'affirmer. Le rôle que joue à cet égard la zone maximum des aurores boréales apparaît de plus en plus. Il est déjà presque certain que c'est dans cette zone que nous avons à chercher les véritables causes des perturbations magnétiques.

Courants telluriques.

Méthodes et observations. — Il y a longtemps que nous savons que des courants électriques circulent dans la Terre, mais ce n'est que dans ces derniers temps qu'on a porté sur ce phénomène intéressant une plus grande attention.

Barlow, le premier, fit en 1847 des expériences pour prouver l'existence d'un courant continu autour de la Terre. Il plaça un galvanomètre dans un circuit télégraphique et l'observa; mais les résultats qu'il obtint furent peu concluants. D'autres savants ont suivi son exemple avec plus ou moins de succès.

Résultats de Lamont et d'Airy. — Parmi les expériences les plus importantes, nous citerons celles de Lamont (22) faites à Munich au mois d'octobre 1859 et celles d'Airy exécutées en octobre 1867 et juillet 1868 à Greenwich (23) (Note VIII). En Bavière

comme en Angleterre on a suivi presque identiquement la même méthode, en plaçant dans la terre, à une certaine profondeur, des plaques de métal reliées entre elles par un fil métallique isolé. Ordinairement on dispose ces plaques en quatre points différents, de telle sorte que la direction des fils métalliques soit nord-sud (magnétique) et est-ouest.

Dans chacun de ces circuits, on place un galvanomètre très sensible. S'il existe un courant terrestre, l'aiguille du galvanomètre est déviée sous son action. Une telle déviation se produit toujours, mais elle peut provenir de plusieurs causes : elle peut être occasionnée par le contact des plaques avec la Terre ou par l'effet chimique de leur oxydation. Ce n'est que dans ces derniers temps qu'on a réussi à éliminer cette dernière action qui est fort nuisible, mais on a pu, par d'autres moyens, obtenir la certitude d'un courant terrestre : la déviation du galvanomètre ne reste pas la même; elle varie continuellement et l'on étudie ces variations pendant des temps plus ou moins longs. En comparant les déviations dans le circuit nord-sud avec celles de l'aiguille de déclinaison ordinaire, on voit qu'elles ont absolument le même caractère. Lamont a observé, par exemple, qu'une déviation à l'ouest de l'aiguille de déclinaison correspondait à une variation du galvanomètre annonçant un courant du nord au sud.

Il conclut de ces expériences qu'un courant électrique existe en réalité autour de la Terre, et qu'il ne résulte que de l'équilibre qui tend à s'établir entre les inégalités plus ou moins fortuites dans la distribution de l'*électricité statique* sur la Terre.

Les observations de Greenwich ont été calculées par Airy d'une manière originale, qui lui permettait de comparer les variations du courant nord-sud avec les variations de la composante magnétique nord et les variations du courant est-ouest avec celles de la composante ouest. Les résultats montrent un tel accord qu'il faut nécessairement supposer la même cause aux deux phénomènes. Il se présente cependant des singularités remarquables.

1° Les irrégularités sont plus nombreuses dans les variations du courant terrestre que dans celle du magnétisme.

2° Les variations du courant terrestre ont lieu (quelquefois jusqu'à une demi-heure) avant les changements correspondants du magnétisme terrestre.

Airy tire des résultats obtenus les conséquences suivantes :

(*a*). Qu'il est impossible d'expliquer par l'influence directe du courant terrestre *la partie principale du magnétisme terrestre;*

(*b*). Qu'on ne saurait encore dire avec certitude si les variations du courant terrestre sont la cause de la variation quotidienne;

(*c*). Qu'il est impossible, en considérant la concordance entre les courbes qui indiquent la marche des phénomènes, de ne pas conclure que *les perturbations magnétiques ont leur cause dans les courants galvaniques* de la Terre au-dessous de l'aimant.

Observations faites dans la Laponie finlandaise. — Pendant l'expédition de 1871 en Laponie, dont nous avons parlé dans notre préface, deux séries d'expériences ont été faites en suivant la méthode déjà décrite. L'une s'effectua à Kittilà, à 67° 40′ latitude N., depuis le milieu d'octobre jusqu'au commencement de novembre, et l'autre à Enare, par 68° 55′ latitude N., du 15 au 25 novembre.

Les résultats de ces expériences ont été les suivants :

1° A Kittilà, le galvanomètre manifesta une déviation annonçant très distinctement un courant terrestre marchant de l'est à l'ouest. Au contraire, dans la direction du nord au sud, le courant était très faible et tout au plus égal à $\frac{1}{20}$ du premier.

Pendant les aurores boréales, on observait dans cette déviation de grands changements, s'accordant du reste parfaitement avec les variations d'une aiguille de déclinaison observée en même temps.

Le courant accusé par l'instrument ne pouvait provenir d'aucune cause accidentelle, comme cela sera démontré plus loin.

2° A Enare, la déviation produite par le courant est-ouest fut si petite, que nous pûmes à peine la mesurer, et celle du nord-sud fut complètement nulle. Même au moment où l'aurore boréale était dans sa plus grande splendeur, nous ne distinguâmes pas le moindre changement du galvanomètre (1). L'aiguille de déclinaison était, comme toujours, très agitée. Nous avons continué pendant l'été de 1880 notre examen du courant avec de grandes plaques de zinc, ayant 10^{m} de longueur et $1^{m},2$ de largeur. Les résultats trouvés montrèrent que l'intensité du courant

(1) Notre galvanomètre avait une paire d'aiguilles astatiques.

terrestre était bien faible et que sa détermination présentait de grandes difficultés.

Pendant les années 1882-1883 et 1883-1884, des recherches sur le courant terrestre ont été faites à la station polaire finlandaise Sodankylà, et pendant la deuxième année 1883-1884 à Kultala, mais seulement en janvier, février et mars. La méthode employée était celle qui a été décrite plus haut.

Voici un résumé des résultats obtenus :

Les lignes établies au nord-sud et à l'est-ouest à Sodankylà avaient environ 5^{km} de longueur et aboutissaient à des plaques de platine enfouies dans la terre à une profondeur de $1^{m},3$. A Kultala, la ligne mesurait au nord-sud $2^{km},9$ et à l'est-ouest $4^{km},5$, aboutissant à des plaques de platine plongées dans l'eau de la rivière d'Ivalo et de ses affluents. La direction des lignes était aussi en cet endroit un peu différente. La ligne nord-sud formait avec le méridien magnétique un angle de 3° et la ligne est-ouest un angle de 69°. Dans chaque ligne était introduit un galvanomètre sensible.

1° A Sodankylà les variations étaient continuelles dans la ligne est-ouest et leurs grandeurs assez considérables. Dans la ligne nord-sud elles étaient plus petites et beaucoup moins fréquentes.

2° Les variations du courant terrestre ont un rapport intime avec les variations magnétiques.

3° Deux galvanomètres introduits dans deux lignes est-ouest parallèles, dont l'une était située à $2^{km},5$ plus vers l'est, donnent des déviations identiques, ce que démontre la *fig.* 7. Ceci prouve donc bien sûrement que les variations observées provenaient de changements dans la force électromotrice du courant terrestre.

4° Tandis qu'à Sodankylà les variations étaient grandes et nombreuses surtout dans la ligne est-ouest, à Kultala elles étaient au contraire très rares. Cette singularité, que j'ai déjà remarquée à Enare en 1871, me semble indiquer l'*existence d'une zone des courants terrestres, analogue à la zone maximum des aurores boréales*.

Cette zone, dans laquelle le courant terrestre se montre très variable, semble être un peu plus vers le sud que la zone maximum de l'aurore boréale dont sa situation dépend probablement.

Résultats de M. Wild. — Parmi les autres observations, dont

le nombre augmente tous les jours, nous citerons celles de M. Wild (24) en Russie et de M. Blavier (25) en France.

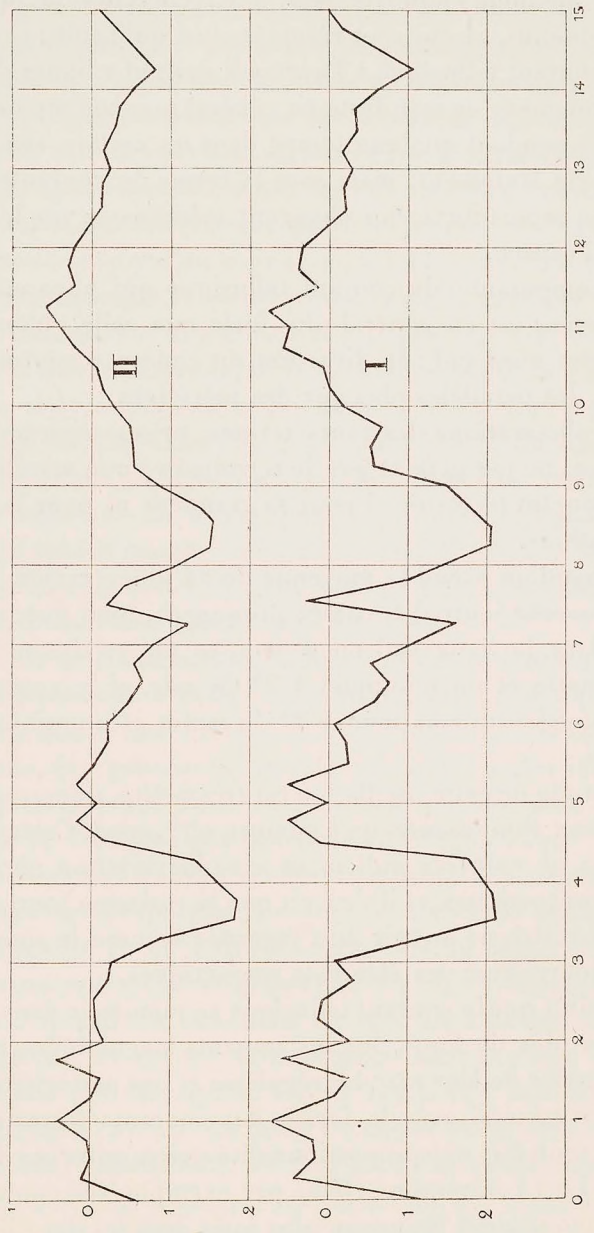


Fig. 7.

M. Wild a étudié le courant tellurique sur des lignes courtes au

nord-sud et à l'est-ouest à Pawlowsk en 1882-1884 et a trouvé un résultat qui est d'un grand intérêt pour la Science, aussi bien quant à la méthode employée pour ses recherches que quant aux résultats obtenus, et qui sont résumés ainsi qu'il suit :

1° Le courant tellurique à Pawlowsk dans nos lignes d'un kilomètre de longueur se manifeste en général non comme un courant qui marche pendant quelque temps dans un certain sens et dont la force varie lentement, mais sous la forme de courants alternatifs plus ou moins forts, qui changent même assez vite leur direction dans l'espace.

2° La composante du courant tellurique qui apparaît dans la ligne est-ouest est en général plus forte que celle qu'on observe dans la ligne nord-sud : la direction du courant s'approche donc chez nous des parallèles plus que des méridiens.

3° Les observations des jours termes, prises séparément pour chaque jour, ne permettent pas de reconnaître une marche journalière du courant terrestre ni pour sa grandeur ni pour la quantité des oscillations.

Mais quand on prend la moyenne de 24 jours termes, il en ressort une marche journalière assez prononcée, bien que petite. Le courant dans la ligne sud-ouest montre un maximum entre 4^h à 5^h du matin et un minimum à 8^h du soir, et le courant de la ligne ouest-est a un maximum à 8^h du matin et un minimum à 1^h après midi.

L'amplitude de cette oscillation est très petite, ne correspondant pour les deux composantes qu'à environ 0^{volt},0008. Cette variation journalière ne coïncide nullement avec la variation normale des éléments magnétiques, et il s'ensuit que la variation journalière du courant terrestre ne saurait être regardée comme la source de la variation journalière des éléments magnétiques.

4° Aussitôt que le courant tellurique se manifeste dans les deux lignes avec plus de force, les instruments magnétiques commencent à s'écarter de leur marche régulière et ces perturbations augmentent en général avec la forme des courants terrestres, sans qu'il y ait toutefois une proportionnalité stricte entre ces deux phénomènes. Le 15 novembre 1882, par exemple, les courants terrestres se montraient beaucoup plus forts dans les deux lignes que le 1er mars 1883, et pourtant la marche des instruments magnétiques,

le premier de ces jours, était beaucoup plus irrégulière que ce dernier jour.

5° Si l'on compare, comme l'a déjà fait M. Airy pour les observations semblables à l'observatoire de Greenwich, le courant dans la ligne sud-nord avec les variations de la déclinaison et le courant dans la ligne est-ouest avec les variations de l'intensité horizontale, on trouve souvent, surtout pour des variations un peu lentes, une égalité parfaite entre ces deux sortes de perturbations, mais la variation du courant précède toujours la variation du magnétisme terrestre d'au moins cinq minutes, de sorte que le courant apparaît comme la cause primaire de la dernière variation. Aussi le mouvement des aimants des appareils magnétiques est toujours tel que le demanderait la loi fondamentale de l'électromagnétisme, si le courant de la Terre avait une influence directe sur les aimants. Si, par exemple, un courant positif du nord au sud se manifeste dans la ligne nord-sud, la déclinaison occidentale de l'aiguille augmente en même temps, et si dans la ligne est-ouest un courant positif marche de l'est à l'ouest, l'intensité horizontale du magnétisme terrestre devient plus grande, c'est-à-dire que le pôle nord du bifilaire marche vers le nord.

Le *retard* qu'éprouvent les indications des instruments magnétiques relativement à celles du galvanomètre s'expliquerait par l'hypothèse que le courant terrestre, qui influence immédiatement les aimants des galvanomètres, ne réagirait sur les instruments magnétiques que par l'aimantation des couches plus ou moins grandes de la Terre, ce qui demande un certain temps.

6° Ce retard dans l'effet du courant tellurique sur les instruments de variation sert à expliquer, au moins en partie, le manque d'une proportionnalité stricte entre les variations du courant et des éléments magnétiques. On remarque que la proportionnalité fait surtout défaut quand les variations du courant sont très fréquentes et alternatives, et qu'elle devient plus complète aux jours des perturbations non brusques. Or on comprend facilement que, dans le premier cas, les courants passagers et de sens contraire, qui se suivent rapidement, se détruiront en partie par l'aimantation de la Terre, de sorte que les variations des instruments magnétiques seront relativement plus petites. Les observations mentionnées le 15 novembre 1882 et le 1er mars 1883, ainsi que les

courbes enregistrées par le magnétographe, servent à appuyer cette explication. Les courbes enregistrées le 1er mars démontrent, par la netteté des lignes tracées, une marche relativement tranquille des aimants, bien que les perturbations lentes aient été assez grandes, et en conséquence les courbes dessinées d'après les lectures des galvanomètres ne sont pas très accidentées, et celles du courant sud-nord très semblables aux courbes de l'unifilaire, celles du courant est-ouest très concordantes avec les enregistrements du bifilaire. Par contre, les deux sortes de courbes du 15 novembre n'offrent que très peu de concordance entre elles, et, quoique les variations des deux courants soient très grandes et rapides, les enregistrements du magnétographe, comme les observations directes des instruments magnétiques, ne présentent pas de grandes perturbations; mais, en examinant de plus près les courbes enregistrées, on y remarque très bien les traces d'une oscillation permanente des aimants entre de petites limites.

Nous pouvons donc conclure que les courants telluriques sont toujours la cause primaire des perturbations magnétiques, mais non des variations périodiques des éléments magnétiques.

Observations de M. E. Blavier. — Les recherches de M. E. Blavier sont d'un très grand intérêt, surtout parce qu'elles ont été faites sur des lignes de longueurs différentes. Des lignes longues et courtes donnent toujours des résultats sûrs quant aux variations du courant tellurique, si l'on prend seulement quelques précautions. Ces recherches démontrent que la nature et la forme de la Terre, qui se trouve entre les extrémités des lignes, n'exercent aucune influence sensible sur les variations. Il semble aussi qu'il soit indifférent d'expérimenter sur des lignes aériennes ou souterraines. Les limites de notre Mémoire ne nous permettent pas d'entrer dans une analyse plus détaillée de ces recherches.

Nous aurions désiré que les courbes enregistrées nous eussent permis de tirer des conclusions concernant le *retard* de la variation magnétique découvert par Airy, c'est-à-dire que les variations du courant terrestre précèdent le plus souvent les variations magnétiques, ce qui a été confirmé par M. Wild. Ce même fait semble aussi vérifié par les observations de l'expédition finlandaise

en Laponie. Un examen des courbes qui, dans l'Ouvrage de M. Blavier, représentent les variations des courants telluriques, montre en effet que ce retard est arrivé dans plusieurs cas. Ainsi, en comparant les variations dans la ligne de Paris-Dijon avec les variations des déclinaisons du Parc Saint-Maur, nous trouvons, pour le 5-6 novembre, une forte variation entre 6^h et 9^h de l'après-midi. Le courant indique, comme presque toujours, des variations dans des sens contraires.

Le courant positif a pourtant été beaucoup plus intense, d'après l'examen de la courbe. La courbe de la déclinaison accuse aussi une variation, mais elle est arrivée plus tard. Le 1-2 novembre, il y a entre minuit et 3^h deux fortes variations dans le sens négatif, qui précèdent aussi la variation de la déclinaison. Il en fut de même le 12-13 novembre entre 6^h et 9^h.

Il faut se figurer que le courant, agissant d'abord sur la Terre, l'aimante et qu'ensuite celle-ci agit sur les instruments de variation magnétique : la loi électromagnétique serait alors accomplie.

En général, ce retard se manifeste sur les courbes de déclinaison, mais on ne le voit pas clairement sur les courbes d'intensité, parce qu'elles ont, selon nous, trop peu d'étendue pour le bien montrer. Toutefois pour que ce *retard* s'accuse nettement, il faut que les variations soient lentes; car, comme M. Wild l'a fait voir, il est clair que des courants de sens contraires en se suivant très rapidement doivent s'annuler.

Conclusion : *Les courants telluriques sont la cause primaire des perturbations magnétiques.* — Comme résultat général de toutes ces recherches, nous pouvons conclure que les courants telluriques ont un rapport intime avec les perturbations magnétiques et que celles-là ont, en effet, leur cause première, au moins dans la plus grande partie des cas, dans ces courants telluriques.

Nous savons déjà que les aurores boréales sont liées étroitement avec ces deux phénomènes. Nous y reviendrons plus loin.

Théorie du magnétisme terrestre.

Diverses théories proposées. — Diverses théories ont été proposées pour expliquer les phénomènes magnétiques.

Elles se divisent en deux classes : les unes considèrent le magnétisme comme produit par la présence d'un ou plusieurs aimants situés au centre de la Terre; les autres admettent que les couches inférieures de notre globe sont douées de propriétés magnétiques.

Toute théorie pour être complète doit d'abord tenir compte :

1° De l'état magnétique actuel de la Terre;

2° Des variations séculaires et quotidiennes;

3° Des altérations accidentelles ou tempêtes magnétiques.

Quand on se rappelle que la Terre possède plusieurs points où la force magnétique subit des variations considérables, on reconnaît que la supposition d'un aimant central et unique est inacceptable. Tout au plus pourrait-on expliquer l'état magnétique terrestre par l'existence de deux aimants; mais le magnétisme terrestre n'exerçant qu'une force dirigeante et non pas une force attractive ou répulsive, il serait nécessaire de supposer ces aimants situés à l'intérieur de la Terre, près de son centre et de part et d'autre de celui-ci. Il faudrait, en outre, admettre que les aimants terrestres sont très courts relativement à l'axe de la Terre. Pour expliquer les variations séculaires, le système devrait être mobile, c'est-à-dire tourner autour d'un axe fixe. — Un tel système ne peut exister en réalité, parce que l'intérieur de la terre est dans un état de fusion ignée, et l'on sait que tous les corps portés à une très haute température perdent leur magnétisme.

Théorie mathématique de Gauss. — Ces deux aimants n'ont donc qu'une existence hypothétique et réellement ne sont qu'une représentation imaginée de l'état magnétique total de la Terre. — Nous entrons ainsi dans la théorie mathématique de Gauss, qui admet que chaque partie du globe contribue à la constitution magnétique de celui-ci. Au lieu de chercher le siège du magnétisme terrestre, Gauss se demanda comment la Terre devait être constituée au point de vue magnétique pour permettre d'expliquer tous les phénomènes qu'on y constate. Son hypothèse établissait dès le début la loi générale de l'action magnétique terrestre, et, comme le magnétisme n'est pas également distribué, Gauss détermina cette distribution en utilisant les résultats expérimentaux précédemment obtenus. Il obtint alors une formule mathématique au moyen de

laquelle on peut calculer l'action du magnétisme terrestre sur un aimant situé en un point quelconque de la surface de la Terre et en déterminer très exactement les trois composantes de la force magnétique (Note VII).

Nous voyons que Gauss nous a donné une théorie mathématique, mais non une explication physique des phénomènes magnétiques.

Magnétisme permanent ou courants galvaniques. — En effet, cet état magnétique de la Terre peut provenir aussi bien du magnétisme permanent que de courants galvaniques circulant autour du globe. En supposant que son origine est dans un magnétisme permanent dont le siège est situé à l'intérieur de la Terre, ou dans une couche ferrugineuse placée au-dessous de sa surface, on se heurte toujours contre la difficulté d'expliquer les variations séculaires et quotidiennes. En outre, il faut se livrer, relativement à la constitution de la croûte terrestre, à de nouvelles hypothèses, sinon hors des limites de la possibilité, du moins qui ne sont appuyées sur aucune observation. Si réellement le noyau intérieur de la Terre est dans un état de fusion ignée, il ne peut pas être magnétique, et le magnétisme aurait alors son siège exclusivement dans la partie voisine de la croûte. Mais cette croûte étant solide, son état magnétique reste immobile; les variations séculaires deviennent donc inexplicables. On a aussi pensé à tenir compte du mouvement de rotation, pour admettre que le refroidissement continuel de la Terre devait produire des changements dans la disposition magnétique de la croûte. Or, même en acceptant ces hypothèses, nous ne pouvons pas nous rendre compte de la régularité si grande des variations séculaires.

Si l'on veut expliquer les changements dans l'état magnétique de la Terre par l'influence du Soleil, on objectera que le Soleil n'est pas plus magnétique que le feu central du globe, sa température étant excessivement élevée, comme l'ont montré les observations récentes.

Heureusement il nous reste encore une explication, celle qui résulte des courants électriques. Aussitôt que l'on connut l'influence d'un courant sur l'aiguille aimantée, et surtout dès qu'Ampère eut prouvé que tous les phénomènes magnétiques peuvent

être expliqués par des effets de courants galvaniques, on se hâta de donner la même explication au magnétisme terrestre. En effet, nous avons précédemment fait remarquer que la théorie de Gauss laissait à décider la question de savoir si le magnétisme terrestre provenait d'un état magnétique spécial du globe, ou bien des courants électriques, et qu'elle pouvait parfaitement s'adapter à l'un ou l'autre cas.

Déjà, en 1830, Barlow répéta des expériences avec une sphère en bois d'un grand diamètre autour de laquelle il fit passer un courant électrique, et les résultats obtenus l'autorisèrent à conclure que les phénomènes produits par le magnétisme terrestre pouvaient être attribués aux effets des courants ; nous adopterons donc en général cette manière de voir et nous allons présentement nous occuper de la question : D'où viennent ces courants électriques et comment peuvent-ils produire l'état magnétique de la Terre?

Un seul système magnétique ; conséquences de la théorie de Gauss. — Quelles que soient les irrégularités qui se manifestent dans le magnétisme terrestre, il est facile de voir que tous les faits isolés sont dus à un seul et même système magnétique.

Cette idée deviendra plus nette encore par la théorie de Gauss, car, même s'il y a de petites différences entre la théorie et l'expérience, il faut pourtant avouer que l'accord est plus que suffisant pour montrer que l'hypothèse était juste.

Nous pouvons, par conséquent, accepter avec confiance les conclusions générales qui résultent de cette théorie.

Il n'y a que deux manières d'expliquer les faits observés : ou bien il faut regarder la Terre comme une bobine dont les spires sont parcourues par un courant, ou bien comme un électro-aimant.

Ces deux suppositions sont les seules qui s'accordent à expliquer les variations séculaires du magnétisme terrestre. La théorie de Gauss va nous dire à laquelle des deux il faut donner la préférence.

Dans son Mémoire, Gauss décompose la force magnétique du globe en trois composantes rectangulaires qui sont : la composante nord, la composante ouest et la composante verticale.

En supposant que le siège du magnétisme terrestre soit à l'intérieur de la Terre, on obtient pour les trois composantes des va-

leurs qui s'accordent étroitement avec les dates observées. En plaçant, au contraire, le siège du même magnétisme hors de la Terre, on obtient pour la composante nord et la composante ouest des expressions qui s'accordent avec les observations, mais non pour la composante verticale, qui aura une valeur toute contraire aux dates observées selon les calculs numériques de Gauss. Rien n'empêche cependant qu'une petite partie de cette force puisse exister hors de la Terre. Nous avons donc là une raison importante de ne pas placer le magnétisme terrestre hors de la Terre. Il y en a encore une autre à laquelle nous devons donner la même importance, quoique l'exposé en soit un peu long.

Siège du magnétisme terrestre. — En supposant que le siège du magnétisme terrestre se trouve hors de la Terre, on ne peut le chercher que dans les courants galvaniques permanents, « si, comme dit Gauss, on veut exclure des fantaisies sans fondement ; bien que nous ne connaissions pas l'existence de tels courants, notre ignorance ne les empêche pas d'exister ».

En supposant qu'ils existent dans l'espace limité entre deux surfaces concentriques autour de la Terre, nous comprendrons aussitôt qu'ils ne peuvent pas rester sans effet sur la Terre elle-même. Pour prouver ceci clairement, nous allons exposer en peu de mots les qualités dont la Terre doit être douée, d'après nos connaissances actuelles, pour que les lois physiques connues soient satisfaites.

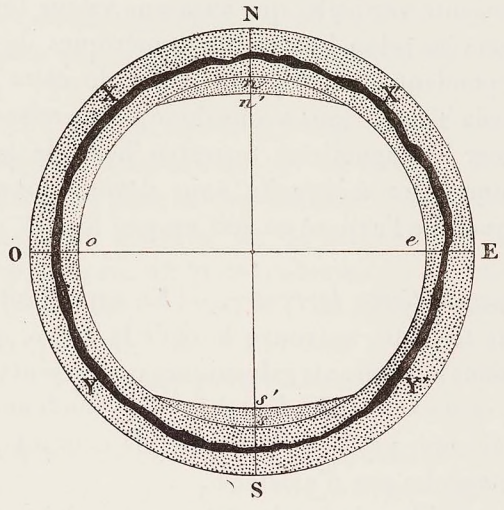
En ce qui concerne la structure intérieure de la Terre, nous savons peu de chose, mais ce que l'expérience nous a révélé est d'une certitude parfaite et nous permet de tirer certaines conclusions importantes à notre sujet.

La croûte terrestre et la couche magnétique. — On admet que le globe terrestre est constitué par un noyau central entouré d'une croûte ou écorce solide. Parmi les substances qui entrent dans la composition de cette croûte, les corps magnétiques peuvent être évalués aux 0,02 de la masse; mais, quoique inégalement répartis, ils forment cependant un corps magnétique.

La *fig.* 8 donne une idée de la forme de cette croûte solide. Le cercle extérieur NOSE représente la surface terrestre ; *nose* une

autre surface limitant le noyau incandescent. Aux environs des pôles où la solidification s'est propagée plus loin dans l'intérieur

Fig. 8.



qu'aux environs de l'équateur, la surface intérieure doit avoir la forme indiquée par $n'os'e$.

Les lois connues de l'accroissement de la température quand on pénètre à l'intérieur de la Terre nous autorisent à supposer que l'épaisseur de la croûte solidifiée doit être au moins de 50^{km}. Notre figure la représente assez agrandie.

Chacune des particules qui peut être aimantée possède une valeur magnétique, déterminée par la position qu'elle occupe dans la croûte terrestre.

Nous pouvons alors nous imaginer que toutes ces particules sont groupées suivant leurs valeurs magnétiques sur une couche mince renfermée entre les deux surfaces intérieures et extérieures, comme le montre la courbe irrégulière XYY'X'.

Nous savons par des recherches assez étendues qu'une telle couche creuse possède, au point de vue magnétique, presque les mêmes propriétés que si elle était entièrement solide.

La couche magnétique est aimantée par des courants provenant de la rotation de la Terre dans l'espace. — Les courants

galvaniques, supposés situés hors de la Terre, doivent donc agir sur la couche creuse en l'aimantant, et comme l'effet d'une telle couche magnétique sur une aiguille mobile est, selon notre expérience de l'électromagnétisme, assez grand comparé à l'action directe des courants, il en résulte que le siège du magnétisme terrestre doit se trouver en plus grande partie dans la Terre elle-même.

On voulait autrefois trouver ces courants dans la croûte terrestre, c'est-à-dire, dans ce phénomène que nous avons appelé le *courant tellurique*. Les expériences faites de nos jours montrent cependant que cette supposition n'est point admissible; d'abord le courant terrestre est trop faible pour produire tout le magnétisme terrestre et il subit des changements si grands, que la force magnétique entière du globe serait à certains moments non seulement annulée, mais tout à fait renversée. Ce courant ne peut produire, comme nous l'avons vu, que les perturbations magnétiques. Il faut donc chercher ailleurs les causes qui produisent les grands phénomènes de l'aimantation de la Terre (Note IX).

L'exposé de ces causes que nous avons proposées nous conduirait trop loin, et nous nous bornons à dire qu'elles doivent, sans doute, résulter de la rotation de la Terre dans l'espace. Nous avons essayé de le démontrer, par des expériences et par des calculs, dans un Mémoire sur les causes du magnétisme terrestre (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, juillet 1880).

CHAPITRE VI.

EFFETS ET NATURE DE L'AURORE POLAIRE.

Effets sur les fils télégraphiques.

Les aurores polaires ont une influence très marquée sur les fils télégraphiques, non seulement dans les hautes régions arctiques, mais aussi dans les contrées situées à des latitudes plus basses, lorsque ces lumières ont une étendue suffisante. Pendant la durée du phénomène on ne peut, en général, faire usage du télégraphe : des courants électriques circulent dans les fils avec une telle force que les instruments fonctionnent spontanément et d'une manière tout à fait irrégulière.

Pendant la grande aurore boréale du 2 septembre 1859, les courants furent si intenses et d'une durée tellement prolongée, qu'on put s'en servir aux États-Unis pour envoyer des signaux d'une station à une autre. Ce fait prouve parfaitement que, sous l'action de la lumière polaire, il se développe un courant électrique capable de remplacer celui d'une pile ordinaire et ne différant de ce dernier que par des variations plus fréquentes. Les courants électriques provenant des deux grandes aurores boréales du 28 août et du 2 septembre 1859 marchaient dans la direction du nord-est et du sud-ouest. Les mêmes influences furent observées dans plusieurs stations d'Europe. En Suisse, on mesura les courants avec un galvanomètre qui indiqua une intensité trois fois plus grande que celle du courant produit par une pile ordinaire. A cette occasion, on constata la présence de courants se dirigeant dans des directions opposées : l'un allait du nord au sud et se confondait à peu près avec le méridien de la contrée ; il était, en outre, d'une intensité et d'une durée doubles de celles du courant opposé du sud au nord.

On fit aussi en Angleterre, pendant la durée des lumières polaires, des observations soignées sur les courants passant dans les fils télégraphiques. Elles montrèrent qu'un courant électrique traversa toute l'Angleterre sur une étendue indéterminée du nord-est au sud-ouest. Parfois il est arrivé que le courant avait une intensité si considérable qu'on a pu faire jaillir, des appareils télégraphiques, des étincelles et même donner des commotions.

Toutes ces observations montrent assez clairement l'origine électrique de la lumière polaire; les exemples que nous venons de citer ne sont pas les seuls, et il est facile de répéter les mêmes observations chaque fois que des grandes aurores polaires se développent dans le ciel.

Nature de la lumière produite par l'aurore boréale.

Analyse spectrale. — Lorsque nous avons décrit l'aurore boréale, nous avons parlé des couleurs qui la distinguent et dont les plus fréquentes sont le jaune pâle, le rouge, le vert pâle et le violet. Quand le ciel est sans nuages, ces couleurs sont d'une pureté et d'une délicatesse qui charment l'œil; mais leur étude n'est véritablement féconde que si l'on applique au phénomène l'analyse spectrale.

Un grand nombre d'observateurs ont employé à différentes occasions le spectroscope pour analyser la constitution de la lumière polaire. Ångström fut le premier qui s'en servit en 1866. Il observa et détermina d'abord *une raie* située entre le jaune et le vert; plus tard, il en découvrit de nouvelles. La première, appelée la raie jaune, et dont la longueur d'onde est de 5569 à 5579 dix-millionièmes de millimètre, est tellement caractéristique de la lumière polaire qu'elle est visible même quand on ne peut découvrir à l'œil nu aucune autre trace de lumière. L'analyse spectrale est donc la méthode la plus sensible à employer, pour reconnaître si une lumière est ou n'est pas de la nature de celle des aurores boréales. En outre, nous avons remarqué à diverses reprises que *la lumière de cette raie,* au lieu d'être immobile, ressemble le plus souvent à un courant lumineux, ce qui ferait supposer une source de lumière qui ne serait pas continue (26) (Note X).

Spectres de l'aurore boréale accompagnés des spectres de l'air raréfié.

OBSERVATEURS.	NUMÉROS d'ordre	RAIES DE L'AURORE boréale. Longueur d'onde.	RAIES DE L'AURORE boréale. Intensité d'après Herschel 0-25.	RAIES de Fraunhofer entre lesquelles sont les raies de l'aurore boréale.	RAIES DANS L'AIR RARÉFIÉ. Dans l'appar. de l'aurore boréale. Long. d'onde.	DANS LES TUBES DE GEISSLER. D'après Vogel. Long. d'onde.	D'après Vogel. Intensité 0-10.	D'après Sundell. Long. d'onde.	D'après Sundell. Intensité 0-10.
P. Smyth...		6350							
Barker.....		6300-6230							
Vogel.....	1	6297*	0-4-8	Entre C et D.					
Zönner		6279*						6150	0-1
Backhous...		6060						6090	0-1
A. Clarke...		5690						6058	1
Backhous...		5600-5570						5904	
Barker		5620-5550						(5785)	4 Duplex (Hg).
Wijkander et Parent....	2	5572*	Raie caract.					5691	2
Vogel.....		5571*						5600	2
Lemström...		5569*							
Ångström...		5567*							
»	»	»	25	D-E.	5580			(5475)	10 (Hg).
Vogel.....		5390*			5426			5403	1 bande.
Wijkander..		5359*				5320		5352	1 b. large.
Barker.....	3	5330	?						
A. Clarke...		5320							
Wijkander..		5289-5239*							
Lemström...	4	5275-5235*	0-2-6			5200	4	5272	1 bande.
Vogel.....		5233-5189*				5184	5	5189	5 b. large.
Ångström...		5210*							
Winlock....	5	5200		Près de E.					
Backhous...		5180-5165							
Barker.....		5170			5126				
Barker.....		5020-4990						5074	4 b. large.
Backhous...	6	5015-4980*							
Ångström...		5010*	0-2-8						
Vogel.....		5004*				5003	1		
Wijkander..	7	4996*		Entre E et F.					
Lemström ..		4991-4958*						4978	1 bande.
Barker		4930-4820				4941	4	4917	2 »
Ångström...	8	4870	0-4	Près de F.					
Wijkander..		4846*						4824	3 »
A. Clarke...		4850*							

Spectres de l'aurore boréale accompagnés des spectres de l'air raréfié. (Suite.)

OBSERVATEURS.	NUMÉROS d'ordre.	RAIES DE L'AURORE boréale. Longueur d'onde.	RAIES DE L'AURORE boréale. Intensité d'après Herschel 0-25.	RAIES de Fraunhofer entre lesquelles sont les raies de l'aurore boréale.	RAIES DANS L'AIR RARÉFIÉ. Dans l'appar. de l'aurore boréale. Long. d'onde.	DANS LES TUBES DE GEISSLER. D'après Vogt. Long. d'onde.	D'après Vogt. Intensité. 0-10.	D'après Sundell. Long. d'onde.	D'après Sundell. Intensité 0-10.
Barker		4740-4670						4749	3 b. large.
Ångström...		4720			4717			4669	
Lemström ..		4713-4686*	3-6	Entre F et G.		4698	2		
Vogel.....	9	4694-4629*				4675	4		
Wijkander..		4692*				4661	4		
Backhous et Winlock..		4640-4625*			4576			4586	2 b. large.
								4503	
Wijkander..		4366*				4368	3	(4359)	7 (Hg b.)
A. Clarke...	10	4350			4345	4351	4		
Backhous...		4320-4305*	0-6						
Barker et Winlock..		4310							
Wijkander..		4280*			4274			4274	2 b.
Lemström ..	11	4274-4256*	?	Près de *h*.		4230	2	4192	1 b. large.
Rowland....		4250*				4123	3		
N.Oettingen.		4240*							
					4205				
Lemström...	12	4112	?		4051			4065	1
								4000	
					3993				
					3892				*V.* Note XI. (27)

Nous donnons dans le Tableau ci-dessus le résumé des analyses spectrales faites dans ces derniers temps, en marquant d'un astérisque les déterminations que nous estimons comme les plus exactes parce qu'elles ont été faites dans des circonstances favorables.

On remarquera que *douze* raies peuvent en général apparaître dans l'aurore boréale.

Le Tableau contient aussi les raies obtenues dans l'air raréfié, soit avec l'appareil de l'aurore boréale, soit dans un tube de Geissler, ce qui permet de comparer la position de ces raies avec celles de l'aurore boréale.

La concordance entre les différentes déterminations est loin d'être parfaite; on doit attribuer la différence entre les mesures à plusieurs causes : la faiblesse de la lumière, une durée trop courte du phénomène, la défectuosité des instruments, une différence entre les méthodes employées, etc.

Les raies les plus brillantes n^{os} 2, 5, 7, 9 et 11 existent le plus souvent au moins dans les régions polaires. La raie 1 n'a pas été observée dans les régions arctiques, bien que des lumières polaires d'un rouge de sang n'y soient pas rares. La raie 12 n'a été vue qu'une seule fois en Laponie, et dans des circonstances très défavorables. La détermination de la longueur d'onde n'est donc qu'approximative. Nous verrons qu'elle doit, en réalité, exister dans la lumière polaire, mais partagée en deux.

Signification des raies du spectre de l'aurore boréale. — Cherchons maintenant quelle peut être la signification de ces bandes spectrales dans la lumière polaire.

Il résulte de nos connaissances qu'un spectre offrant des raies lumineuses ne peut provenir que d'un corps gazeux incandescent. Le gaz que l'atmosphère contient au moment où les lumières polaires se produisent deviennent donc incandescents, et nous verrons plus tard que ce fait est une preuve importante de l'origine électrique de la lumière polaire.

La richesse en rayons violets que présente l'aurore boréale peut faire supposer qu'il est facile de reproduire par la photographie son image. Malheureusement les essais nombreux tentés par l'expédition finlandaise et par d'autres observateurs n'ont rien donné, quoiqu'on ait employé les plaques les plus rapides au gélatinobromure.

Cela tient peut-être à la faiblesse extraordinaire que cette lumière présentait pendant les années 1883-1884.

Propriétés fluorescentes. — Certains corps ou solutions de corps, tels que le sulfate de quinine et le cyanure double de platine et de potassium, par exemple, jouissent de la propriété remarquable de changer la couleur des rayons lumineux qui les traversent. Il en résulte qu'eux-mêmes paraissent être lumineux. Ce phénomène de fluorescence consiste en ce que les longueurs

d'onde s'agrandissent en traversant les corps dits *fluorescents*. Dans ces conditions, une goutte de sulfate de quinine, éclairée par l'aurore boréale, se détache brillante sur un fond sombre. Le même phénomène se produit avec un cristal de cyanure double de platine et de potassium, ainsi que l'a montré d'une manière frappante M. Robinson, en Amérique, pendant une aurore boréale fort belle qui se produisit le 14 mars 1858. Les cristaux de cyanure étaient renfermés dans un tube de verre muni d'une étiquette de papier blanc : à une certaine distance, la lumière d'une lampe ne permettait pas de distinguer l'étiquette, mais, dès que les cristaux furent éclairés par l'aurore boréale, l'étiquette apparut presque noire sur un fond lumineux.

Nous avons cherché à établir les principaux faits sur lesquels repose l'explication scientifique du phénomène que nous étudions. Il nous reste maintenant à en exposer la théorie, dont la valeur réelle sera appréciée d'autant plus qu'elle sera la véritable expression des faits directement observés.

Avant de traiter cette partie théorique, nous allons donner un exposé succinct de la signification du phénomène pour les habitants des contrées polaires, et de quelques circonstances, qui sont propres aux mêmes endroits et qui ont exercé une influence sur l'opinion du peuple quant à l'aurore boréale. Puisque cette opinion est quelquefois citée, elle ne doit pas être tout à fait rejetée et il nous semble utile de faire connaître les causes qui y ont contribué.

Illusions produites par les longs crépuscules et les lueurs polaires.

Dans la longue nuit des contrées polaires, lorsque le Soleil reste plusieurs mois au-dessous de l'horizon, la Lune et les étoiles sont les seules sources de lumière pour ces endroits.

Toute augmentation de lumière produite par la nature doit être bienvenue des habitants de ces contrées-là.

Ainsi les aurores boréales, avec leurs lumières vives et variables et leur apparition subite et inattendue, amènent une variation

agréable. Cependant on ne saurait prétendre qu'elles contribuent dans un degré appréciable à remplacer la lumière du Soleil, car le phénomène est toujours faible et passager.

Elle commence d'ordinaire comme une lueur à l'horizon, d'où se dégagent bientôt de longs rayons vivement colorés, qui s'étendent quelquefois sur tout le firmament, pour disparaître et reparaître jusqu'à ce qu'ils s'éteignent définitivement après quelques minutes. Le phénomène est le plus souvent si mobile qu'on en demeure stupéfait. Ses couleurs vives et brillantes charment l'œil, mais la rapidité de ses changements de forme a quelque chose d'inquiétant pour quiconque ignore que l'aurore boréale est parfaitement inoffensive.

Le peuple même des régions arctiques aime la lumière polaire, bien qu'il la regarde comme une manifestation surnaturelle. Il l'admire quand, éclairé par la Lune et les étoiles, il traverse les glaciers de quelque chaîne alpestre ou la surface glacée des lacs immenses. Son admiration, cependant, est mêlée d'un certain effroi, et, bien que séduit par l'éclat du spectacle, il se trouble à la vue de cet embrasement subit dont il ignore l'origine et les causes.

La douce lumière qu'on voit souvent dans les contrées polaires, et qui est de la nature de l'aurore boréale, est d'une grande utilité dans les voyages nocturnes. Dans cette lumière, on peut très bien distinguer les formes des objets environnants et se frayer un passage dans les sentiers non battus.

Cependant la fréquence de cette lumière n'est guère la même tous les ans; elle semble dépendre du caractère général météorologique de l'année. Pendant l'année 1882-83, cette lumière se montrait presque chaque soir du mois de novembre jusqu'en janvier, tandis qu'elle apparaissait très rarement en 1883-84. Le nombre des aurores boréales n'était alors que $\frac{1}{10}$ du nombre normal, bien que nous nous trouvions au milieu d'une période maximum; mais aussi, sous d'autres rapports, le phénomène montrait un changement surprenant. Les années 1868 et 1871 nous donnèrent l'occasion d'observer les couleurs les plus vives et les plus variables. Déjà en 1882-83, les couleurs étaient beaucoup plus uniformes et l'année suivante il ne se manifestait, à peu d'exceptions, qu'une lumière jaune blanchâtre. Par là il faut conclure que les observations d'une année ne suffisent jamais pour *caractériser* un endroit

quant à l'apparition de l'aurore boréale, car une année ne ressemble pas à l'autre, même si elles sont toutes les deux des années de maximum ou de minimum.

Les observations devraient toujours comprendre une période de 11 ans ou, ce qui serait encore mieux, une période de 56 ans. Cependant ceci ne se réalisera pas de sitôt dans ces contrées-là.

Chacun de nos lecteurs sait comment le crépuscule se joue de notre imagination ; les objets les plus ordinaires prennent souvent des formes extravagantes et il n'est pas rare qu'un innocent buisson se présente sous la forme d'un loup. Dans les contrées polaires, où le crépuscule dure quelquefois plusieures heures, il est naturel que cet état de choses arrive très souvent.

Les membres de l'expédition polaire finlandaise gravirent un jour une montagne pour l'examiner de plus près. La montagne était garnie de petits bouleaux rabougris, pour le moment couverts de givre, qui, dans ces contrées, se développe d'une manière dont nous n'avons qu'une faible idée dans les contrées plus méridionales. Ce givre se forme quelquefois pendant un temps bien court. Le séjour à la montagne durait à peu près une heure et pendant ce temps le crépuscule avait beaucoup augmenté. Pendant la descente, ces arbres couverts de givre montraient les formes les plus extraordinaires. Ce qui est singulier, c'est que tous les objets se présentaient sous la même forme pour chacun des spectateurs. On pouvait s'approcher à quelques pas sans que l'illusion disparût. Il y avait des statues (entre autres la Vénus de Milo), des monuments, des visages grimaçants, etc. Un des spectateurs prétendait que les sorciers et les sorcières étaient en route vers le nord et se reposaient pour le moment sur la montagne.

Ces formes-là peuvent se développer d'une manière encore plus singulière dans la faible lumière boréale phosphorescente dont nous avons souvent parlé.

Dans un voyage de Sodanhylà à Kultala avec M. Granit et trois aides nous fîmes, sous ce rapport, des observations bizarres. Le voyage, qui se fit avec des rennes, avait duré vingt-quatre heures sans interruption et, le soir du 24 décembre, nous nous trouvâmes sur les montagnes près de la rivière d'Ivalo. Toute la forêt était couverte de givre abondant, de sorte que les arbres présentaient partout des formes arrondies. L'uniformité du voyage et la fatigue

firent que nous étions tous dans un état entre le sommeil et la veille, à quoi les — 35° contribuaient aussi. Les illusions les plus fantastiques se présentaient à chacun de nous dans la demi-obscurité produite par la lumière rougeâtre phosphorescente. L'un de nous vit un château du style vénitien, et si distinctement qu'il apercevait les fenêtres et les serrures des portes; l'autre vit les contours du palais royal de Stockholm et se croyait sur la glace de Mélarn. De temps en temps nous nous communiquâmes nos visions. Celles des aides étaient d'un caractère plus simple. L'un d'eux eut une singulière vision : il aperçut subitement les bois de son renne se changer en un arbre qui trottait devant son petit traîneau. Son étonnement fut grand, mais disparut lorsque le renne reprit sa forme ordinaire.

Quelle riche matière fournissent ces illusions aux contes populaires! et sans doute elles nous ont valu la mauvaise renommée de sorcellerie de la Laponie. — Il se présente aussi d'autres illusions qui peuvent conduire à de fausses conclusions scientifiques. Ainsi nous vîmes, pendant un voyage avec M. Biese, un arc d'aurore boréale qui nous semblait si près de la Terre qu'il touchait aux cimes des arbres. Nous descendîmes de traîneau et nous nous rendîmes l'un au nord, l'autre au sud pour observer l'arc dans des directions opposées. Heureusement, la forêt n'était pas de grande étendue et, en sortant sur un champ ouvert, l'un de nous vit que l'arc avait naturellement sa hauteur ordinaire.

Il est clair que la population ignorante voit souvent le phénomène de cette manière-là, et c'est ainsi qu'on entend dire quelquefois qu'on a vu des aurores boréales si près de terre qu'on pouvait y toucher. Nous savons en effet que les paysans racontent ce qu'ils ont cru voir.

Ainsi les gens du peuple disent qu'on entend pendant l'aurore boréale un bruissement comme provenant d'un pétillement de flammes. Nous croyons ce fait possible, surtout lorsque l'aurore boréale est très développée et que la température de l'air est très basse. Ce bruit a été entendu aussi quelquefois par des gens instruits et l'on a tort d'en douter.

DEUXIÈME PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE.

CHAPITRE VII.

EXPLICATION SCIENTIFIQUE DES AURORES POLAIRES.

Historique des théories anciennes.

Opinions superstitieuses. — Nous avons déjà parlé du rôle qu'a joué le surnaturel dans les anciennes théories des aurores boréales : on y voyait les menaces des puissances divines en courroux et désirant donner aux coupables humains un premier avertissement, en leur montrant dans le ciel des glaives flamboyants et des armées se livrant bataille. Aujourd'hui ces explications éveillent en nous un sentiment de pitié, mais nous aurions tort de les juger trop sévèrement. Enchaînés par la croyance à une providence toujours prête à changer les lois naturelles, les hommes d'autrefois n'avaient pas de peine à admettre des explications qui nous semblent maintenant bien arbitraires. Si l'intervalle d'années qui nous sépare du XV^e^ siècle est considérable, ce qui est plus grand encore, c'est le nombre des progrès importants qui ont élargi l'horizon des connaissances humaines. L'aurore de cette époque, où nous avons le bonheur de vivre, commence avec les noms des Copernic, des Galilée, des Kepler, des Bacon, des Descartes, mais la lumière nouvelle ne pouvait alors se répandre si rapidement que de nos jours.

C'est pourquoi nous passerons sous silence les tentatives faites à cette époque pour expliquer l'aurore boréale, et nous arriverons immédiatement au moment où l'on essaya pour la pre-

mière fois de rattacher ces phénomènes à des lois naturelles connues.

Théorie de la réflexion. — Nous rencontrons d'abord une explication que nous pourrions appeler la *théorie de la réflexion,* car elle attribue le phénomène à la réflexion des rayons solaires. Se fondant sur ce que l'on aperçoit le plus souvent l'aurore boréale au moment où le Soleil est au-dessous de l'horizon, on prétendait que les rayons lumineux, se réfléchissant dans les couches basses de l'air, puis sur les flancs des montagnes couvertes de glace ou de de neige, finissaient par être dispersés dans l'atmosphère. Il n'est guère nécessaire de réfuter cette théorie, et il suffisait de visiter les régions arctiques pour reconnaître que, malgré l'abondance de montagnes de glace très importantes, les flancs de celles-ci sont loin de réfléchir la lumière avec la netteté qu'on veut bien leur attribuer.

On apprendra avec étonnement que cette théorie de cabinet, malgré plusieurs expéditions polaires, a fini par apparaître de nouveau, et particulièrement dans l'un des numéros des *Mittheilungen* du Dr Petermann (XIIe fasc., 1872). Dans un autre numéro, nous trouvons une réfutation de la théorie naturellement démentie par l'auteur du premier article. Toute cette polémique peut se recommander de confiance aux personnes qui ne sont pas ennemies d'un petit divertissement aussi amusant que scientifique, car on a même été jusqu'à citer une expérience, d'après laquelle l'aurore boréale serait l'effet de la lumière solaire refléchie sur le dos des troupes de harengs qui sillonnent les flots des mers septentrionales.

Théorie des poussières cosmiques. — On a essayé aussi d'expliquer les aurores boréales, en les attribuant à des courants de matière cosmique circulant à travers l'espace et venant frapper notre globe. Bien que ces tentatives soient plus sérieuses que les précédentes, elles ne témoignent point chez leurs auteurs d'un travail soigneux de pénétrer les propriétés essentielles de la lumière polaire. Le lecteur connaît certainement la lumière zodiacale, cet arc faiblement lumineux de forme parabolique, qui apparaît mieux dans le voisinage de l'équateur de la Terre après le coucher du Soleil. On a

expliqué ce phénomène par l'effet d'une réflexion de la lumière solaire sur un anneau de poussière cosmique se mouvant autour du Soleil. Nous ne doutons pas de l'exactitude de cette théorie, mais nous la regardons comme absolument incapable de s'accoupler aux aurores boréales. Le célèbre explorateur français Mairan (28), il y a déjà deux siècles, l'a énoncée le premier en se fondant sur ce que, le Soleil étant entouré d'un pareil anneau, il n'est point impossible que ces poussières atteignent la Terre. Ce dernier point a d'ailleurs été signalé de nos jours par M. Ad. Nordenskiöld. Ce savant a, pendant ses voyages aux régions polaires, constaté de la façon la plus évidente que la neige contenait une poussière de fer. Or c'est justement cette nature spéciale ferrugineuse de la poussière qui était nécessaire pour autoriser l'explication des aurores polaires au moyen d'une pluie de poussière cosmique.

Le phénomène se passerait donc de la manière suivante : La poussière ferrugineuse venant des espaces planétaires atteint les limites de la sphère d'attraction de la Terre ; elle est alors entraînée vers la surface de celle-ci et tombe sous l'action de deux forces : la première est la force magnétique terrestre, qui déposerait la poussière suivant les rayons de même direction que les bandes lumineuses de l'aurore polaire ; conclusion qui, d'ailleurs, s'accorde complètement avec les lois du magnétisme ; la seconde est la résistance de l'air, dont le frottement porterait les poussières cosmiques à la température du rouge. Dès l'abord, cette explication paraît vraisemblable et elle a trouvé son dernier défenseur dans M. Gronemann (28). Si ce savant avait observé les aurores dans leur véritable patrie, c'est-à-dire dans les régions polaires, ou bien s'il avait étudié avec plus de soin les observations des voyageurs, nous sommes convaincu qu'il n'aurait point soutenu une théorie qui, bien que vraisemblable à première vue, ne peut cependant se tenir devant une discussion sérieuse.

On a cru trouver une preuve importante de la théorie dans cette circonstance que la raie caractéristique de l'aurore boréale (n° 2 du spectre) était située très près de l'une des raies du fer.

En effet, ces deux raies ont des longueurs d'onde presque égales, car on peut considérer leur différence comme tout à fait comprise dans les limites d'erreur des observations.

Il y a peu de temps, on croyait encore que la même raie se trou-

vait dans la lumière zodiacale, mais on a démontré que cette circonstance, qui servait de base à toute la théorie, était inexacte. En outre, si la raie en question était en réalité causée par la poussière ferrugineuse en suspension dans l'atmosphère, ce qui n'est point prouvé, on ne saurait expliquer pourquoi elle se montre seule, tandis que le spectre du fer contient plus de 100 raies. Si même on acceptait cette raie comme l'une de celles du fer, il n'en résulterait point que la température élevée où se trouve le métal fût produite par le frottement; elle pourrait être causée par un courant électrique, ce qui du reste n'est guère probable. Quant à nous, comme cette raie jaune est très près d'une raie existant dans le spectre de l'air raréfié, nous n'hésiterons pas à la considérer comme appartenant à l'air.

Nous aurons encore plus de peine à admettre la théorie des poussières cosmiques, si nous suivons pas à pas la marche d'une aurore boréale. D'après cette théorie, le phénomène doit commencer en haut et se continuer en descendant puisque les particules de fer doivent rougir en tombant. Or, c'est précisément le contraire qui a lieu. L'aurore manifeste d'abord une faible lumière et offre ensuite l'aspect de bandes diversement colorées et s'élançant de bas en haut. Ce fait à lui seul prouverait l'inexactitude de la théorie.

Portons maintenant notre attention sur cette circonstance intéressante des flammes observées autour des sommets des montagnes au Spitzberg et en Laponie et la faible lumière de l'aurore polaire qui, vue plusieurs fois à Sadankylâ et Kultala, était impossible à distinguer à l'œil nu, mais pouvait aisément s'observer au spectroscope. Rien de tout cela n'est expliqué par la théorie cosmique. Nous ne fatiguerons point nos lecteurs par l'énumération des nombreuses objections qui avaient lieu d'être faites contre cette théorie : nous pensons que l'on a tort de chercher à expliquer un phénomène appartenant entièrement à notre globe par des causes cosmiques, avant qu'on ait bien clairement prouvé l'impossibilité de l'attribuer à des forces agissant sur la Terre. L'auteur d'une théorie doit étudier avec soin tous les travaux de ses devanciers, car, en agissant autrement, il s'expose à commettre des erreurs et il est évident pour tous que les quantités minimes de poussières de fer se trouvant dans l'atmosphère ne peuvent avoir qu'une influence

tout à fait secondaire sur les aurores boréales, si toutefois elle en a une.

On a voulu également attribuer la lumière polaire à l'inflammation de gaz émis par des volcans; nous ne nous arrêterons même pas à discuter cette hypothèse.

Théorie magnétique. — De 1834 à 1840, la question du magnétisme terrestre occupait vivement les savants. L'*Union magnétique de Göttingue*, à la tête de laquelle se trouvaient Gauss et Weber, provoquait la construction de nombreux observatoires. Sans parler des progrès que les travaux de la célèbre Union faisaient accomplir à la connaissance des lois des variations magnétiques, on commençait à mieux comprendre la relation qui existe entre ces variations et l'aurore boréale; on reconnut ainsi que le sommet de l'arc lumineux produit par le phénomène était situé dans le méridien magnétique, tandis que la couronne passait par le zénith magnétique. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner de ce que l'on cherchait à expliquer l'aurore polaire au moyen du magnétisme. Halley, en 1716, avait déjà émis cette idée, soutenue par Moser et par plusieurs autres. On y adhéra bien davantage, lorsque Faraday découvrit qu'il était possible de provoquer des étincelles électriques au moyen de l'induction magnétique. Cependant on n'a jamais réussi à présenter une théorie probable en se basant uniquement sur le magnétisme terrestre; on parle bien de « courants » et « d'émanations » magnétiques, mais on se garde de donner la définition exacte de ces mots ni le mode de production de l'action qu'ils représentent. Néanmoins il est important pour notre sujet de nous occuper des rapports subsistant entre les aurores polaires et le magnétisme terrestre.

Position de l'arc de l'aurore boréale. — Quand on regarde une aurore boréale d'un lieu d'observation situé à une latitude suffisamment méridionale, il arrive le plus souvent que le sommet de l'arc lumineux se trouve dans le plan du méridien magnétique. Quelle position l'arc de l'aurore boréale doit-il occuper pour que nous le voyions ainsi? Il doit s'étaler, comme un anneau plein ou partiel, situé autour du pôle magnétique, à une hauteur assez considérable. Dans ces conditions, le point le plus élevé nous semblera

infailliblement être dans le méridien magnétique. Cette explication est due au célèbre physicien Hansteen.

Cette apparence est celle des fortes aurores seulement : le plus grand nombre de celles que l'on observe dans les régions arctiques ne suivent pas toujours cette loi et peuvent former des anneaux de grandeur variable, autour d'un centre placé d'une manière fortuite, car dans ces régions l'étendue du phénomène est souvent produite sur un espace assez restreint.

L'expédition française de la corvette *la Recherche* a déterminé, à Bossekop et à Jupvig, en Norwège, par un nombre considérable de mesures, la position de l'arc lumineux; le sommet a été en moyenne à 11° à l'ouest du méridien magnétique. Argelander, à Åbo, est arrivé au même résultat après une longue suite d'observations. On voit donc que le sommet de l'arc ne coïncide pas avec le méridien magnétique, et Bravais, qui était au nombre des savants à bord de *la Recherche,* en donne une explication. D'après lui, la direction du méridien magnétique n'est pas la même à la surface de la Terre et dans les hautes régions où se produit la lumière polaire, parce que cette direction au voisinage du sol peut être influencée par des causes locales sans action dans les positions élevées de l'atmosphère. L'idée est ingénieuse, mais nous refusons de nous y rallier. En effet, un examen plus détaillé des observations de Bravais nous montre que la position de l'arc est extrêmement variable, car sur 226 observations 36 *pour* 100, *c'est-à-dire plus du tiers, atteignent* 30° *à l'ouest du méridien magnétique.*

32 pour 100 tombent entre 10° et 20°;

7 pour 100, entre 0° et 10°; enfin, 4 pour 100 vont de 0° à 26° à l'est.

On sait tout aussi bien que la couronne ne passe pas toujours par le zénith magnétique.

En résumé, tout s'accorde pour nous prouver qu'on a trop exagéré l'influence du magnétisme terrestre sur l'aurore boréale. Nous essayerons dans la suite de montrer que cet agent intervient indirectement pour produire l'électricité dans l'air, pour exercer une force directrice sur les courants électriques qui donnent naissance à la lumière polaire, et enfin pour déterminer la position de la zone maximum. Sous aucun prétexte il ne convient de le regarder comme la cause directe de l'aurore boréale.

Théorie électrique de Peltier et de de la Rive.

Sur l'origine de la théorie électrique. — Il serait difficile de citer le nom de l'observateur qui le premier pensa à attribuer la lumière polaire à l'effet du courant électrique; il est certain que cette opinion a été exprimée par Canton dès 1752, et ensuite par Munch et par plusieurs autres. Il y avait deux raisons pour qu'il en fût ainsi : on observait dans l'atmosphère des phénomènes électriques ne présentant point les formes connues du tonnerre et de l'éclair, et il était possible de produire des effets lumineux presque absolument identiques à ceux de l'aurore boréale au moyen d'un courant électrique circulant dans l'air raréfié. L'œuf électrique est une expérience de cours. Les explorateurs anciens ont pour la plupart adopté la théorie électrique, et parmi eux Bravais, à l'opinion duquel sa profonde connaissance des aurores boréales donnait un poids considérable.

Les conclusions que ce savant a tirées de ses observations sont le plus souvent conformes à celles généralement admises à son époque, et tout particulièrement à celle de Hansteen, qui supposait que l'arc lumineux formait toujours une portion d'anneau autour du pôle magnétique.

Le mérite d'avoir donné à ces idées un peu vagues une forme scientifique appartient à Peltier et de la Rive. De la Rive surtout, par ses recherches continues, a établi la probabilité de la théorie électrique d'une façon qui ne laisse guère place au doute; c'est certainement lui qui a le plus fait pour la solution de cet important problème de Physique météorologique.

Théorie de de la Rive. — Cette théorie peut se résumer ainsi : il résulte de toutes les observations que la Terre est un corps électrisé négativement et bon conducteur de l'électricité. Jusqu'à présent nous ignorons l'origine de cette électricité causée soit par l'état du globe à son intérieur, soit par des phénomènes se passant à la surface. Il n'y aurait rien d'étrange à ce que le contact de la masse fondue interne avec la croûte refroidie donnât naissance à cet agent physique. D'autre part il se produit sur toute la surface du globe un phénomène, celui de la vaporisation de l'eau, qui, lui aussi, crée

de l'électricité soit directement, soit indirectement et par le frottement de la vapeur contre les molécules de l'air. Une condition est cependant nécessaire : c'est que l'eau renferme des sels, comme par exemple le sel marin, ou de la poussière organique. C'est ainsi que la vaporisation est la source principale de cette électricité positive dont l'existence est manifestée par le tonnerre, les éclairs, et tous ces autres phénomènes étudiés par de longues séries d'observations. Il existe d'autres sources, telles que le frottement de l'air contre la surface de la Terre, le développement de la végétation, etc., mais leur importance est secondaire relativement à celle de la vaporisation. Par suite de l'inégale répartition de la chaleur sur le globe, la vaporisation, et par suite la production de l'électricité, se produisent avec un maximum d'intensité dans la zone torride, mais ces phénomènes ont lieu partout où s'évapore l'eau impure. L'électricité ainsi créée est conduite par l'intermédiaire des vapeurs, d'abord de la Terre, qui est électro-négative, jusqu'aux régions supérieures de l'atmosphère, puis les vents l'entraînent vers les pôles terrestres autour desquels elle se décharge sous forme d'aurores boréales. Cette manière de la décharge est favorisée par l'humidité permanente de l'air de ces régions qui, par sa conductibilité plus grande, permet une décharge lente au lieu de la décharge violente de l'éclair qui s'effectuerait si l'air était sec. Telle est la façon simple et ingénieuse dont de la Rive explique les causes des aurores boréales.

Dans le but de compléter cette théorie et de l'appuyer sur des bases expérimentales, de la Rive construisit un appareil destiné à montrer la décharge électrique s'effectuant dans l'air raréfié autour d'un pôle magnétique. Cet appareil consistait en une grosse sphère en bois; à chacune des extrémités d'un même diamètre on avait fixé deux cloches en verre dans lesquelles il était possible de raréfier l'air. La sphère contenait dans son intérieur un barreau aimanté dont les pôles se trouvaient à peu de distance des cloches en verre. Celles-ci étaient percées et recevaient dans leur intérieur un fil métallique en communication d'une part avec une bobine Ruhmkorff, d'autre part avec un anneau métallique entourant les pôles de l'aimant sans le toucher. Dès qu'on mettait en action l'appareil ainsi disposé, on apercevait au milieu de l'air raréfié un faisceau lumineux s'étendant entre le pôle et l'anneau métallique.

De la Rive démontrait ainsi plusieurs faits intéressants et prouvait, entre autres, que la lumière subissait un mouvement rotatoire sous l'influence du magnétisme.

Points essentiels de la théorie. Trois questions.

Un examen détaillé des points essentiels de cette théorie renfermés dans les questions suivantes nous fera voir les points dans lesquels la théorie de de la Rive est satisfaisante et ceux dans lesquels il faut la modifier ou la changer.

1° L'aurore boréale est-elle en vérité un phénomène électrique?

2° Quelle est la cause de l'électricité négative de la Terre et de l'électricité positive de l'air?

3° Pourquoi l'aurore boréale se produit-elle de préférence autour des pôles de la Terre?

CHAPITRE VIII.

ORIGINE ÉLECTRIQUE DE L'AURORE BORÉALE.

Première question.

Courants électriques produits par l'aurore. — Les raisons qui plaident en faveur de l'origine électrique de la lumière polaire sont si nombreuses qu'elles ne permettent guère de doutes.

Les perturbations magnétiques indiquent clairement cette origine. Si l'on fait passer un courant électrique dans le voisinage d'une aiguille aimantée placée sur un pivot vertical et libre de tourner dans un plan horizontal, celle-ci est déviée de sa position d'équilibre et tend à se mettre en croix avec le courant. Le moyen mnémotechnique donné par Ampère permet de savoir d'avance la position qu'occuperont les pôles par rapport au courant.

En effet, si l'on imagine une poupée étendue dans le sens du courant, de telle sorte que ce courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, la poupée faisant face à l'aiguille aura le pôle nord de celle-ci toujours à sa gauche.

Or ces mouvements ne manquent jamais d'apparaître, ainsi que nous l'avons dit plus haut, pendant les aurores boréales. Plus vives et plus étendues les aurores se présentent, plus grands sont les mouvements de l'aimant, plus violentes sont les tempêtes magnétiques. — Ces tempêtes peuvent avoir lieu sans que l'aurore soit visible, mais dans ce cas il est bien probable que le phénomène de l'aurore se passe à une distance hors de la portée de la vue. Cela est prouvé par les effets que nous avons décrits à propos des fils télégraphiques, dans lesquels se créent des courants tellement puissants, qu'ils l'emportent sur ceux de la pile faisant fonctionner l'appareil télégraphique ; ces courants font jaillir des étincelles et donnent des commotions assez fortes. Or il n'est aucun agent physique,

NORDLYSOBSERVATORIET
TROMSØ

sauf l'électricité et le magnétisme, capable de produire ces manifestations. On ne peut admettre le magnétisme, il ne reste donc que l'électricité.

De tels mouvements des aimants ont en vérité leur explication la plus simple dans des courants électriques, et comme l'aurore boréale est l'effet d'un courant dirigé de haut en bas, nous allons trouver les causes des tempêtes : soit dans ce courant lui-même, soit dans les changements que subit le courant terrestre sous l'action du courant précédent. Quoi qu'il en soit, nous voyons que l'aurore polaire donne toujours naissance à des mouvements électriques.

Ressemblance de l'aurore avec la lumière électrique de l'air raréfié. — L'aurore polaire ressemble d'une façon frappante à la lumière produite par un courant électrique dans l'air raréfié ou, plus généralement, dans un gaz quelconque raréfié. Mais d'où vient cette lumière? Parmi une foule d'autres effets, le courant électrique provoque dans le circuit un développement de chaleur capable, dans certaines circonstances, de faire rougir des parcelles de matière comme dans l'arc voltaïque.

Si un tube contenant de l'air raréfié est traversé par un courant, le gaz s'échauffe, rougit et devient lumineux. C'est ce qui arrive pour la lumière polaire: le courant partant des régions élevées de l'atmosphère au sein d'un air raréfié et arrivant à la Terre fait rougir les particules gazeuses sur son passage. Plus l'air est raréfié, plus le passage du courant est facile, moins grand est le nombre des particules gazeuses à porter au rouge, et l'effet lumineux en devient d'autant plus considérable.

Preuves de l'analyse spectrale. — La meilleure preuve que l'aurore boréale est un phénomène d'incandescence nous est donnée par l'analyse spectrale. Nous savons que la lumière polaire présente un spectre qui ne contient pas moins de douze raies, provenant nécessairement de la présence d'un gaz à l'état incandescent. Mais quelle source de chaleur pourrait causer cet effet dans les hautes régions de l'atmosphère où le froid est si grand? La seule réponse satisfaisante se trouve dans l'électricité en mouvement. Les autres propriétés de l'aurore boréale sont toutes d'accord pour

nous amener à la même conclusion. Il suffira, en effet, de citer la hauteur variable qu'elle atteint au-dessus de la surface terrestre, son apparition aux endroits restreints, surtout dans les régions polaires, l'observation de certaines aurores ayant leur origine dans les nuages, sa participation à la rotation de la Terre, pour montrer que le phénomène de l'électricité en mouvement appartient tout entier à notre atmosphère. On doit aussi mentionner la rareté remarquable des orages dans les régions polaires, ce qui indique que la décharge électrique a quitté la forme violente pour une forme relativement lente.

CHAPITRE IX.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Existence de l'électricité atmosphérique et les lois qu'elle subit. — Il sera plus difficile de répondre *à la deuxième question*, ou de nous rendre compte de la source de l'électricité négative de la Terre et de l'électricité positive de l'atmosphère.

Ce n'est pas que la science ait négligé de travailler à la solution de cette question ; on a depuis longtemps déjà exécuté de nombreuses observations afin de déterminer les lois de l'électricité atmosphérique, et cependant on n'est pas encore en droit d'affirmer si l'air situé près de la Terre est réellement électrisé, ou bien si les phénomènes observés sont dus à l'influence de la Terre électrisée négativement. Toutefois, si l'on ne peut se montrer hautement affirmatif, l'existence de cette électricité présente du moins le plus haut degré de probabilité. Nous en donnerons plus loin une preuve dans le Chapitre sur les expériences de la Laponie. Les travaux récents, et particulièrement ceux qui ont été faits pendant l'hivernage de la dernière expédition suédoise au Spitzberg, en 1872-1873, sont favorables à cette conclusion.

L'électricité atmosphérique, mesurée relativement à sa quantité et à sa tension, montre dans la marche journalière deux maxima et deux minima, qui se présentent à des époques inégales pendant les diverses saisons. Le premier minimum a lieu vers 4^h du matin et il est suivi d'un premier maximum à 8^h en été et à 10^h en hiver; l'électricité commence alors à diminuer jusqu'à 3^h du soir en été, et jusqu'à 1^h du soir en hiver, moments où elle atteint un second minimum, moins facile à distinguer que le premier; après 3^h la tension augmente jusqu'à 9^h du soir en été et 6^h en hiver, où l'on

constate le deuxième maximum. Pendant l'année, l'électricité atteint son maximum en hiver au mois de janvier et son minimum en été au mois de juin. Le maximum est environ 13 fois plus grand que le minimum. Du reste, il faut remarquer que de grands et rapides changements se montrent souvent dans l'état électrique de l'air : c'est pourquoi la question de la périodicité annuelle n'est pas encore bien constatée (101 *b*). Les résultats que fournissent les expéditions polaires internationales donneront probablement des preuves concluantes.

Observations danoises à Godthaab. — Les observations danoises sont déjà connues dans leurs traits principaux; voici le récit de M. Paulsen (16) : « Les conditions météorologiques de Godthaab sont toutefois si défavorables, que la fréquence des brouillards d'été et l'abondance des nuages pendant toute l'année ne permettent point de démontrer la régularité d'une période journalière. En revanche, on a pu constater, depuis le commencement des observations, au milieu de janvier, une différence extraordinairement grande entre l'état électrique de l'air en hiver et en été. Ainsi pour les heures pendant lesquelles la nébulosité a été au-dessous de 5 (max. 10), les résultats fournis par l'électromètre ont donné en moyenne :

Pour février, un écart de	.....	135	divisions.
mars	»	52	»
avril	»	50	»
mai	»	6,5	»
juin	»	3,8	»
juillet	»	»	(l'instrument était dérangé).
août	»	1,1	division.

Nous voyons ainsi que la quantité d'électricité qui existe dans l'atmosphère est bien plus grande pendant l'hiver qu'à toute autre époque de l'année. Ces recherches n'ont pas montré une liaison spéciale entre l'aurore boréale et l'état électrique de l'air.

Les observations de l'expédition polaire de Laponie ont donné des résultats qui ressemblent assez aux observations danoises.

Nous montrerons plus loin qu'une liaison intime entre l'état électrique de l'air et l'aurore boréale n'est pas nécessaire, parce que

celle-là étant l'effet d'un courant ne dépend point de l'état électrique absolu, mais des variations du potentiel dans une direction à peu près verticale. On reconnaît que les phénomènes observés au moins dans les zones froides indiquent bien l'existence d'un tel courant.

Origine de l'électricité atmosphérique.

Deuxième question.

L'opinion des physiciens sur l'origine de l'électricité atmosphérique a été bien différente, comme nous allons le montrer.

Parmi les causes qui sont regardées comme productrices du phénomène, il y en a deux qui nous semblent les plus importantes.

1° *L'induction unipolaire* produite par le magnétisme terrestre et la rotation de la Terre;

2° *La vaporisation* à la surface de la Terre.

L'induction unipolaire.

Phénomènes principaux. — Explications de M. Edlund. — Pour bien comprendre l'effet qu'exerce l'induction unipolaire sur les phénomènes de l'électricité atmosphérique, il nous faut connaître l'explication que M. Edlund a donnée de ce phénomène (28). Cette explication est indépendante de toute théorie électrique, c'est-à-dire qu'elle s'applique également si l'on regarde les phénomènes électriques comme étant produits par un seul fluide ou par deux.

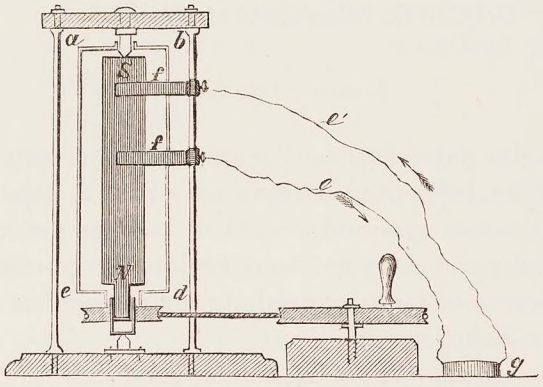
Le phénomène principal est le suivant : soient un aimant cylindrique N.-S. (*fig.* 9) qui peut être animé d'un mouvement rapide de rotation, f et f' deux ressorts appuyant légèrement sur cet aimant et communiquant à un galvanomètre par l'intermédiaire des fils isolés e et e'. Dès que l'aimant est mis en mouvement, un courant se produit et l'aiguille du galvanomètre est déviée; on remarque:

1° Que l'intensité du courant dépend de la puissance de l'aimant et de la vitesse de rotation;

2° Que la déviation de l'aiguille change avec le sens de la rotation et avec la position des ressorts qui glissent sur l'aimant.

Si l'on place autour de cet aimant un manchon en laiton disposé de telle sorte qu'il puisse prendre un mouvement de rotation au-

Fig. 9.



tour de l'aimant, on pourra à volonté faire tourner autour de l'axe commun de l'appareil, soit séparément ou ensemble, l'aimant et le manchon.

Les expériences indiquent d'une manière bien certaine le siège de l'induction unipolaire. Les principaux faits observés sont les suivants :

1° Si le manchon seul est mis en rotation de droite à gauche et que les ressorts appuient sur ce dernier, on obtient un courant dans la direction des flèches e et e'; en changeant le sens de la rotation, la direction du courant change aussi. Le résultat est le même que si les ressorts glissaient sur l'aimant.

2° Si le manchon et l'aimant sont mis ensemble en rotation, le résultat reste le même.

3° Si l'aimant se meut seul, pendant que les ressorts pressent sur le manchon en repos, le galvanomètre n'accuse rien. On voit donc qu'il est indifférent que l'aimant soit entouré d'un manchon ou ne le soit pas, car, dans le dernier cas, la surface métallique de l'aimant joue le rôle du manchon.

On a essayé d'expliquer ces phénomènes singuliers par l'induction de l'aimant mobile sur le circuit, mais cette explication laisse

beaucoup à désirer. Nous donnerons la théorie si simple de M. Edlund.

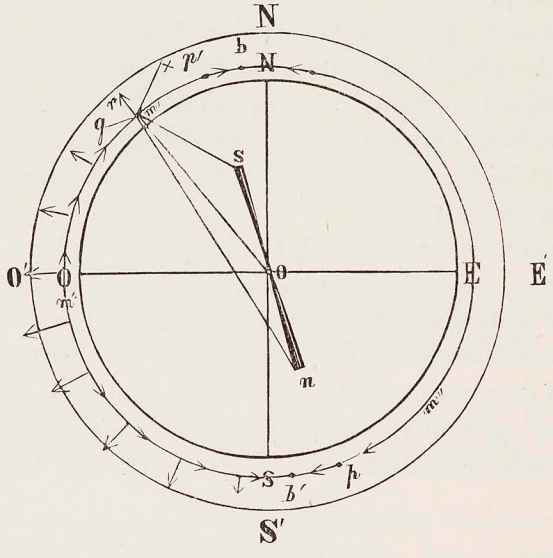
Puisque tous les corps contiennent de l'éther libre (ou les deux fluides électriques et particulièrement le fluide positif), celui-ci doit être entraîné par le corps mis en mouvement. En mettant ainsi un manchon cylindrique en rotation autour de son axe vertical, il résulte par l'entraînement de l'éther (le fluide électropositif) une espèce de courant électrique. En se figurant le manchon divisé par des plans horizontaux parallèles, ou en anneaux minces, on peut regarder chaque anneau comme un courant circulaire. Sur le manchon tournant autour d'un aimant, on peut directement appliquer la loi bien connue de l'effet d'un pôle magnétique sur un élément du courant.

Alors tous les phénomènes de l'induction unipolaire s'expliquent facilement et sont les conséquences nécessaires de la théorie. M. Edlund a démontré que sa théorie concorde entièrement avec la Théorie mécanique de la chaleur. On voit aussi que l'on n'a pas besoin de regarder l'éther comme le véhicule des phénomènes électriques, car tout ce qu'on en dit peut tout aussi bien être dit pour le fluide positif et, en tenant compte du sens, du fluide négatif.

Application de la théorie de M. Edlund. — Voyons quelle est l'application qu'a faite M. Edlund de l'induction unipolaire pour l'explication des phénomènes électriques dans l'atmosphère. Pour simplifier notre exposition, nous supposerons *la couche magnétique* (*fig.* 8) de la Terre remplacée par un aimant nS (*fig.* 10), hypothèse permise puisque les phénomènes magnétiques de la Terre peuvent, en général, être regardés comme les effets d'un tel aimant. Quand la Terre tourne de l'ouest à l'est, chaque molécule d'éther dans l'atmosphère peut être regardée comme faisant partie d'un courant électrique circulaire, sur lequel l'aimant terrestre exerce son action. Le pôle magnétique sud de la Terre, situé au nord, essaye de conduire la molécule électrique ou d'éther m' dans la direction $m'x$. Le pôle magnétique nord, situé au sud, agit en sens contraire dans la direction mg, selon les lois connues. En composant les deux forces suivant la direction du rayon terrestre, elles donnent une résultante qui pousse la molécule suivant la

verticale. Cette force est constante en chaque point de la Terre ou de l'atmosphère, mais elle varie avec la latitude. Les flèches placées sur le cercle $mm'm''$ représentent cette force en grandeur et en direction. Elle atteint son maximum dans les environs de

Fig. 10.



l'équateur, et diminue à mesure qu'on s'approche des pôles magnétiques, où elle est égale à zéro.

En cherchant la composante dans le plan horizontal, nous trouvons une force tangente au méridien, qui est nulle aux environs de l'équateur. Elle augmente d'abord avec la latitude, puis diminue sans devenir nulle aux pôles magnétiques.

C'est ce qui arrive au nord et au sud en un point situé entre les pôles magnétiques et astronomiques. Dans l'hémisphère nord, l'éther (le fluide positif) est poussé par cette composante vers le nord; dans l'hémisphère sud, vers le sud.

Les petites flèches tangentes au méridien indiquent sa force et ses variations.

Il existe toujours une direction dans laquelle les forces en question donnent *une résultante nulle*. Cette direction coïncide avec l'axe de l'aiguille d'inclinaison en chaque lieu, c'est-à-dire, dans

cette direction aucune force ne tend à mettre en mouvement les molécules électriques ou d'éther.

Nous pouvons donc dire que la direction de la force totale qui pousse les molécules d'éther vers le haut forme des *angles droits avec la direction de l'inclinaison.*

Conséquences. — Nous allons tirer les conséquences immédiates de cette force de l'induction unipolaire et les diviser en deux groupes.

1° Il résulte de l'induction unipolaire une force qui entraîne le fluide électrique ou l'éther de la Terre vers l'atmosphère dans une direction à angle droit avec l'inclinaison magnétique. *Chaque corps, quelles que soient ses dimensions, s'il se détache de la Terre par une cause quelconque dans cette direction doit donc être électrisé positivement.*

2° Puisque l'induction unipolaire entraîne directement l'éther ou le fluide positif vers les hautes régions de l'atmosphère, elle contribue à la production de l'électricité atmosphérique.

Production directe de l'électricité par l'induction unipolaire. — Pour pouvoir apprécier la grandeur de cette production directe de l'électricité, il est nécessaire de prendre en considération l'électricité négative de la Terre, dont l'existence doit être regardée comme un fait prouvé.

Elle fait naître une force attractive dirigée suivant la verticale. Cette force croît, selon toute probabilité, avec la latitude.

Nous avons donc deux forces F et F′, qui agissent sur la molécule électrique dans des directions contraires. Si nous supposons F, qui naît de l'induction unipolaire, plus grande que F′, la molécule sera poussée vers en haut.

Cela arrive seulement à proximité de l'équateur, car, en d'autres endroits de la Terre, les deux forces donnent une résultante, dont la grandeur et la direction dépendent du rapport de F à F′ et de l'inclinaison. Comme nous l'avons vu, F est perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison. Cette résultante s'approche d'abord du plan horizontal, le dépasse et puis s'approche du plan vertical.

Si nous prenons encore en considération la grande résistance qu'offre l'air à l'électricité, surtout dans les couches basses, il

semble bien résulter que : la production de l'électricité par l'induction unipolaire ne peut pas être regardée comme la source principale de l'électricité atmosphérique. Nous verrons cependant plus loin que cette force exerce une influence indirecte des plus importantes.

La vaporisation.

Historique. — Les expériences célèbres de Pouillet démontraient que la vaporisation de l'eau bouillante impure ou chargée de sel marin produit de l'électricité, de telle sorte que la vapeur était électrisée positivement. Ces expériences ont été reprises et discutées plusieurs fois avec plus ou moins de succès, parce que leur exécution offre des difficultés assez grandes.

Cependant le fait a été bien démontré par M. Palmieri (36).

En évitant les causes d'incertitude des expériences de ses prédécesseurs, M. Palmieri remplit d'eau une capsule de platine, la place sur le plateau d'un électroscope condensateur et produit l'ébullition de l'eau en concentrant à sa surface, à l'aide d'une lentille, les rayons solaires. La capsule se montra électrisée négativement, d'où il suit que la vapeur d'eau était positive.

Dans une autre expérience il faisait bouillir l'eau à la manière ordinaire et, condensant la vapeur sur une capsule de platine, il trouvait toujours celle-ci chargée positivement.

Ces expériences semblaient concluantes, mais il est démontré, par les nouvelles recherches de Blake et de Kallisher, qu'il est nécessaire que l'eau soit bouillante et que, selon toute probabilité, l'électricité est produite par la *friction* des particules d'eau contre celles de l'air.

Nous résumons dans l'aperçu suivant les différentes opinions qui ont été émises sur l'origine de l'électricité atmosphérique.

Peltier admettait que toute électricité atmosphérique est produite par l'influence qu'exerce la Terre négativement électrisée. La cause de cette électricité négative pourrait bien se trouver dans le contact de la croûte refroidie avec les parties échauffées de l'intérieur du globe. On sait en effet qu'un courant électrique prend naissance lorsque deux corps, possédant des températures différentes, sont mis en contact; l'expérience montre en général

que le courant produit marche du corps froid vers le corps chaud ; or, au fur et à mesure que l'on pénètre à l'intérieur du globe terrestre, la température s'élève. Le courant électrique ainsi produit devrait donc marcher de la surface vers le centre, et sur celle-là s'accumulerait le fluide négatif, le fluide positif étant repoussé vers l'intérieur. Cette manière d'envisager le phénomène fut plus tard acceptée par Lamont.

Saussure en voyait l'origine dans la condensation des vapeurs, phénomène inverse de celui que Pouillet donnait comme cause productrice.

Selon Sir W. Thomson, l'origine se trouverait dans des courants d'air verticaux portant l'électricité des couches atmosphériques près de la Terre aux régions plus hautes (ces couches étant souvent fortement électrisées).

M. Ed. Becquerel propose la théorie des particules d'hydrogène incandescentes, électrisées par de violentes éruptions, qui seraient portées du Soleil jusqu'aux limites de l'atmosphère terrestre.

M. Mühry donne comme vraie cause l'effet de la radiation du Soleil sur la surface terrestre.

Enfin M. Luddens la trouve dans le frottement des vapeurs contre l'air sec.

Parmi ces opinions, celle de Peltier mérite une attention spéciale, surtout parce qu'elle est fondée sur un fait démontré : l'état négatif électrique de la Terre. Tout en acceptant les conséquences de ce fait, il est nécessaire de prendre en considération les autres agents qui peuvent exercer une grande influence sur le phénomène.

État actuel de la question suivant M. Tait. — L'état actuel de la question est très bien défini par M. Tait (33) :

« En supposant que les nuages sont électrisés, tous les phénomènes ordinaires de l'orage sont facilement et directement expliqués par les lois connues de l'électricité statique. Nous trouvons là une base solide à nos connaissances, mais il est bien différent si nous voulons regarder les choses de plus près et chercher la source d'électricité atmosphérique.

» Une cause des difficultés que nous y rencontrons est bien facile

à voir. C'est cette vaste échelle dans laquelle les phénomènes météorologiques s'accomplissent ordinairement. Les effets qui, dans une expérience de laboratoire, si bien arrangée qu'elle soit, peuvent échapper à l'attention de l'expérimentateur le plus sagace, auront peut-être dans la nature une importance extraordinaire. »

M. Tait cite ensuite, comme exemple, l'énorme travail mécanique que représente la chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau. Pour produire la vaporisation d'un seul kilogramme d'eau, il faut une quantité de chaleur qui représente le travail d'un cheval-vapeur, soit 75^{kgm} pendant une heure. Cette chaleur est rendue quand la vapeur d'eau se condense, et le kilogramme d'eau, en s'étendant sur le sol, couvrirait une surface de 1^{mq} ayant 1^{mm} de hauteur.

Donc une couche de pluie de 1^{mm} de hauteur représente un cheval-vapeur, pour une heure et par chaque mètre carré; mais pour un kilomètre carré il faudrait un million de chevaux pour une heure. Il n'y aurait pas assez d'espace pour un million de chevaux sur un kilomètre carré. Ce calcul montre que nous pouvons nous rendre compte des plus violentes tempêtes par l'énergie fournie par la condensation des vapeurs nécessaires à une pluie assez modérée.

La théorie moderne des gaz nous fait voir que les particules d'eau sont si minimes que leur nombre dans une goutte d'eau (9^{mmc}) va jusqu'à trois cents millions de millions de millions. Si chacune des particules avait été électrisée au même potentiel, et que toutes soient réunies en une seule, le potentiel de la goutte serait cinquante millions de millions de fois plus grand.

Nous croyons donc que, s'il existe une cause qui puisse électriser les particules à un potentiel si petit qu'il ne puisse pas donner signe de son existence sur nos électromètres les plus sensibles, une agrégation de ces particules à une goutte d'eau expliquerait la charge la plus grande d'un nuage orageux.

M. Tait rend compte des expériences qu'il a faites pour produire des effets électriques, par la précipitation des vapeurs d'eau sur des plaques métalliques en contact avec des électromètres. Guidé par l'idée que le seul contact entre les molécules d'eau et celles de l'air serait capable de produire un potentiel faible, analogue à

celui que donnait l'expérience de Volta, il exécutait ces expériences avec soin, sans avoir pourtant une solution définitive, et son opinion est que, pour réussir, il faut faire ces expériences sur une grande échelle.

En parlant des expériences de Blake et Kallisher, citées plus haut, M. Tait s'exprime ainsi : « Leurs expériences ont toujours été exécutées sur une échelle trop petite pour pouvoir donner des résultats tout à fait concluants. Ce que je viens de dire du nombre extraordinaire des particules de la vapeur dans une seule goutte de pluie prouve que toute la charge dans quelques décimètres cubes d'air humide échapperait à l'observation.

» La question en restera là jusqu'au moment où l'on trouvera les moyens d'exécuter ces expériences bien délicates d'une manière qui seule promet le succès, c'est-à-dire sur une échelle plus grande que ne peut le faire un savant.

» La question est d'une importance réelle, non seulement pour la Science, mais aussi pour la vie pratique et doit être résolue par des moyens que peut seule fournir une nation riche et puissante. »

La vaporisation et l'induction unipolaire. — Puisque nous avons vu que chaque corps qui se détache de la Terre doit être électrisé positivement par l'induction unipolaire, il s'ensuit que la vapeur d'eau doit être positive. *La vaporisation devient donc, par l'intermédiaire de l'induction unipolaire,* une source de l'électricité atmosphérique.

Cette conclusion importante nous semble trancher la question sur la cause véritable de l'électricité atmosphérique, et nous pouvons dire que le faible potentiel que suppose M. Tait dans les déductions citées plus haut se trouve théoriquement démontré.

Il y a deux forces qui donnent à la molécule d'eau un mouvement ascendant :

D'abord la vapeur d'eau a un poids spécifique moindre que l'air, à quoi nous ajoutons la force de diffusion des gaz ;

Puis elle est entraînée par la même force qui fait mouvoir la molécule électrique, c'est-à-dire par l'induction unipolaire.

La force produite par l'électricité négative de la Terre. —

La molécule d'eau électrisée doit donc se mouvoir suivant la direction déterminée par la résultante de ces deux forces, c'est-à-dire dans une direction intermédiaire entre la verticale et une ligne à angle droit avec l'inclinaison.

Il en résulte que la surface terrestre doit être électrisée négativement sous l'influence de ces deux forces. Cette électricité empêche le mouvement ascendant par son attraction sur les molécules d'eau électrisées et sur les molécules électriques (d'éther).

Comme nous l'avons dit, la force de l'induction unipolaire est nulle suivant la direction de l'axe de l'aiguille d'inclinaison; dès que l'attraction de l'électricité négative de la Terre a atteint une grandeur telle qu'elle tient en équilibre les forces auxquelles les molécules sont soumises, le mouvement ascendant cesse. Si maintenant l'attraction augmente par une cause quelconque, les molécules commencent à se mouvoir vers la surface de la Terre dans la direction de l'inclinaison.

Conclusions. — Nous avons trouvé une solution à notre deuxième question : l'électricité atmosphérique dans les hautes comme dans les basses couches de l'atmosphère doit avoir son origine principale dans la vaporisation qui, combinée avec l'induction unipolaire, produit des quantités considérables d'électricité. Ces masses d'électricité sont poussées vers les hautes régions de l'atmosphère par les deux forces qui résultent de la moindre densité de la vapeur d'eau et de l'induction unipolaire contre lesquelles agit l'attraction de l'électricité négative de la Terre. Le mouvement s'opère suivant une direction qui est la résultante de ces forces.

Ce résultat semble être en contradiction avec le fait connu que la quantité d'électricité atmosphérique est plus grande en hiver qu'en été, lorsque le contraire devrait avoir lieu. La contradiction n'est cependant qu'apparente, car l'électricité de l'air dépend non seulement de la quantité de vapeurs développée, mais encore du pouvoir conducteur du milieu qui est plus grand lorsque l'air est humide. La cause de la diminution provient donc de ce que l'électricité est conduite en partie à la Terre et en partie dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Quelles que soient les modifications que puissent apporter la

discussion ou les expériences futures dans les résultats auxquels nous sommes arrivés, les deux principes suivants resteront :

1° La Terre est un corps électrisé négativement et bon conducteur de l'électricité ;

2° L'atmosphère est électrisé positivement ; le potentiel croît avec la hauteur.

CHAPITRE X.

FRÉQUENCE DES AURORES POLAIRES AUTOUR DES POLES DE LA TERRE.

Troisième question.

Maintenant que nous avons répondu aux deux premières questions, occupons-nous de la troisième et cherchons à nous expliquer la fréquence des aurores aux environs des pôles ou, ce qui revient au même, la cause de l'accumulation de l'électricité dans les contrées boréales.

L'opinion de de la Rive n'est pas satisfaisante. — De la Rive ne répond pas à cette question d'une manière satisfaisante; en effet, il suppose que l'électricité amenée dans les hautes régions de l'atmosphère par l'intermédiaire des vapeurs est transportée aux pôles par les vents. Arrivant de tous les côtés, les vapeurs électrisées s'y trouvent nécessairement, à cause de la forme sphérique de la Terre, resserrées dans un espace de plus en plus restreint, de sorte que chaque élément d'espace en renferme une proportion plus grande et la tension augmente.

En examinant l'explication de plus près, nous ne tarderons pas à comprendre que la cause de l'accumulation de l'électricité ne peut être celle que préconise de la Rive. Les vents venant de l'équateur touchent la surface du globe dès qu'ils arrivent dans les zones tempérées, et dans leur trajet ils ont déjà perdu une quantité considérable de leur électricité, rendue au sol par l'intermédiaire des gouttes de pluie.

La petite portion de ces vents qui finit par atteindre les régions polaires emporte avec elle de l'électricité, mais, comme les vents soufflent souvent aussi des pôles, une certaine portion assez con-

NORDLYSOBSERVATORIET
TROMSØ

sidérable de cette électricité repartira avec eux. Rien ne s'oppose à ce que l'on considère la masse d'air venant des pôles comme égale à la masse qui y afflue, la pression atmosphérique n'étant point augmentée ou diminuée dans ces régions; dès lors, il y aura équilibre entre le gain et la perte. Cherchons donc autre part la réponse à la troisième question; nous la trouverons dans les propriétés de l'atmosphère.

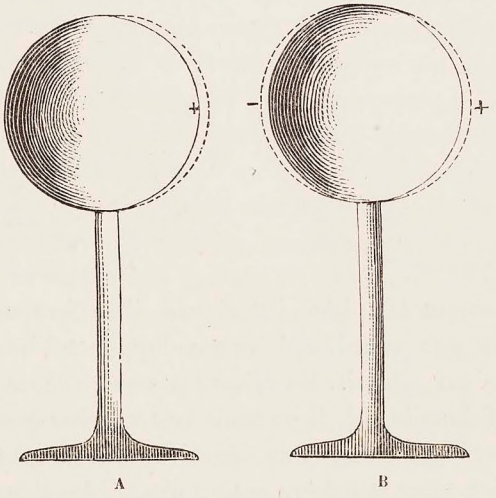
Remarquons que les expériences de de la Rive n'ont point établi que le courant électrique, cause de la lumière polaire, atteignait la Terre. En effet, dans son appareil, le courant ne faisait que passer dans l'air raréfié entre les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff. Nous espérons que cette imperfection dans la démonstration sera supprimée par *l'appareil* à aurores boréales.

La Terre et l'atmosphère au point de vue de l'électricité.

Propositions préliminaires.

L'influence électrique. — Prenons un corps isolé, par exemple la sphère A (*fig.* 11), reposant sur un pied en verre et électrisée

Fig. 11.

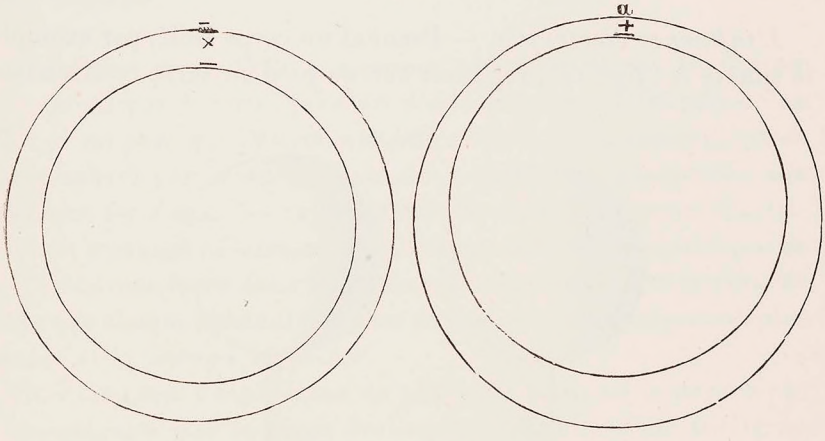


positivement, et approchons-la d'une autre sphère semblable B. Aussitôt il se produira en B, par influence, un état électrique : la

partie la plus voisine de A s'électrisera négativement et la partie la plus éloignée s'électrisera positivement, ainsi que le montrent les signes + et —. Par contre, l'électricité, distribuée primitivement et également sur toute la surface de la sphère A, éprouvera sous l'influence de B une nouvelle distribution indiquée par la ligne ponctuée de la figure. Si l'on met B en communication avec la Terre au moyen d'un conducteur métallique, l'électricité positive disparaît, l'électricité négative augmente jusqu'à être à peu près égale à celle qui se trouve sur la sphère A. En augmentant la charge de cette dernière, l'électricité négative de B augmente aussi, jusqu'à une telle limite, que la force avec laquelle s'attirent les deux électricités devient assez grande pour vaincre la résistance de l'air interposé entre les deux sphères.

Considérons maintenant une sphère creuse renfermant dans son intérieur une seconde sphère séparée de la sphère enveloppante par une couche d'air isolante, ainsi qu'on le voit sur la figure; électri-

Fig. 12.



sons négativement la sphère intérieure, il se fera une répartition du fluide telle, que pour la sphère enveloppante l'intérieur sera positif et l'extérieur négatif. En faisant passer avec un conducteur le fluide négatif dans le sol, il ne nous restera plus que deux électricités de signes contraires, l'une négative pour la sphère intérieure, l'autre positive pour la sphère extérieure. Si les deux sphères sont partout également distantes l'une de l'autre, la répartition de l'électricité sera la même pour les deux; en d'autres termes, une unité

de surface prise sur une quelconque d'entre elles contient toujours une quantité égale d'électricité. En rapprochant les deux sphères de sorte que la distance soit moindre en a, la répartition de l'électricité changera et la quantité de fluide répandue sur l'unité de surface en a sera d'autant plus considérable que la distance des deux sphères sera moindre. Si les deux quantités d'électricité étaient libres, la force avec laquelle elles tendent à se réunir ou, ce qui revient au même, à percer la couche isolante, serait proportionnelle aux quantités d'électricité et, comme la distance a diminué, il en résulte que la force s'est accrue en raison inverse des carrés des distances. Cette distance étant d'abord de $0^m,010$, par exemple, puis réduite à $0^m,005$, la force attractive dans le premier cas sera à la force attractive dans le second comme 25 est à 100, c'est-à-dire quatre fois plus grande (Note XII).

Phénomènes lumineux dans l'air raréfié des tubes de Geissler. — Nous avons déjà appelé l'attention sur les phénomènes lumineux de l'œuf électrique; nous allons maintenant reprendre cette étude, mais sous une forme un peu différente. Prenons un tube de verre, fermons l'une de ses extrémités à la lampe, après y avoir introduit préalablement le bout d'un fil de platine; à l'aide de la machine pneumatique, faisons le vide dans son intérieur jusqu'à ce que la pression de l'air qu'il contient ne dépasse pas le poids d'une colonne de mercure d'un demi-millimètre de hauteur; fermons ensuite l'autre extrémité après y avoir, comme tout à l'heure, fait passer le bout d'un fil de platine; nous aurons alors un tube de Geissler, qui n'est réellement qu'un œuf électrique de forme différente. En plaçant cet appareil entre les pôles d'une machine électrique en activité, celle de Holz, par exemple, le courant d'électricité traversera lentement le tube et provoquera l'apparition d'un beau phénomène lumineux, résultant de ce que les particules d'air restées dans le tube sont portées à la température du rouge.

Si, dans le tube, l'air était sec et possédait une pression comprise entre $0^m,050$ et $0^m,760$, le courant ne pourrait posséder la forme lente et l'électricité passerait sous forme d'étincelle. En effet, l'air raréfié jouit de la propriété de conduire l'électricité, et cette faculté est au contraire excessivement faible pour l'air à la pression ordinaire, surtout lorsqu'il est sec.

Expériences avec des tubes de Geissler. — Quand on examine ce phénomène, les couleurs qu'il manifeste, la forme de sa lumière, on est frappé de sa ressemblance avec les aurores boréales. Si l'on constate quelques légères différences en opérant comme nous l'avons indiqué, ces différences n'existent plus si l'on modifie de la façon suivante le mode d'observation.

Mettons en communication avec la terre, au moyen d'un fil métallique, l'un des pôles, le pôle positif, par exemple, de la machine électrique et attachons avec un fil de cuivre recouvert de gutta-percha le pôle négatif à une sphère en laiton portée par un support isolant. Faisons agir la machine et approchons alors le tube de Geissler de la sphère. Nous verrons aussitôt dans ce tube, même maintenu à une distance assez grande, une faible lueur très distinctement visible dans l'obscurité. Le phénomène augmentera d'intensité, si nous donnons au tube une position verticale et si nous mettons son extrémité supérieure en communication avec la terre, qui jouera alors le rôle d'un immense réservoir d'électricité. Si la sphère est munie de pointes, l'effet lumineux se produira à une distance qui pourra atteindre 2^{m}, à la condition qu'on emploiera une bonne machine et qu'on opérera dans des circonstances favorables.

Cette expérience prouve nettement que l'électricité s'échappe de la sphère et traverse la couche d'air intermédiaire, sans produire de lumière, mais, aussitôt qu'elle pénètre dans l'espace raréfié du tube, elle provoque l'apparition du phénomène lumineux. Le courant, qui n'était point assez fort pour faire rougir les particules d'air de la couche intermédiaire, se trouve posséder une force suffisante dès qu'il atteint l'air raréfié. En outre, un examen attentif du phénomène nous apprend que la distance à laquelle le courant peut produire ces phénomènes dépend de plusieurs circonstances : d'abord de la pression de l'air contenu dans le tube; plus cette pression sera faible, plus grande sera la distance; de l'intensité du courant, c'est-à-dire de la quantité d'électricité qui s'échappe de la sphère dans l'unité de temps, et enfin de l'état hygrométrique de la couche d'air intermédiaire.

Mentionnons ici une particularité fort importante pour notre théorie, c'est que le pouvoir conducteur de l'air raréfié atteint un

maximum lorsque la pression a une valeur de $0^m,005$ environ (1). Si l'on diminue la pression, le pouvoir conducteur diminue aussi; il en est de même si la pression augmente avec l'air sec. A $0^m,040$ de pression, il est 160 ou 170 fois plus petit qu'à $0^m,005$, et à $0^m,050$ le courant cesse d'être continu et se transforme en étincelles. Il est probable que le pouvoir conducteur de l'air sec, à la pression ordinaire de $0^m,760$, est au moins 10000 fois plus faible qu'à $0^m,005$. On peut donc regarder l'air raréfié à $0^m,005$ de pression comme un conducteur de l'électricité, relativement à l'air à la pression ordinaire ou même à une pression moindre qu'à $0^m,100$ et même $0^m,050$. L'air n'est donc point un isolateur aussi parfait qu'on le supposait généralement. Quant au phénomène lumineux, on serait disposé à croire qu'il se manifestera à une distance beaucoup plus grande de la sphère que le pouvoir conducteur de l'air du tube sera plus considérable, c'est-à-dire à une pression de $0^m,005$; mais il n'en est rien. Le courant est, il est vrai, affaibli par la diminution qu'éprouve le pouvoir conducteur lorsque l'air est plus raréfié, mais, d'autre part, la quantité de chaleur nécessaire pour faire rougir les particules d'air a diminué, parce que le nombre de ces particules est plus petit.

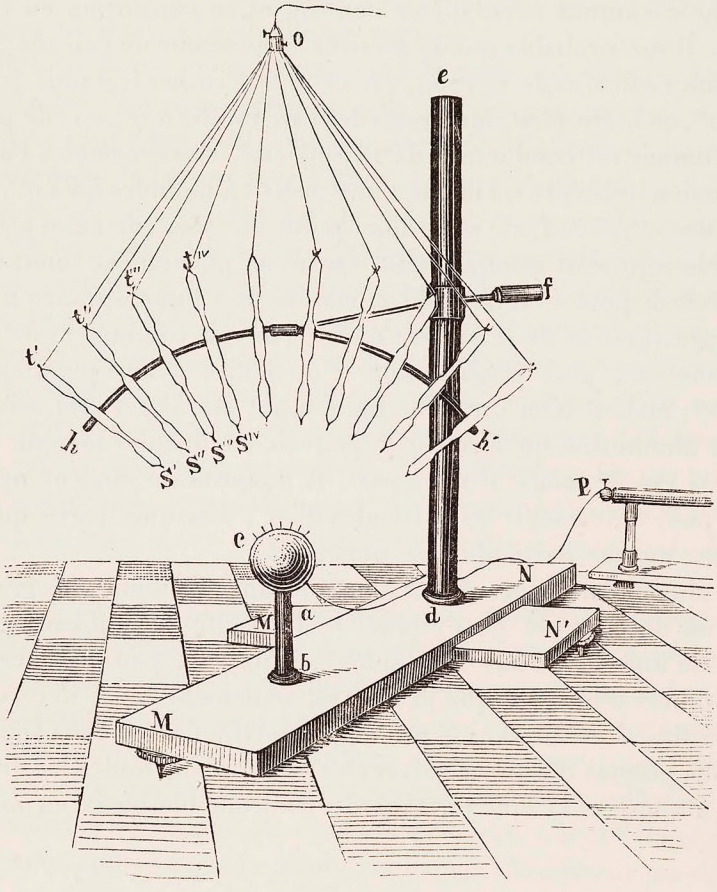
Le phénomène se manifeste à une distance d'autant plus grande que l'air du tube est plus raréfié. L'électricité s'échappant également de tous les points de la sphère, il importe peu de placer le tube plutôt d'un côté que de l'autre, seulement il est nécessaire que sa direction soit dans le prolongement d'un rayon de la sphère. Si nous plaçons des tubes suivant les rayons dans toutes les directions autour de la sphère, tous deviendront lumineux en même temps.

Appareil de l'aurore boréale. — C'est sur ce fait d'expérience

(1) Il résulte des recherches nouvelles de M. Edlund que le fait de ce maximum aurait sa cause dans une force électromotrice qui prend naissance aux électrodes. Cette force augmentera avec la raréfaction de l'air du tube; ainsi la conclusion qu'on en tire sur le vide comme un isolateur ne serait qu'une illusion. Mais quand bien même ces nouveautés se confirmeraient, elles ne changeraient pas les raisonnements exposés ci-dessus, parce que le pouvoir conducteur de l'air augmente toujours avec la raréfaction et devient déjà considérable à $0^m,005$ de pression.

qu'est basée la construction de notre appareil à aurores boréales, dont nous allons donner la description (*fig.* 13).

Fig. 13.



Une sphère creuse en laiton *c* est garnie, sur sa partie supérieure, de pointes fines fixées dans la direction des rayons; cette sphère est supportée par une tige cylindrique de gutta-percha *ba* fixée verticalement sur la planchette MN, qui constitue avec M′N′ le pied de l'appareil. Sur ce pied se trouve une autre tige isolante de gutta-percha (1) *de*, le long de laquelle peut glisser le bras *f* qui porte

(1) Cette tige peut aussi être construite en bois.

l'arc hh', tous les deux de matière isolante, auquel sont attachés dix tubes de Geissler dirigés comme les rayons de la sphère; dans ces tubes l'air est raréfié au moins jusqu'à un demi-millimètre de pression; les parties supérieures des tubes t, t', t'' et c communiquent à la terre par des fils métalliques réunis à un bouton O relié à une conduite de gaz; P est le pôle négatif de la machine électrique dont le pôle positif est à la terre. Le premier pôle est en communication avec la sphère c par un fil bien isolé Pa.

En mettant la machine en activité, il se produit dans tous les tubes un beau phénomène lumineux d'une ressemblance frappante avec l'aurore boréale. Dans des circonstances favorables, ce phénomène se produit encore à une distance de 2^m quand on opère avec une bonne machine électrique (1).

La Terre et l'atmosphère raréfiée considérées comme conducteurs. — Le globe terrestre est entouré d'une masse gazeuse dont les principaux constituants sont l'oxygène et l'azote mélangés; on y trouve en outre de l'ozone, de la vapeur d'eau, de l'acide carbonique, de l'ammoniaque, de l'acide azotique, etc., mais en proportions très minimes. Si la Terre était une sphère parfaite, sans mouvement et partout à la même température, ce mélange gazeux l'entourerait bien symétriquement; au voisinage de la surface terrestre, la couche enveloppante aurait une densité et une pression que des observations nombreuses ont permis d'égaler à une colonne de mercure ayant environ $0^m,760$ de hauteur à la température de 0^o. A mesure que l'on s'éloignerait de la surface terrestre, l'air se raréfierait de plus en plus et la densité diminuerait jusqu'à une certaine hauteur où l'on ait rencontré le vide. On n'a point encore évalué exactement cette hauteur, mais elle dépasse certainement plusieurs centaines de kilomètres. Cette diminution dans la densité ou dans la pression se fait d'après une loi

(1) Cet appareil a été deux fois exposé : au Congrès international des Sciences géographiques à Paris (1875), aux frais du mécène suédois bien connu, M. le baron O. Dickson, et au *Loan exhibition of Scientific apparatus;* à Londres, aux frais de l'Université de Helsingfors. A Paris, l'appareil s'illuminait sous l'influence d'une machine de Holtz, construite par Ruhmkorff; mais, à Londres, on avait employé une nouvelle machine électrique du système de Carré, que l'inventeur avait bien voulu mettre à notre disposition et qui donnait des résultats incomparablement meilleurs.

déterminée, susceptible d'être exprimée par une formule mathématique très simple. Laplace l'a établie, mais elle a été modifiée ensuite de manière à mieux s'accorder avec l'expérience (1). Or, si nous calculons à l'aide de cette formule la hauteur à laquelle la pression atteindra $0^{m},005$, nous obtiendrons à peu près 40^{km}.

Imaginons une surface passant par tous les points où la pression n'est plus que de $0^{m},005$, nous aurons une sphère creuse enveloppant la Terre et partout éloignée d'elle d'une distance de 40^{km}. On peut donc en conclure que la Terre, bon conducteur de l'électricité, est à une hauteur de 40^{km} entourée par un autre conducteur d'air raréfié, que nous désignerons sous le nom de *conducteur atmosphérique* ou *conducteur supérieur*. En supposant qu'une certaine quantité de fluide négatif soit placée à la surface de la Terre, et qu'une quantité égale de signe contraire recouvre le conducteur atmosphérique, ces deux fluides seront également distribués sur les deux conducteurs, et la force avec laquelle ils tendront à se recombiner sera partout égale.

Les circonstances où nous nous sommes placés sont en effet idéales et plusieurs causes interviennent pour les troubler, en modifiant la nature et surtout la position des deux conducteurs, l'un par rapport à l'autre. La surface de la Terre n'est pas uniforme, quoique les aspérités aient une valeur si faible relativement aux dimensions du globe que nous pouvons les négliger sans commettre d'erreur appréciable. Le conducteur atmosphérique n'est pas une surface, mais un espace s'étendant entre des limites où le baromètre indique une pression de $0^{m},040$ d'une part et zéro de l'autre. Toutefois nous sommes en droit de supposer que cet espace peut être remplacé par une surface passant par l'ensemble des points à $0^{m},005$ de pression et douée, par suite de la raréfaction de l'air, de telles propriétés qu'elle exerce la même influence électrique que l'espace qu'elle remplace. Nous raisonnerons donc désormais sur le conducteur atmosphérique comme s'il s'agissait d'une surface.

---

(1) Dans les circonstances simples où nous sommes placés, cette formule serait $x = 18{,}393 \log \frac{H}{h}$ kilomètres, x étant la distance cherchée, H et h les hauteurs de la colonne barométrique à la surface de la Terre et à la station supérieure. Pour notre problème, $H = 760^{mm}$ et $h = 5^{mm}$.

Position mutuelle du conducteur atmosphérique et de la Terre. — Étudions la position mutuelle des deux conducteurs. Diverses causes font sentir leur influence : le mouvement de la Terre, la forme aplatie de celle-ci, la vapeur d'eau contenue dans l'air et, avant tout, *l'inégale répartition de la chaleur sur la surface terrestre et dans l'atmosphère*. La plupart de ces causes ont été prises en considération lorsqu'on a établi d'une façon complète la formule barométrique citée plus haut (1).

Cependant, avant d'effectuer le calcul, il est bon d'éclaircir quelques points relatifs à la température de la surface terrestre et de l'atmosphère. En examinant une carte du globe indiquant les lignes isothermes annuelles, c'est-à-dire les lignes passant par tous les endroits où règne la même température moyenne annuelle, nous trouverons facilement que nous sommes en droit de fixer à $+ 25^{\circ}$ au moins la température de l'équateur, et à $- 12^{\circ}$ celle des régions circompolaires. Nous pourrions même admettre les nombres $+ 27^{\circ}$ et $- 20^{\circ}$, mais nous tenons à ne point nous montrer extrêmes dans nos suppositions. Dans les explorations aérostatiques, on a observé la rapide diminution de la température de l'atmosphère. En 1804, Gay-Lussac a trouvé une température de $- 9^{\circ},6$ à 6300^{m} de hauteur, alors qu'à la surface de la Terre le thermomètre marquait $+ 31^{\circ}$. En 1850, Barral et Bixio ont trouvé $- 40^{\circ}$ à la même hauteur; enfin, le 5 septembre 1862, Glaisher et Coxwell ont eu $+ 15^{\circ}$ à la surface et $- 24^{\circ}$ à 11000^{m}. Nous voyons que la température s'abaisse à mesure que la hauteur augmente, et si nous tenons à connaître la température régnant au delà des limites de l'atmosphère, les expériences nous fourniront des réponses variées. D'après les calculs que Pouillet a basés sur les expériences directes, la température des espaces planétaires serait de $- 142^{\circ}$.

D'autre part, M. Gyldén, astronome suédois, admet $- 170^{\circ}$, en s'appuyant sur les chiffres obtenus pendant des voyages aériens.

Afin d'éviter les hypothèses exagérées, nous supposerons, en

---

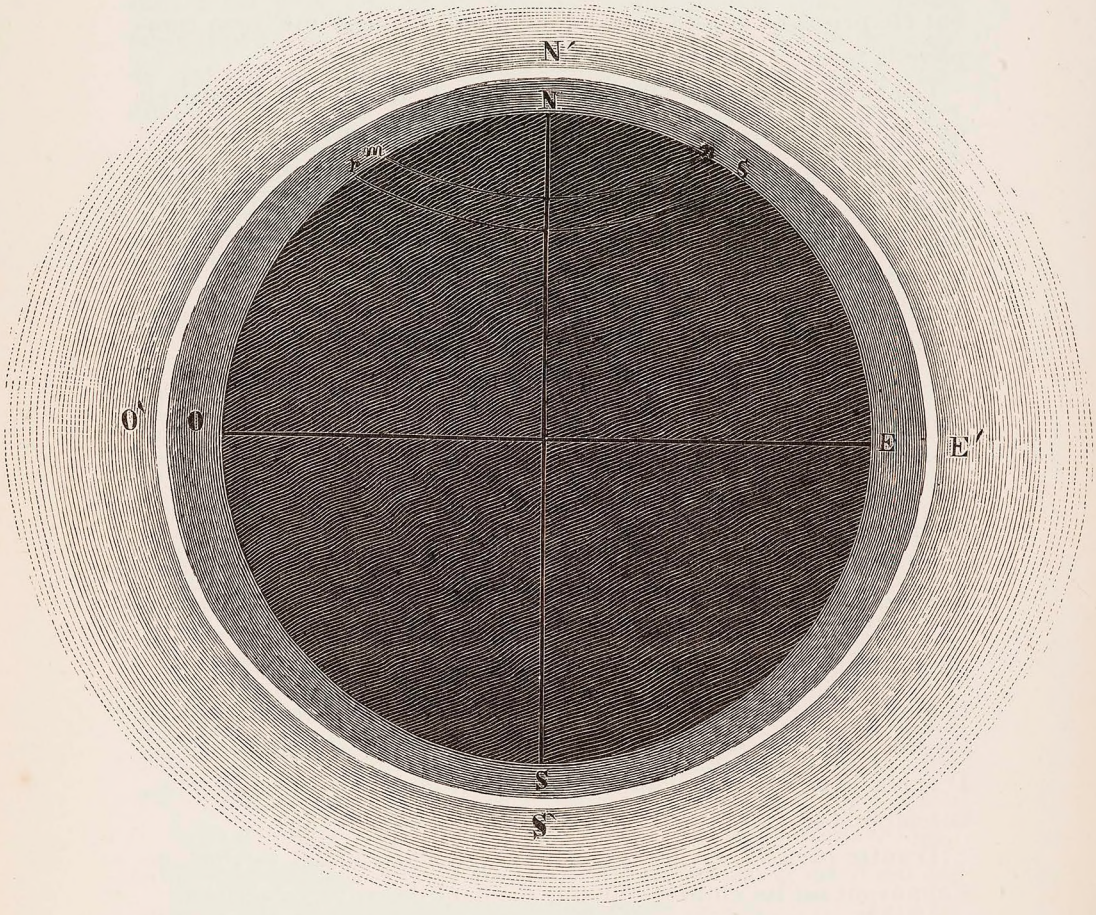
(1) La formule complète est

$$X = 18393^{km}(1 + 0{,}002837\cos 2\varphi)\left(1 + 0{,}004\,\frac{T + t}{2}\right)\log\frac{H}{h};$$

X, H et h ont la même signification qu'auparavant, φ représente la latitude, T et t les températures à la surface terrestre et à la station supérieure.

suivant les calculs de M. Seigey, fondés sur des expériences faites aux Alpes de la Suisse, que le conducteur atmosphérique est partout à une température uniforme de — 60°. En employant cette valeur et en admettant que l'air est partout à moitié saturé d'hu-

Fig. 14.



midité, nous obtenons pour hauteur du conducteur atmosphérique :

	km
A l'équateur	37428
Aux pôles	34252
Soit une différence de	3176

Dès lors ce conducteur et la surface terrestre occuperont la posi-

tion relative indiquée par la *fig.* 14, où NESO représente la Terre, et N'E'S'O' le conducteur atmosphérique, plus rapproché de la Terre aux environs des pôles qu'à l'équateur.

Distribution de l'électricité sur les deux conducteurs. — En admettant la présence d'une certaine quantité de fluide négatif sur la Terre et de fluide positif sur le conducteur supérieur, ces électricités seront distribuées de telle sorte que la quantité se rapportant à l'unité de surface sera 9 pour 100 plus grande près des pôles qu'à l'équateur, et cela sur les deux conducteurs. Par suite, la force attractive avec laquelle les deux fluides tendent à vaincre la résistance de la couche d'air interposée sera de 20 pour 100 plus considérable autour des pôles qu'à l'équateur (1).

En cherchant quelle était la source principale de l'électricité atmosphérique, nous avons montré que l'induction unipolaire produit une force, qui fait écouler l'électricité positive dans l'atmosphère, principalement par l'intermédiaire de la vapeur d'eau. Nous avons fait voir que cette force a une composante tangentielle : celle-ci intervient aussi pour amener l'électricité positive vers les endroits polaires. Bien que cette force exerce une influence dans toute l'atmosphère, son action devient cependant plus sensible sur le conducteur atmosphérique, parce que la résistance de l'air est moindre.

En tenant compte de cette force, nous devons donc regarder les

---

(1) Pour permettre au lecteur de juger combien l'influence de la température influe fortement sur la position du conducteur atmosphérique et sur la force attractive des deux électricités, nous mettrons sous ses yeux le Tableau suivant :

Si la température du conducteur atmosphérique offre les valeurs.....	—60°	—100°	—140°
Et la température de la Terre à l'équateur.....	+25°	+ 30°	+ 35°
Aux environs des pôles.....	—12°	— 30°	— 40°
Il en résulte une force plus grande autour des pôles qu'à l'équateur.....	19,4%	36%	53%

Dans nos calculs nous n'avons pas tenu compte de ce que la Terre et le conducteur atmosphérique diffèrent de la forme sphérique, ce qui influe sur la distribution électrique; mais cette petite quantité, non favorable aux résultats que nous avons obtenus, est largement compensée par la plus grande humidité de l'air dans les environs de l'équateur, ce qui donne au conducteur supérieur une hauteur plus considérable.

nombres qui représentent plus haut l'accroissement de la force entre l'électricité négative de la Terre et l'électricité positive du conducteur atmosphérique comme des valeurs minima. Cette force est alors supérieure à 20 pour 100.

Ces résultats découlent d'une manière facile de notre étude sur l'influence électrique et des circonstances indiquées par les *fig.* 12 et 14. Bien que nous ne puissions donner aux calculs précédents qu'une valeur approximative, ils nous suffisent cependant pour nous prouver que *l'une des causes principales de l'accumulation de l'électricité autour des pôles de la Terre se trouve dans la position réciproque des deux conducteurs.*

CHAPITRE XI.

LES COURANTS ÉLECTRIQUES DE L'AIR.

LA REPRÉSENTATION EXPÉRIMENTALE DE L'AURORE BORÉALE. EXPÉRIENCES DE L'EXPÉDITION FINLANDAISE POLAIRE.

Les courants électriques de l'air étudiés avec l'appareil d'écoulement.

Réflexions sur les mesures de l'électricité atmosphérique. — La connaissance de la charge électrique, ou la quantité d'électricité qui existe en un point de l'atmosphère, ne nous donne pas encore une idée nette des phénomènes électriques qui se passent en elle; mais la connaissance des variations qu'elle subit en différentes directions peut nous fournir une idée des *mouvements* de l'électricité ou des *courants électriques*.

Lorsque nous savons par expérience que la plupart des effets, et des plus importants que produit l'électricité, proviennent de *courants électriques*, nous comprenons facilement que l'étude de l'électricité atmosphérique doit surtout avoir pour but de montrer ces courants et d'expliquer les lois qui les régissent.

La raison pour laquelle la question n'a pas été traitée de cette manière, c'est qu'on regardait l'air comme un milieu isolant, dans lequel ne pouvaient se produire que des *décharges électriques momentanées* et jamais de *courants électriques*.

L'aurore boréale donnait une preuve éclatante de l'existence de ces courants, mais jusqu'à nos jours on a parfois, comme nous l'avons vu, cherché la cause ailleurs.

Expériences de 1871 *et* 1882. — Après avoir acquis, dans l'expédition polaire suédoise de 1868, la connaissance de certaines singularités, au point de vue électrique dans les régions arctiques, nous

avons fait, pendant l'expédition de 1871, près du presbytère d'Enare, quelques essais pour voir s'il était possible d'examiner, avec le peu de moyens que nous avions à notre disposition, le courant électrique dont nous supposions l'existence. Nous avons réussi alors à constater, avec un tout petit appareil d'écoulement, la présence du courant et à produire un phénomène de lumière en forme de rayon ; mais, à cause des difficultés extérieures, que nous ne pouvions alors surmonter, les résultats gardèrent une certaine incertitude.

Pendant l'année 1882-83, l'expédition finlandaise eut l'occasion de faire des recherches beaucoup plus étendues, qui donnèrent des résultats plus satisfaisants. On constata l'existence d'un courant électrique de l'atmosphère allant vers la Terre. Près du village de Sodankylâ, on put produire, avec un grand appareil d'écoulement placé sur le sommet le plus élevé d'Oratunturi (300^{m} de hauteur), une lumière diffuse jaunâtre qui donnait dans le spectroscope la raie caractéristique de l'aurore polaire, et, plus tard, on fit apparaître un véritable rayon d'aurore polaire sur le Piétarintunturi, près de Kultala (*Pl. V*).

Expériences de 1883-1884. — Dans ces deux occasions, le courant électrique fut mesuré. Les résultats de ces expériences étaient d'une grande importance ; mais ils avaient cependant besoin d'être confirmés, parce que l'on rencontrait pour l'exécution des difficultés de toutes sortes.

Dans toutes les expériences, l'appareil d'écoulement était réuni à la terre par un fil conduisant à une plaque de zinc placée dans un filet d'eau.

Comme il se produit au contact de la plaque de zinc avec l'eau une force électromotrice, on pouvait croire que le courant accusé par le galvanomètre avait peut-être sa seule et unique cause dans cette force.

L'expédition de 1883-84 possédait les moyens nécessaires pour répondre à ces objections, ainsi qu'à bien d'autres, et pouvait vérifier autant que possible les lois auxquelles ce courant obéissait.

Au milieu du mois de septembre, un appareil provisoire fut installé sur la montagne de Kommattiwaara, située à 6^{km} de la station Sodankylâ et haute de 129^{m},7. Un fil conducteur, supporté

Tryckt hos F. Tilgmann, Helsingfors.

par des isolateurs Mascart (à acide sulfurique), allait de l'appareil à la station, où il communiquait avec un galvanomètre, et du galvanomètre un autre fil était réuni à une plaque de zinc amalgamée, plongée dans la rivière voisine. Après quelques essais préliminaires faits avec cet appareil et qui montrèrent que, malgré le peu de hauteur de la montagne, le courant de l'atmosphère pouvait être étudié, on construisit un appareil d'écoulement reposant sur une construction solide en bois qui fut prête le 19 octobre.

Appareil d'écoulement. — L'appareil d'écoulement se compose d'un fil de fer de $0^{m},002$ de diamètre, portant des pointes soudées à $0^{m},50$ les unes des autres.

Le fil formait des spires en carreau, où chaque tour se trouvait à la distance de $1^{m},50$ du suivant, et le tout était supporté, avec des pointes en l'air, par des poteaux de $2^{m},50$ de hauteur, munis d'isolateurs à acide sulfurique. Le fil à pointes occupait une surface de 364^{mq}.

On chercha avec cet appareil la cause perturbatrice qui pouvait amener l'influence des divers métaux qui formaient les plaques enfouies dans la terre. On reconnut, en général, qu'une plaque de zinc amalgamé plongée dans l'eau était la meilleure, parce qu'elle donnait la force électromotrice la plus faible.

Méthode de mesures. — Le galvanomètre indiqua un courant de *la terre vers l'atmosphère,* c'est-à-dire de la plaque de zinc vers l'appareil d'écoulement.

Nous appellerons dorénavant cette direction du courant *négative* et la direction contraire, de l'atmosphère vers la terre, *positive.*

Les déviations du galvanomètre étaient très variables et ces variations se caractérisaient par des mouvements brusques, tantôt dans l'une, tantôt dans l'autre direction.

Avec cet appareil, les observations se firent à Sodankylâ pendant l'automne et l'hiver de la manière suivante :

1° Les déviations directes du galvanomètre par le courant furent observées ;

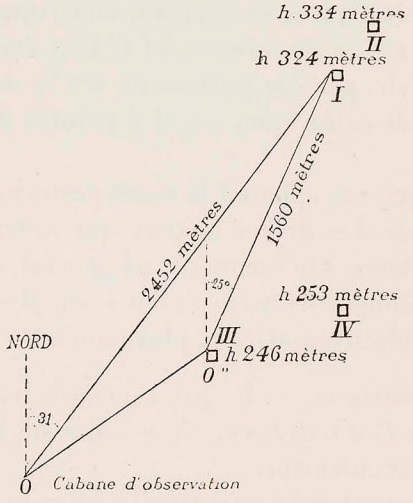
2° On introduisit dans le circuit un élément de Leclanché, en plaçant d'abord le pôle positif tourné vers la terre, puis ensuite vers la montagne.

Par ce procédé, on connaissait, pour chaque expérience, la force

électromotrice du courant. Cette force électromotrice se composait de deux parties : l'une, produite par la plaque de zinc et l'eau ; l'autre, par l'action de l'électricité de l'atmosphère sur l'appareil d'écoulement.

La force électromotrice de la plaque de zinc et de l'eau est presque constante, de sorte que les variations observées sur le galvanomètre résultent du changement des forces électromotrices de l'air, ainsi que du changement de la résistance du conducteur. La méthode d'observation donne une mesure relative de cette résistance, de sorte que, par ce procédé, on peut déterminer les varia-

Fig. 15.



tions dans la force électromotrice qui provient de l'électricité de l'air. Quant aux observations de Sodankylâ, on a à remarquer qu'elles montraient, comme nous l'avons dit, un courant négatif, mais qui, déjà aux mois d'octobre et de novembre, devenait quelquefois positif, surtout lorsque l'aurore boréale apparaissait.

Les appareils et les expériences à Kultala. — Les examens plus étendus, sur l'utilité des appareils d'écoulement pour étudier les courants électriques de l'atmosphère, se firent à la station de Kultala, qui était sous tous les rapports plus propre à ce but. A cause de la douceur de l'hiver, l'expédition ne put s'y rendre que le 19 décembre, après avoir pris quelques arrangements pour

le séjour et les travaux à cette station. Des observations journalières du courant de l'atmosphère s'y firent de la même manière qu'à Sodankylâ, c'est-à-dire qu'un fil conducteur, porté par des isolateurs Mascart, conduisait le courant de l'appareil d'écoulement au galvanomètre et de là à une plaque de zinc amalgamé plongée dans la rivière d'Ivalo.

Près de cette station, on construisit, pendant les mois de janvier et de février, trois appareils d'écoulement, et un deuxième fil conducteur fut mis sur des isolateurs Mascart.

La *fig.* 15 représente la disposition des appareils. Leur hauteur était la suivante :

I	32^{4m}	III.....	246^{m}
II.....	334^{m}	IV.....	253^{m}

La distance entre l'appareil I et la station était de $3^{km},626$ et la distance entre I et II de $0^{km},339$.

En O se trouvait une petite maison d'observation avec une cheminée.

En O′ un commutateur où les fils conducteurs des quatre appareils pouvaient être combinés aux deux fils conducteurs de la station.

Résultats. — On fit avec cet appareil, principalement au mois de mars, un certain nombre d'expériences dont les résultats les plus importants peuvent être résumés de la manière suivante :

1° Si deux appareils d'écoulement à peu près semblables et placés à la *même hauteur* sont réunis au galvanomètre, ils ne donnent aucun courant, c'est-à-dire que la déviation du galvanomètre est égale à 0.

2° L'appareil II réuni par le galvanomètre à l'appareil I donnait toujours un courant *positif* dont la force variait considérablement. Les nombres ci-dessous donnent comme exemple la force électromotrice exprimée en volts pendant quatre jours, du 18 au 21 mars :

Mars.			
18	19	20	21
volt	volt	volt	volt
0,1171	0,1161	0,1891	0,0530
0,1714	0,1400	0,3262	0,0530
		0,2632	
		0,2632	

On obtient ces nombres par l'introduction d'un élément Leclanché, comme nous l'avons dit plus haut. La force électromotrice de cet élément fut déterminée par comparaison avec un élément étalon de Daniell. La différence de hauteur entre les appareils II et I étant de 10^{m}, on voit que la force électromotrice variait ces jours-là entre les limites $0^{volt},0326$ et $0^{volt},0033$ par mètre.

Il résulte des observations que *la grandeur absolue et les variations de la force électromotrice du courant électrique de l'atmosphère* peuvent être étudiées avantageusement avec *deux appareils d'écoulement de différente hauteur*.

Puisque deux appareils semblables situés sur la même hauteur ne donnent pas de courant, il en résulte clairement que la force électromotrice observée ne dépend que de la différence de hauteur, c'est-à-dire que l'électricité est ainsi distribuée dans l'atmosphère, qu'une force électromotrice prenant naissance produit un courant qui est dirigé vers la Terre.

L'étude, continuée avec les quatre appareils, donnait ce résultat singulier :

3° Tout près de la Terre, se trouve une couche d'air où l'électricité positive a une plus grande densité que dans la couche située immédiatement au-dessus d'elle, de sorte qu'à partir de la surface de la Terre la densité va en diminuant jusqu'à un minimum où elle s'accroît ensuite de nouveau. Les appareils III et IV se trouvaient dans cette couche et donnaient, combinés avec I et II, un courant négatif, c'est-à-dire de bas en haut.

Ces résultats, qui se montraient aussitôt, rendaient assez difficile le travail projeté avec les quatre appareils. La difficulté augmentait encore parce que le pouvoir conducteur de l'air diminuait rapidement auprès de la Terre.

Étude sur l'électricité au voisinage de la Terre. — Pour étudier avec plus de soin cette singularité, on construisit deux appareils d'écoulement transportables. Ceux-là se composaient d'une croix formée de planches minces, sur laquelle on mit en spirale plusieurs tours de fil à pointes, de manière que le nombre des pointes fût de 30. Ces petits appareils, que nous appellerons S′ et S″, furent érigés près de H sur le point le plus élevé du Piétarintunturi ; l'un S′ à 2^{m} au-dessus de la Terre, l'autre S″ au bout d'un mât de

9^m, 10 de hauteur. Tous les deux étaient placés sur des isolateurs et séparément réunis à la station par des fils conducteurs.

Avec ces appareils on obtint alors un courant de S′ à S″, c'est-à-dire négatif (de bas en haut). On veilla avec un soin tout particulier à ce qu'il n'y eût aucune faute accidentelle dans les communications ou dans l'arrangement des appareils. La déviation obtenue était très petite, mais parfaitement mesurable.

Les expériences définitives avec ces appareils furent faites le 26 mars, à 11^h du soir et durèrent environ trois heures. Ces expériences ayant une importance particulière, nous en décrirons l'exécution.

On choisit la nuit, parce que le vent était alors moins fort sur la montagne. Dès que les observateurs, MM. Granit et Roos, eurent signalé par le téléphone que les expériences pouvaient commencer, on mesura le courant au galvanomètre : S′ était alors à 2^m et S″ à 9^m au-dessus de la Terre; *la déviation était négative.*

S″ fut descendu à la même hauteur que S′; *la déviation était égale à zéro.*

S″ fut remonté à la hauteur de 9^m; *la déviation était négative comme précédemment.*

S′ fut alors attaché à deux poteaux hauts de 3^m, munis d'isolateurs et élevés par deux hommes à une hauteur de 4^m; *la déviation devint positive.*

Cette expérience a donc prouvé que la densité électrique de la couche d'air diminuait jusqu'au moment où le courant changeait de signe et que le minimum de la densité doit se trouver entre 2^m et 4^m de hauteur.

Il aurait été bien intéressant de continuer ces expériences et de les étendre, mais cela ne pouvait plus se faire parce que le séjour sur la montagne n'était plus tenable. Le 25 mars, nous y étant rendus, pour examiner les appareils et nous rendre compte qu'aucune faute n'avait été commise, bien que la température ne fût plus que de — 12°, nous ne pouvions travailler qu'en tournant le dos au vent; dans le cas contraire la figure devenait insensible en quelques minutes, et l'on pouvait à peine respirer. Sur la montagne il faisait presque toujours du vent, mais il était souvent moins fort la nuit que le jour. Pendant ces expériences importantes nous étions occupés dans l'observatoire à lire les déviations du galvanomètre, mais

tout le temps se passa dans une vive inquiétude pour le bien-être des observateurs.

Heureusement tout finit bien.

4° *A partir d'une couche d'air qui se trouve à quelques mètres au-dessus de la terre, la force électromotrice croît avec la différence de hauteur entre les appareils d'écoulement.*

On n'a pu déterminer avec certitude les lois de cet accroissement, mais il est probable que *la force électromotrice croît plus vite qu'en raison directe de la différence des hauteurs.*

Ces résultats se rapportent à des jours clairs. L'humidité dans l'air change la résistance électrique et semble aussi agir sur la force électromotrice.

Sur l'un des appareils S, un certain nombre de pointes furent garnies de mèches trempées dans du pétrole, et allumées.

On mesura l'effet, et l'on vit que la résistance diminuait un peu, mais la force électromotrice restait invariable.

Étude des phénomènes de lumière produits par l'appareil d'écoulement.

Caractère météorologique de l'hiver 1883-84. — Nous savons que l'année 1883-84 a fait exception à toutes les règles au point de vue météorologique. Elle n'était donc pas favorable, comme nous l'avons déjà dit, aux expériences sur les phénomènes lumineux. Il faut pour les voir un ciel clair et de plus l'absence du clair de lune. Il y eut peu de soirées pendant lesquelles le phénomène put être étudié.

Le nombre relativement petit ($\frac{1}{10}$ du nombre ordinaire pour la latitude) des aurores polaires et leur faible intensité montrent aussi que les forces électriques agissaient dans des circonstances anormales. La cause provenait sans doute de la neige qui tombait toujours et de la température élevée. Cet état de choses a été un peu surprenant, parce que nous sommes actuellement (1884) presque au milieu d'une période maximum de l'aurore polaire.

Ainsi, si les faits nouveaux que l'expédition a ajoutés à nos connaissances ne sont pas nombreux, ils sont du moins assez importants.

Lumière en forme de lueur diffuse. — On sait par des expériences antérieures que les appareils d'écoulement produisent de la lumière tantôt sous *forme de lueur diffuse*, tantôt en *forme de rayons*, s'élevant au-dessus de l'appareil.

La lumière diffuse, donnant toujours la raie caractéristique de l'aurore polaire, se manifeste assez facilement. On l'apercevait déjà distinctivement sur l'appareil de Kommattiwaara à Sodankylâ, quelquefois à l'œil nu et très souvent avec le spectroscope. En automne 1882, M. Bièse découvrit qu'on pouvait obtenir la raie spectrale de l'aurore polaire au sud-sud-est de la station, à quelques degrés de l'horizon dans la direction de la montagne Luostatunturi tandis qu'il n'y en avait pas de trace ailleurs. Pendant l'automne de 1883, on voyait quelquefois la raie dans la direction de la montagne Kommattiwaara quand elle n'apparaissait pas dans la direction sud-sud-est.

Le phénomène était surtout très distinct dans les circonstances suivantes :

Le soir du 1er novembre, après qu'un vent fort de l'ouest eut chassé les nuages, on vit une aurore polaire qui commençait par un arc assez régulier au nord-nord-ouest. Cet arc touchait l'horizon vers l'est, à environ 20° au nord de Kommattiwaara.

Tandis que la raie spectrale fut obtenue dans toute la longueur de cet arc, elle disparut entièrement sur cette étendue de 20° de l'horizon, entre l'extrémité de l'arc et la montagne, mais réapparut distinctement dès que la fente du spectroscope fut dirigée vers l'appareil d'écoulement; du côté sud de la montagne, la raie disparut de nouveau complètement.

En général, l'étude de ce phénomène de lumière se fit à une distance de 6^{km}, mais aussi deux fois plus près.

Le 12 novembre, on obtint, malgré le clair de lune, l'air brumeux et la neige, la raie bien distincte à une distance de 1^{km}. Le phénomène était ce soir-là très intense, se montrant comme un foyer mobile le long de tout l'appareil, ayant au-dessus une lueur diffuse *rayée*. La lumière fut observée pendant quinze minutes.

Le 17 novembre on fit une observation semblable. A Kultala, les phénomènes de lumière se montraient, en général, avec une plus grande intensité; mais la plupart d'entre eux n'étaient visibles qu'avec le spectroscope, à cause du clair de lune plus ou moins vif.

Expériences avec la machine de Holtz. — Pour obtenir encore une preuve de l'origine électrique de l'aurore boréale, l'expédition s'était procuré une machine double de Holtz, qui, malgré sa fragilité et les difficultés du transport sur des rennes, arriva en bon état au lieu de destination.

Quand cette machine fut introduite dans le conducteur de l'appareil I, ayant le pôle positif tourné vers la Terre, le phénomène de lumière se voyait toujours plus distinctement.

Il avait déjà été observé le 17 décembre à Sodankyla, lorsque la machine fut mise en activité dans le conducteur de Kommattiwaara ; mais les études les plus étendues se firent à la station de Kultala.

Les observations, qui se firent toujours dans la cabane O ou du point O' (*fig.* 15), datent des jours suivants : 27 janvier; 3, 4, 6, 7, 8, 12, 16, 20 et 24 février 1884.

Elles furent exécutées par M. Bièse et nous; un rapport fut dressé pour chaque soir, le 3 février par nous et les autres soirs par M. Bièse.

Voici ceux du 3 et du 6 février :

1884, 3 février. Arrivé à la cabane d'observation à $6^h 30^m$. La Lune était levée et éclairait vivement la cime des montagnes ; on ne put découvrir le phénomène de l'aurore, ni à l'œil nu, ni avec le spectroscope. A un signal téléphonique, la machine de Holtz fut pourtant mise en activité dans le conducteur avec le pôle positif vers la terre. Malgré la plus grande attention, on ne pouvait découvrir aucune lumière de la nature de l'aurore polaire.

Cependant la Lune se couvrit peu à peu d'un voile de nuages (nimbus) et l'intensité de sa lumière diminua de moitié.

Quand cela eut duré environ une demi-heure, un phénomène de lumière, en forme de nuages blancs, montait en flamme de l'appareil I, donnant la raie caractéristique et étant très *distinctement visible* même à l'œil nu. Au signal, la machine électrique fut de nouveau mise en activité et alors les flammes se succédèrent, donnant chaque fois la raie spectrale caractéristique.

La raie avait, dans cette expérience, un caractère un peu singulier; bien que la fente fût très étroite, la raie d'aurore polaire était assez large et fut suivie d'un spectre continu très distinct vers F. A 8^h on arrêta la machine : alors les flammes se firent plus rares et devinrent plus faibles.

A $8^h 15^m$ l'expérience recommençait avec le même résultat.

Un brouillard enveloppa bientôt la cime et les expériences cessèrent à $8^h 40^m$.

Le 7 février, les nuages étaient 5.C.S. ($\frac{5}{10}$ cirro-stratus) et la raie ne pouvait être observée que projetée sur le spectre intense de la Lune. De temps en temps, on obtint la raie très faible au ciel nord et ouest, mais l'appareil I ne donnait rien.

Cependant, quand la machine de Holtz fut mise en activité, on obtint la raie très distincte, surtout à la décharge par étincelles à petite distance de la machine. En introduisant un tube de Geissler dans le conducteur près de la machine, la raie devint encore plus intense; elle était très distincte lorsque la décharge se fit par étincelles. Nous n'avions encore jamais vu la raie plus intense.

M. Bièse fait remarquer encore qu'aucune ligne d'absorption, auprès de D, ne fut observée dans le spectre de la Lune, bien que son intensité pût être variée considérablement (Note XIII).

Les autres rapports ressemblent plus ou moins aux précédents.

Résultats. — Il résulte d'une manière évidente :

1° Que l'appareil d'écoulement produit en certaines occasions une lumière diffuse qui donne la raie spectrale de l'aurore polaire;

2° Qu'une machine de Holtz mise en activité dans le conducteur renforce le phénomène, s'il existe déjà, et peut même le provoquer lorsque les circonstances extérieures sont favorables;

3° Que le phénomène de lumière ne se voit pas à l'œil nu si le clair de lune a une grande intensité, mais avec le spectroscope on reconnaît le plus souvent sa présence.

Lumière en forme de rayons. — Le rayon sur le Piétarintunturi le 29 décembre 1882. — Par des expériences antérieures nous nous étions fait l'idée que le phénomène en forme *de rayons* paraîtrait assez facilement. Cependant il faut pour cela un *ciel serein,* une *température basse,* une *pression barométrique relativement basse* et, de plus, une aurore polaire au moins *faible.*

Tout ce concours de circonstances s'est produit rarement pendant cet hiver, et, quand il a eu lieu, c'était d'une manière imparfaite. Cependant ce phénomène s'est montré deux fois : la première le 27 février, et la seconde le 2 mars, selon les rapports de l'observateur, M. Roos.

1884, 27 février, le soir. Du point O, on observait un faible arc d'aurore polaire, s'étendant de l'ouest au nord-nord-est et dont l'intensité augmentait peu à peu.

En même temps apparaissait, dans la direction du Piétarintunturi, au-dessus de l'arc, mais n'en sortant pas, un faisceau de rayons très intenses, qui marchait rapidement vers l'ouest et disparut après avoir passé la direction nord. Sur le reste du ciel on ne voyait point de rayons.

1884, 2 mars, le soir. M. Granit et moi (Roos) nous aperçûmes du point O une aurore polaire, qui augmentait rapidement en intensité et formait déjà une *couronne* à 8^h du soir.

Je me rendis aussitôt au point O′, pour que les phénomènes lumineux qui pourraient paraître au-dessus des appareils du Piétarintunturi pussent être observés en même temps des deux points.

A environ $10^h 30^m$, j'aperçus un rayon très intense dans la direction de l'appareil I, penchant un peu vers l'est au commencement, mais se montrant peu à peu en forme de faisceau de rayons avec une faible inclinaison vers l'ouest.

Le phénomène dura trente à quarante secondes.

Au signal téléphonique M. Granit, qui restait au point O, répondit qu'il ne voyait aucun phénomène de lumière au-dessus de l'appareil I. A de courts intervalles, nous vîmes après cela trois fois un faible rayon dans la même direction, mais alors d'un autre aspect. Ce rayon était vertical, de largeur égale et avait une couleur jaune pâle. Quoique faible, il était pourtant très distinct.

M. Granit ne pouvait découvrir du point O aucun rayon, ni au-dessus de l'appareil, ni autour de la montagne, à une distance d'environ 15° des deux côtés.

Le clair de lune, qui était très vif ce soir-là, et l'aurore polaire rendaient très difficile l'observation du phénomène de lumière faible au-dessus de l'appareil d'écoulement; la distance du point O à l'appareil I était aussi de $2^{km},45$, tandis que celle de O′ à l'appareil I n'était plus que de $1^{km},56$.

S'il peut y avoir quelque doute quant à la première observation, c'est-à-dire si le rayon était au-dessus de la montagne ou non, la seconde observation du 2 mars est certaine. Si M. Granit ne voyait aucun rayon du point O à une distance angulaire de 15° des deux côtés de la montagne, cela prouve seulement que la lumière était

trop faible pour franchir une distance de $2^{km},45$, bien qu'elle fût visible à $1^{km},56$. Le reflet du clair de lune était aussi plus fort au point O qu'à O′, parce que la Lune se trouvait à ce moment presque au nord-est.

Nous avons vu que c'est par exception que l'appareil d'écoulement produit le phénomène de lumière en forme de rayon. Cependant ceci a été observé quatre fois, dont deux fois avec pleine certitude :

1° 1871, le 16 novembre, sur la montagne Luosmawaara, près du presbytère d'Enare;

2° 1882, le 29 décembre, sur le Piétarintunturi, près de Kultala;

3° 1884, le 27 février, au même endroit;

4° 1884, le 2 mars, encore au même endroit.

Les observations faites le 29 décembre 1882 et le 27 février 1884 ne peuvent pas être contestées.

Sur la *Pl. V*, nous avons reproduit le phénomène tel qu'il nous apparut, le 29 décembre 1882, à une température très basse, — 30°.

On voit à gauche un arc d'aurore boréale assez clair, dont l'extrémité disparaît derrière la montagne, sur la cime de laquelle le rayon se montre à peu près avec la même intensité qu'il aurait en réalité. Le ciel au fond est couvert d'une lumière jaunâtre sur laquelle se dessine le rayon.

Sur le premier plan se trouve la cabane d'observation, dans laquelle était placé le galvanomètre. La distance entre la cabane et la cime de la montagne était de 600^{m} environ et la hauteur du rayon à peu près 134^{m}. C'est de cet endroit-là que nous aperçûmes d'abord le rayon, et nous nous rendîmes aussitôt à un autre point situé plus au sud, de telle manière que la ligne de visée à la montagne avait décrit pendant notre course un angle d'environ 90°. Nous passâmes par une petite forêt basse; mais, chaque fois que la montagne apparaissait, nous vîmes aussi le rayon avec une intensité variable (Note XIV) (1).

(1) Toutes les observations concernant la mesure des courants électriques de l'atmosphère et les phénomènes singuliers de lumière polaire seront publiées, *in extenso*, dans le tome III des *Explorations internationales des régions polaires* [par l'expédition polaire finlandaise à Sodankylà et à Kultala (1882-1884)] actuellement sous presse. La preuve citée page 111 y sera donnée.

CHAPITRE XII.

THÉORIE ACTUELLE DE L'AURORE POLAIRE.

Distribution de l'électricité atmosphérique.

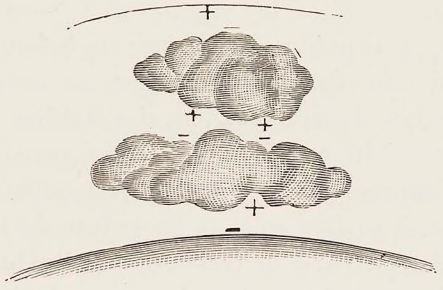
Électricité des nuages. — Les considérations dans lesquelles nous sommes entrés vont nous permettre de donner une explication scientifique de l'aurore boréale.

La totalité de l'électricité positive, qui, ainsi que nous l'avons vu, tire son origine directe ou indirecte de la vaporisation par l'intermédiaire de l'induction unipolaire, est distribuée de la façon suivante dans l'atmosphère. Une partie, probablement la moindre, reste dans les couches inférieures et se manifeste par les phénomènes de l'électricité atmosphérique que nous avons précédemment décrits. Une autre partie demeure dans la vapeur d'eau condensée dans les régions des nuages; on reconnaît sa présence par les grands phénomènes du tonnerre et de l'éclair, immense étincelle électrique jaillissant entre deux nuages ou d'un nuage à la terre. La décharge électrique est violente, parce que le nuage est bon conducteur et qu'il permet ainsi à une grande quantité d'électricité de franchir instantanément l'espace intermédiaire. Si nous supposons deux couches nuageuses situées au-dessus l'une de l'autre, l'électricité s'y distribuera comme le montre la *fig.* 16. La couche supérieure sera électrisée négativement en haut et positivement en bas, et il en sera de même pour la couche inférieure.

Cette distribution, produite par l'influence du conducteur supérieur qui est positif et la Terre qui est négative, a pour conséquence une décharge violente entre les deux nuages. Le plus souvent la décharge produite en haut et en bas des deux nuages est lente, parce que l'air raréfié des hautes régions de l'atmosphère conduit

assez bien l'électricité, que la terre présente une foule de points saillants qui facilitent beaucoup l'écoulement du fluide, enfin par suite de l'humidité contenue dans les couches basses de l'atmosphère. Cependant il arrive que la décharge est violente, et nous

Fig. 16.



l'appelons la *foudre*. D'autre part, l'éclair de chaleur nous montre que la décharge de l'électricité négative du nuage supérieur est susceptible d'atteindre un assez puissant degré de violence; on sait en effet que ce phénomène est un coup de foudre s'effectuant à une telle distance de la terre et dans un air si raréfié, que nous ne pouvons en entendre le bruit.

La région des nuages s'abaisse en même temps que le conducteur atmosphérique à mesure qu'on s'approche des contrées polaires. Il en résulte que dans ces contrées les orages éclatent avec une violence extrême peu d'instants avant de cesser tout à fait, car la décharge se fait le plus souvent entre le nuage et la Terre. Il est vrai qu'ils sont assez rares, car on n'en constate jamais au-dessus de 70° de latitude nord.

Électricité du conducteur atmosphérique. — Une troisième portion de l'électricité produite par les causes susdites est conduite par la vapeur elle-même dans les hautes régions de l'atmosphère, où elle atteint le conducteur atmosphérique sur lequel elle se distribue, de telle sorte qu'en moyenne la quantité d'électricité répandue sur chaque unité de surface de l'un et de l'autre conducteur est de 9 pour 100 plus considérable aux environs des pôles qu'à l'équateur. Dès lors la force attractive réciproque, c'est-à-dire celle avec laquelle les deux électricités tendent à vaincre la résistance

de la couche d'air isolante, est au moins de 20 pour 100 ou $\frac{1}{5}$ plus grande aux environs des pôles qu'à l'équateur.

Remarquons que l'état électrique négatif de la terre pourrait développer par influence de l'électricité positive sur le conducteur atmosphérique dont le fluide négatif serait repoussé vers les limites extrêmes de l'atmosphère. La distribution resterait cependant la même.

Si la première cause prédomine, il arrivera qu'aux endroits où les causes de la production de l'électricité agissent avec le plus d'énergie, c'est-à-dire dans la zone torride, il s'établira de bas en haut un courant d'électricité positive qui prendra un signe contraire à mesure qu'on s'approchera des pôles. Inversement, si la seconde cause prédomine, il se fera en tous les points de la terre un courant d'électricité positive, se dirigeant de haut en bas et dont l'existence croîtra d'autant plus qu'on se rapprochera davantage des régions polaires.

Courant qui produit l'aurore boréale. — C'est ce courant électrique de haut en bas qui est la cause de l'*aurore boréale*. Considérons ce qui se passe dans une *zone* environnant le pôle nord de la Terre. En bas se trouve la terre négative, en haut le conducteur atmosphérique qui est positif, et dans l'intervalle une couche d'air isolante dont la résistance doit être vaincue. Admettons que l'électricité ait atteint un potentiel tel que la force d'attraction soit exactement équilibrée par cette résistance; il se fera une neutralisation, si les quantités d'électricité portées par les conducteurs sont augmentées, ou bien si la résistance est diminuée.

Ce dernier cas se présentera si la zone est atteinte par un vent de sud apportant de la vapeur d'eau qui, par suite du peu d'élévation de la température, se condensera en diminuant ainsi la résistance de l'air ou, ce qui revient au même, en augmentant son pouvoir conducteur. La neutralisation ne peut devenir violente, parce que l'électricité doit venir d'un vaste espace d'air raréfié, bon conducteur, il est vrai, par rapport à l'air à la pression ordinaire, mais pourtant insuffisamment conducteur pour permettre à une grande quantité de fluide de s'écouler au même instant. Si le conducteur atmosphérique conduisait aussi bien que les métaux, la décharge aurait lieu instantanément par un seul éclair.

Le courant commence donc à s'écouler lentement des couches inférieures de l'air raréfié vers la Terre; l'équilibre électrique est rompu dans tout l'espace environnant où afflue une nouvelle quantité d'électricité qui vient remplacer celle qui s'est écoulée. C'est dans cet espace rempli d'air raréfié qu'apparaissent alors des rayons lumineux, conséquence du courant qui en général n'est point assez fort pour les produire dans les couches peu élevées de l'atmosphère. En amenant un courant électrique, mobile dans toutes ses parties, dans le voisinage du pôle d'un barreau magnétique, ce courant se placera, par rapport au pôle, dans une position telle que la force magnétique sur lui sera nulle.

Les rayons de l'aurore boréale ne sont autre chose que ces courants mobiles et, par conséquent, sous l'influence du magnétisme terrestre, ils doivent se disposer de façon à rester parallèles à la direction de la force totale du magnétisme terrestre; ils deviennent donc parallèles à l'aiguille d'inclinaison. A mesure qu'ils s'élèvent, ils doivent se *rapprocher les uns des autres*, parce que des courants ayant même direction s'attirent mutuellement, et cette attraction augmentera dans les régions les plus hautes, puisque l'intensité du courant sera plus grande par suite de la diminution de la résistance. Ainsi s'explique la disposition si remarquable des rayons de l'aurore boréale. Mais le magnétisme terrestre ne peut aucunement être considéré comme la cause de la lumière polaire; il se borne à la production de l'induction unipolaire et à disposer dans un certain ordre les rayons lumineux déjà existants.

Nous comprenons aisément pourquoi les aurores boréales peuvent avoir lieu sur des espaces très restreints; car, si la résistance de l'air n'est diminuée que sur un espace minime, le courant électrique sera resserré entre les mêmes limites. Un nuage passant entre le conducteur supérieur et la Terre ne diminuera la résistance que sur un espace égal à celui qu'il occupe. Le courant passe du conducteur atmosphérique vers les bords supérieurs du nuage, qui d'ordinaire s'illuminent, et ensuite par la masse du nuage, pour se diriger alors vers la terre, mais sans produire d'effets lumineux. Un brouillard entourant un pic de montagne manifeste un effet identique, et, comme nous l'avons fait remarquer précédemment, on observe souvent de faibles phénomènes lumineux autour des sommets des montagnes pendant les brouillards.

D'après la loi qui régit le développement de la chaleur dans un circuit électrique, il peut se produire des phénomènes lumineux dans l'air sous une pression suffisamment élevée, et même à la pression ordinaire, si la résistance de cet air se trouve diminuée par la présence de l'eau à l'état de vapeur ou de fines gouttelettes, ainsi qu'elle existe dans un brouillard.

Pendant son long trajet du conducteur atmosphérique à la terre, le courant rencontre des couches d'air à des pressions inégales et à des états hygrométriques différents; il en résulte qu'en certains points la résistance a une telle valeur, que le phénomène lumineux se manifeste, tandis qu'en d'autres points il ne peut pas apparaître (1).

C'est ainsi qu'on explique l'apparition, si fréquemment constatée dans les régions polaires, de plusieurs arcs lumineux situés les uns au-dessous des autres, donnant à l'aurore des formes aussi variables et aussi bizarres que celles représentées par nos planches et figures.

Il résulte de l'étude à laquelle nous venons de nous livrer que l'effet capital est l'existence d'un courant électrique, se dirigeant de haut en bas, tandis que le phénomène lumineux n'est qu'un effet secondaire. Mais est-il possible qu'un tel courant puisse exister sans produire de lumière? Nous répondrons affirmativement, surtout en nous rappelant l'expérience du tube de Geissler placé dans le voisinage d'une sphère électrisée et isolée. Le phénomène lumineux cesse toujours à une certaine distance de celle-ci; mais le courant n'en continue pas moins, bien qu'il soit entièrement affaibli. Il est permis d'en conclure qu'un courant peut en effet exister sans produire de phénomènes lumineux, et en effet les expériences avec des appareils d'écoulement dans la Laponie en affirment l'existence d'une manière évidente.

Causes qui exercent une influence sur la position mutuelle des conducteurs. — Dans cet immense laboratoire de la nature, il existe plusieurs causes qui font que ces phénomènes ne se passent point aussi régulièrement que nous venons de les décrire.

Nous avons vu que la température exerce une influence importante sur la position du conducteur atmosphérique, par rapport à la

(1) En mettant de l'eau dans un tube de Geissler, on obtiendra encore un phénomène lumineux sous une pression de 149^{mm}.

terre. Il est rare qu'elle offre la valeur moyenne que nous lui avons attribuée ; tantôt elle monte au-dessus, tantôt elle tombe au-dessous, et alors le conducteur s'élève ou s'abaisse proportionnellement.

Il est probable que ces changements n'ont lieu que dans les couches basses de l'atmosphère, mais c'est alors que leur effet présente le plus d'importance, parce que l'air y possède sa densité maximum. Si la température dans les contrées polaires s'abaisse jusqu'à — 40°, ce qui n'est point rare, le conducteur descendra vers la surface terrestre, la tension électrique s'augmentera et les conditions seront meilleures pour un courant de haut en bas.

Nous avons une preuve de ce fait dans des expériences faites avec les appareils d'écoulement en Laponie. Les rayons sur les sommets des montagnes n'apparaissaient qu'à la condition que la température fût basse. Si la température s'élève, le conducteur fera de même, et le résultat contraire se produira. Les variations de la température exercent donc une influence capitale sur l'apparition des aurores polaires, et cette influence deviendra encore plus frappante lorsqu'on se rappellera que l'état hygrométrique et le pouvoir conducteur de l'air qui en est la conséquence sont en liaison intime avec la température.

Il est une autre circonstance qui agit sur le conducteur atmosphérique en le forçant à s'abaisser autour des pôles. En effet, le pouvoir conducteur de l'air existe déjà d'une manière très significative avec les $0^m,040$ ou $0^m,050$ de pression. Cette qualité se fait également sentir aux environs de l'équateur; mais, comme la force attractive est au moins de 20 pour 100 plus grande aux environs des pôles, il est évident que dans ces conditions l'électricité doit pénétrer plus bas dans les dernières localités.

La théorie que nous venons d'exposer est, dans ses points essentiels, la même que celle de de la Rive, mais elle renferme des vues nouvelles très importantes. Par une expérience directe l'origine électrique de l'aurore boréale est prouvée. L'accumulation de l'électricité autour des pôles est envisagée comme due au système des deux conducteurs concentriques, la surface terrestre et le conducteur d'air, où intervient aussi la force tangentielle de l'induction unipolaire. L'appareil de l'aurore boréale démontre qu'un courant électrique peut traverser les couches atmosphériques à la pression ordinaire sans produire la lumière ; mais, après avoir atteint

les couches d'une faible pression, ce phénomène apparaît. Enfin le courant qui produit l'aurore, dans la nature, a été mesuré directement.

Concordance entre la théorie et les faits observés.

Causes des tempêtes magnétiques. — Dans plusieurs circonstances pendant le cours de notre étude, nous avons constaté la parfaite concordance qui existe entre la théorie et les faits observés. Revoyons encore quelques points.

Les *tempêtes magnétiques* doivent, sans la moindre hésitation, être attribuées aux effets de ces courants électriques qui donnent naissance aux aurores polaires. Les tempêtes se produisent de deux façons différentes. Le courant direct de haut en bas fait nécessairement dévier l'aiguille de la boussole de déclinaison à l'ouest, si celle-ci est située au sud de l'endroit où le courant s'est établi, et à l'est dans le cas contraire. Lorsque le courant atteindra la terre, il occasionnera des perturbations du courant tellurique et celles-ci dévieront l'aiguille à l'ouest si elles consistent en un renforcement de courant allant du nord au sud et à l'est dans le cas contraire. Ces conclusions découlent naturellement de la loi régissant l'action du courant électrique sur l'aiguille aimantée, et il en résulte que les mouvements de l'aiguille doivent être assez capricieux pendant une tempête magnétique, et que leur nombre ainsi que leur intensité doivent augmenter à mesure que nous nous rapprochons de la zone maximum, puisque c'est dans ces régions que le courant électrique, qui en est la cause, est le plus fréquent et le plus intense. L'existence probable d'une zone située au sud de la zone maximum des aurores boréales, où les courants telluriques présentent le plus de force et le plus de variations, nous fait voir la cause de l'intime liaison qui doit se trouver entre les deux phénomènes. On voit aisément qu'ils peuvent s'étendre sur toute la Terre ou se borner à des localités restreintes. Les courants électriques et les autres effets observés dans les fils télégraphiques s'expliquent aussi aisément.

Nature de la lumière de l'aurore boréale. — Quant aux qualités de la lumière de l'aurore boréale, sa vivacité, sa variabilité,

ses nuances, ses formes diverses, on s'en rend compte par l'action du courant et par les variations éprouvées par la couche d'air à travers laquelle il marche. Ainsi, par exemple, une bande ondoyante, comme celle de la *Pl. III*, est l'effet du courant traversant une couche d'air où l'humidité et la raréfaction produisent un pouvoir conducteur tel que la chaleur développée devient suffisante pour y faire rougir les particules d'air et d'eau. En haut et en bas, cet état spécial n'existe pas et la lumière s'évanouit.

La couronne boréale est le résultat de la vue en perspective et du *rapprochement* des rayons dans les régions supérieures.

La zone maximum; des isothermes et des isoclines. — Les particularités offertes par l'aurore boréale, au point de vue de son étendue géographique, dérivent aisément des rapports intimes entre le phénomène et les variations de température.

En jetant les yeux sur une Carte, on constate que la zone où le nombre annuel des aurores boréales est maximum comprend tous les points où les températures annuelles moyennes sont comprises entre 0° et — 10°.

La concordance est parfaite dans l'hémisphère occidental, mais dans l'hémisphère oriental les isothermes descendent au-dessous des limites de la zone. C'est ce qui arrive surtout en Sibérie, bien qu'on puisse l'attribuer à ce que, dans ces régions inhabitées, on connaît mal la température moyenne et la limite exacte des bords de la zone.

Nous avons fait voir qu'il résulte de l'induction unipolaire une force poussant l'électricité dans l'atmosphère, et dirigée rectangulairement à la force totale du magnétisme terrestre ou la direction de l'inclinaison. Il est évident que plus cette force devient petite, c'est-à-dire plus l'inclinaison tend vers 90°, plus sera faible la résistance offerte à l'électricité par le conducteur atmosphérique pour atteindre la surface terrestre dans la direction verticale. Aussi voit-on que les lignes d'inclinaison de 70° ou 80° à l'hémisphère nord sont près d'être parallèles aux bords de la zone maximum. La force magnétique totale intervenant aussi, il sera bien difficile de conclure quelle est, de ces deux causes, la température ou les forces magnétiques, celles qui exerceront la plus grande influence. Les oscillations que subissent aux limites les

variations de la zone maximum, si bien envisagées par M. S. Tromholt, nous amènent à croire à l'influence prépondérante de la température, c'est-à-dire à la hauteur plus ou moins grande du conducteur d'air. Puisque la résistance principale offerte au courant allant de ce conducteur à la Terre dépend des propriétés physiques de la couche atmosphérique et que la température exerce la plus grande influence sur ses propriétés, nous sommes à plus forte raison amenés à admettre, comme cause la plus efficace, la température variable sur la Terre.

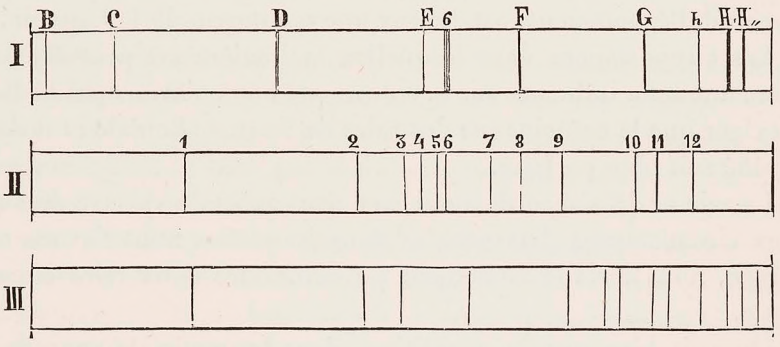
Autres particularités. — Quant aux autres particularités se rattachant à la distribution géographique des aurores, elles sont faciles à expliquer. Le courant produisant d'autant plus facilement la lumière que l'air est plus raréfié, il en résulte que l'aurore boréale s'observe le plus fréquemment à une hauteur s'approchant des limites extrêmes de l'atmosphère. On se rend ainsi compte de la hauteur assez grande fixée par les calculs, pour l'extrémité supérieure des rayons polaires. Remarquons cependant que les mesures prises ne sont qu'approximatives et peut-être même sont inexactes; mais si, contre notre opinion, une hauteur assez grande se confirme, on sera autorisé à en conclure que les limites de l'atmosphère sont à la même hauteur au-dessus de la surface terrestre.

On voit facilement que le bord inférieur de l'arc lumineux, étant ordinairement à une hauteur de 35^{km} à 75^{km}, peut ou surpasser la hauteur du conducteur atmosphérique ou tomber au-dessous, puisque ces effets dépendent du pouvoir conducteur de l'air et de l'intensité du courant. Nous savons déjà que le phénomène peut se manifester à la surface de la Terre.

Résultats de l'analyse spectrale. — Les résultats de l'analyse spectrale s'accordent parfaitement avec la théorie. L'aurore polaire, comme nous l'avons dit plus haut, a donné environ douze raies, qui presque toutes ont été retrouvées entre les raies produites par un courant passant dans un tube de Geissler contenant ces mêmes gaz dont le mélange constitue l'air atmosphérique. Si l'on se demande pourquoi on ne voit point dans l'aurore polaire toutes les raies existant dans ces gaz, l'expérience répondra que les raies des gaz changent selon la température et la pression de ces gaz. L'appa-

reil à aurore boréale nous convaincra aisément de ce fait. En dirigeant un spectroscope sur les tubes de Geissler en contact avec la sphère électrisée, on verra un grand nombre de bandes variant du rouge au violet extrême; dès que le contact cessera, une partie des bandes s'évanouira et d'autres apparaîtront, qui n'occuperont pas les mêmes places dans le spectre. La *fig.* 17, III représente les raies visibles dans ce dernier cas. En les comparant avec celles

Fig. 17.



de l'aurore boréale (*fig.* 17, II), on trouve un rapport qui est assez satisfaisant.

En examinant dans le Tableau (p. 92) les déterminations des raies du spectre de l'aurore boréale, on est porté à admettre qu'on a regardé comme identiques des raies placées différemment dans ce spectre. La grande discordance que l'on rencontre dans plusieurs cas ne peut guère s'expliquer autrement.

Les variations dans le nombre de raies que l'on trouve dans l'air raréfié en employant différentes méthodes pour produire la lumière affirment cette manière de voir.

M. Vogel a produit la lumière dans les tubes de Geissler avec une bobine de Ruhmkorff.

Nous l'avons obtenue avec le courant de la machine de Holtz, qui traversait une couche d'air à la pression ordinaire avant de passer dans les tubes.

M. Sundell produisait la lumière par un effet d'influence sur le tube en faisant jaillir les étincelles au dehors.

On voit que les trois méthodes donnent des résultats inégaux, mais on voit aussi qu'on trouve ordinairement dans le spectre de

l'air raréfié des bandes correspondant aux raies de l'aurore boréale.

On a prétendu que la raie caractéristique n° 2 n'a jamais été trouvée dans aucune source lumineuse terrestre. Nos déterminations ne nous ont pas non plus montré une coïncidence parfaite entre la raie $\lambda = 5570$ de l'aurore boréale, et celle $\lambda = 5580$, donnée par l'appareil de l'aurore boréale.

Quoi qu'il en soit, nous regardons la question comme tranchée, parce que nous avons vu cette raie dans la lumière produite par une machine de Holtz mise en activité dans le conducteur d'un appareil d'écoulement installé sur une montagne de la Laponie.

Les circonstances dans lesquelles la lumière est produite ont donc une telle influence sur sa nature que nous n'avons pas le droit d'exiger que la coïncidence des raies de l'aurore boréale et de l'air raréfié soit plus parfaite.

La raie n° 12 s'accorde aussi avec deux raies du spectre de l'air. Aux circonstances défavorables dans lesquelles nous l'avons observée, nous aurions facilement pu confondre deux raies en une seule.

On voit bien que les conditions dans lesquelles le courant se produit dans l'appareil de l'aurore boréale ressemblent à celles qui existent dans l'atmosphère pendant l'aurore polaire elle-même, mais elles ne sont point identiques. La différence de température surtout est immense, ainsi que l'espace lumineux occupé par le courant.

Les douze raies ne se montrent pas toujours toutes ensemble dans l'aurore boréale; toutefois la raie 2 est inséparable de ce spectre. Lorsqu'on peut observer la raie rouge 1, ce qui est rare, les raies comprises entre celle-ci et les raies 7 et 8 s'affaiblissent beaucoup et les autres disparaissent totalement. Nous sommes donc en présence de deux spectres différents; mais il est probable que l'accord sera d'autant plus grand que les circonstances extérieures se rapprocheront davantage.

Double périodicité. — On a voulu expliquer la double périodicité des taches solaires dont nous avons fait mention précédemment, en l'attribuant à l'influence directe du Soleil subissant l'action de Jupiter et de Saturne, les deux plus grandes planètes de notre système. En effet, la durée de la révolution de la première

planète (11^{ans}, 86) égale presque la période la plus courte des taches, tandis que la durée de la révolution de Saturne (29^{ans}, 46) doublée, c'est-à-dire 59 ans, est presque égale à la période la plus longue. Nous voyons en outre que les deux planètes reviennent occuper à peu près la même position l'une par rapport à l'autre, après que Jupiter a accompli cinq révolutions (59^{ans}, 3) et Saturne deux révolutions (58^{ans}, 92). Or, nous avons également constaté que les périodes des taches solaires s'accordent avec celles des aurores boréales et celles des variations magnétiques.

Influence indirecte du Soleil. — Sans vouloir nier la possibilité d'une influence directe, au point de vue électrique, du Soleil sur les planètes et des planètes les unes sur les autres, nous croyons qu'on se hâte peut-être un peu trop à vouloir y chercher la cause de la périodicité des aurores. Il ne serait pas impossible que cet effet fût produit indirectement de la manière suivante : les planètes et surtout les deux plus considérables d'entre elles exerceraient, en vertu de leur attraction, une influence sensible sur les faits qui se passent à la surface du Soleil, en produisant plus de taches solaires dans certaines positions mutuelles que dans d'autres ; il en résulterait une modification de la chaleur rayonnante du Soleil. Cette modification de la chaleur solaire serait la conséquence des taches. Un soleil couvert de taches envoie à la Terre une chaleur qui sera absorbée par l'atmosphère terrestre beaucoup plus que la chaleur émise par un soleil sans tache. L'atmosphère se comporte ici comme un écran plus ou moins absorbant, selon que la chaleur vient d'une source plus ou moins sombre. Il résulte de là que toute la quantité de chaleur émise par le Soleil sera inégalement partagée entre l'atmosphère et la surface terrestre. Un soleil sans tache donnera une plus grande quantité de chaleur à la surface terrestre qu'un soleil avec des taches, et la quantité absorbée par l'atmosphère sera plus grande dans ce dernier cas.

Ce partage inégal de chaleur entre l'atmosphère et la surface terrestre pourrait bien être la cause qui détermine les changements périodiques observés sur la Terre. Une telle périodicité dans l'émission de la chaleur créerait une périodicité égale dans la vaporisation et par conséquent dans la production de l'électricité à la surface de la Terre.

On expliquerait ainsi la périodicité spéciale d'une façon bien plus simple, puisqu'il nous sera inutile de supposer d'autres influences solaires que des influences calorifiques et lumineuses. Les observations météorologiques n'ont point été continuées assez longtemps pour qu'il soit possible d'en tirer une conclusion certaine. Cependant nous croyons qu'une telle périodicité résulte de l'ensemble des observations faites sur les vents irréguliers ou bourrasques de l'atmosphère. Si l'hypothèse se vérifiait pleinement, la science des aurores aurait accompli un bien réel progrès. Mais aussi d'autres phénomènes météorologiques donnent, comme il a été dit plus haut, lieu à la supposition d'une périodicité égale. En tous cas, cette opinion paraît s'accorder mieux avec les lois de la nature qu'avec une influence directe du Soleil; nous ne pouvons comprendre la possibilité d'une telle influence directe, surtout quand nous nous rappelons combien sont minimes les forces exercées par l'électricité et le magnétisme relativement aux espaces immenses qui séparent les corps célestes les uns des autres. Et de plus nous avons émis plus haut un principe qui nous semble être toujours vrai, c'est qu'il faut chercher les causes des phénomènes terrestres, d'abord dans les forces agissant sur la Terre, et n'invoquer que bien plus tard les actions s'exerçant dans les espaces cosmiques (Note XV).

Périodes annuelles et journalières. — A quoi attribuer les *périodes annuelles et journalières* des aurores, sinon aux variations éprouvées dans les phénomènes météorologiques et surtout dans la vaporisation ?

Celle-ci agit de deux façons différentes : d'abord comme intermédiaire de la production de l'électricité, puis en modifiant le pouvoir conducteur de l'air. Le nombre des aurores doit être plus grand pendant les saisons où la vaporisation offre son maximum d'intensité et nous avons vu que c'est en effet ce qui arrive. Lorsque la vapeur d'eau, absorbée par l'air pendant la journée, se condense le soir et pendant la nuit, le pouvoir conducteur de l'atmosphère augmente et les conditions deviennent d'autant plus favorables aux aurores boréales.

Apparition simultanée de l'aurore aux deux pôles. — Le

conducteur atmosphérique entourant toute la Terre, il arrivera nécessairement, si une perturbation de l'équilibre électrique s'y produit en un point quelconque, que cette perturbation exercera son influence sur l'espace tout entier. Si donc le conducteur reçoit une plus grande quantité d'électricité dans l'hémisphère nord, cette électricité s'amassera aussi dans l'hémisphère sud par suite de la conductibilité, et il en résulte qu'en général les aurores doivent être simultanées aux deux pôles de la Terre.

Bruit de l'aurore boréale. — Il paraît être vrai qu'on entend un bruit pendant l'aurore boréale. Quant à nous, nous n'avons jamais constaté ce bruit; mais nous reconnaissons que, dans les divers cas où nous avons assisté au phénomène, les circonstances accidentelles, telles que le grondement de la mer ou le murmure du vent, suffisaient amplement pour nous empêcher de percevoir un faible bruit.

La lumière étant produite par un courant électrique, nous pouvons la considérer comme une série d'étincelles électriques infiniment petites et jaillissant dans l'air de particule en particule. Si l'air contient de petites aiguilles de glace, il arrivera que ces étincelles seront plus grandes que si l'air contient des gouttelettes d'eau, sous forme de brouillard par exemple. Or, aussitôt que les étincelles atteindront une certaine dimension, il se produira nécessairement un bruit qui devra être entendu, surtout par une température extérieure peu élevée. Le bruit peut donc bien s'entendre.

L'accord entre la théorie et les faits observés est donc aussi parfait qu'il nous est permis de l'espérer dans l'état actuel de nos connaissances. Nous n'hésitons pas à penser que les recherches ultérieures confirmeront cette théorie. L'expérience avec les appareils d'écoulement doit lever tous les doutes, puisque le courant électrique producteur de l'aurore polaire a été constaté et mesuré.

Sur les recherches futures de l'aurore boréale.

En connaissant la nature de l'aurore boréale, les recherches qui la concernent prendront un autre caractère. En premier lieu, il faudra examiner de plus près la cause qui produit la lumière,

c'est-à-dire *la grandeur et la direction du courant électrique dans l'atmosphère.*

Il nous semble nécessaire d'appliquer une méthode qui donne directement la force électromotrice de ce courant, ou les variations du potentiel avec la hauteur.

Ce n'est qu'après avoir déterminé en plusieurs endroits de la Terre ce courant et ses variations qu'on pourra tirer des conclusions certaines sur les lois auxquelles il obéit. Il est clair qu'il faut continuer à observer les apparitions plus ou moins fréquentes de l'aurore boréale, sa position dans le ciel et déterminer par l'analyse spectrale la nature de la lumière, avec les formes sous lesquelles elle se montre.

La hauteur de l'aurore boréale au-dessus de la surface terrestre est d'un grand intérêt; mais, comme nous l'avons vu, les méthodes employées jusqu'à présent ne donnent pas des résultats exacts.

La deuxième méthode seulement, par laquelle on détermine en même temps la hauteur et l'azimut d'un point bien caractérisé du phénomène, peut, selon nous, conduire à des résultats certains.

L'application de la théorie de M. Edlund sur l'induction unipolaire demande à être bien interprétée.

Bien que nous regardions la question de l'origine de l'électricité atmosphérique comme théoriquement déterminée, nous sommes pourtant d'accord avec M. Tait, sur la nécessité d'entreprendre des expériences étendues et sur une grande échelle pour pouvoir agrandir et affermir nos connaissances dans cette étude.

Quant aux périodes de l'aurore boréale, en ce qui concerne les changements périodiques dans notre système planétaire, nous sommes obligés de nous contenter encore des hypothèses déjà faites, et pour la chaleur envoyée par le Soleil, aux époques où il est plus ou moins couvert de taches, il nous faudra attendre les renseignements que pourra fournir l'expérience.

Il semble bien démontré que le courant électrique qui produit l'aurore boréale est en rapport intime avec les courants électriques telluriques et les perturbations magnétiques. Les recherches futures devront donc envisager ces deux phénomènes. On voit facilement qu'il faudra étendre ces recherches jusqu'aux contrées polaires, surtout aux environs de la zone maximum de l'aurore boréale ou dans cette zone même. La Laponie finlandaise, le nord de la Nor-

wège, mais surtout l'Amérique du Nord, où la zone d'aurore boréale atteint une latitude plus basse que partout ailleurs, seraient à plusieurs points de vue les plus propres à ces nouvelles études. Déjà à une hauteur de 1000^{m} on peut faire des recherches satisfaisantes sur le courant électrique de l'atmosphère, et la loi des variations de la force électromotrice peut être déterminée avec des appareils d'écoulement à différentes hauteurs.

On ne saurait dire quels résultats on obtiendrait en installant de pareilles expériences sur les montagnes du milieu de l'Europe, mais il est certain que ces expériences seraient d'un très grand intérêt.

Il est hors de doute que des phénomènes de lumière se montreront ainsi que les courants électriques, mais on ne sait pas s'ils correspondraient avec de semblables phénomènes dans les contrées polaires.

NOTES.

NOTE I (p. 21).

Dans le travail *Das Polarlicht*, M. Fritz a traité les chiffres un peu autrement, mais le résultat reste le même.

Les deux périodes sont déterminées, par M. Fritz, à 11,1 et 56,6 années.

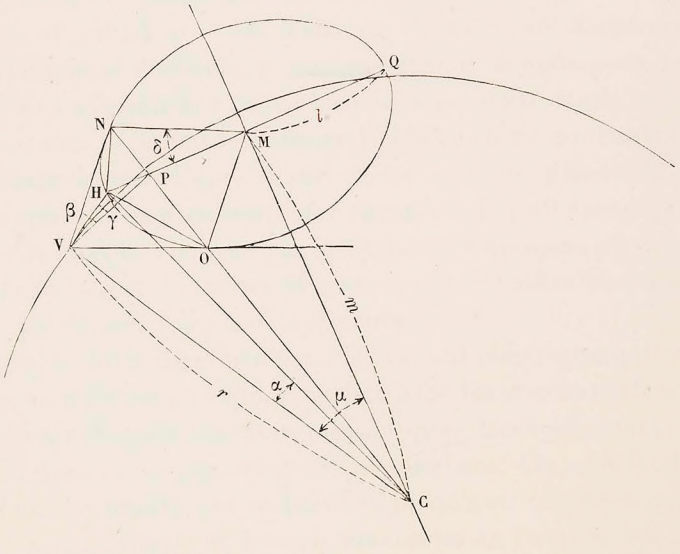
Les nouveaux Catalogues de M. Mobreg pour la Finlande, 1846-1845, et de Rubenson pour la Suède, 1700-1850, contribuent à affirmer les résultats.

NOTE II (p. 37).

Le calcul mathématique des dates observées ayant une grande importance, nous reproduirons ici la méthode employée par M. Nordenskiöld pour calculer ces dates :

Si, dans la *fig.* 18, V représente le lieu d'hivernage de la *Véga* à l'em-

Fig. 18.



bouchure du Koljuschkin bay (67°4′49″ lat. N. et 186°36′58″ long. E. de Greenwich), C le centre de la Terre, H le sommet du cercle lumineux,

N et O les points de rencontre de ce cercle avec l'horizon du point V, M le centre du cercle, et que l'on suppose

r rayon de la Terre,

l rayon du cercle lumineux,

m distance de son centre à celui de la Terre,

h hauteur véritable de H au-dessus de la surface de la Terre,

on aura donc :

HC $= r + h$; μ, l'angle entre l'horizon NVO du lieu d'observation et le plan du cercle lumineux, ou l'angle des normales respectives à ces plans : CV et CM, c'est-à-dire l'angle VCM $=$ VPH;

$\alpha =$ VCH, angle mesuré au centre de la Terre entre les rayons du point d'observation et la perpendiculaire menée de H sur la surface de la Terre;

$\gamma =$ HVP, hauteur apparente du cercle lumineux vu de V;

β, ou NVP, la moitié de l'étendue du cercle lumineux le long de l'horizon vu de V;

$\delta =$ NMH, moitié de la longueur angulaire de la partie du cercle lumineux qui est visible de V.

Les angles de γ et 2β ont été mesurés directement et μ résulte de l'hypothèse faite sur la position du cercle lumineux au-dessus de la surface de la Terre.

Les quantités qu'il est nécessaire de déterminer, c'est-à-dire H et l, exigent la connaissance de α et de δ.

On obtient δ, si NMQ $= \omega$:

$$\operatorname{tang}\frac{\omega}{2} = \operatorname{tang}\frac{180^\circ - \delta}{2} = \cot\frac{\delta}{2} = \operatorname{tang}\mathrm{NHM} = \frac{\mathrm{NP}}{\mathrm{HP}}$$

ou

$$\operatorname{tang}\frac{\delta}{2} = \frac{\mathrm{HP}}{\mathrm{NP}} = \frac{\mathrm{VP}\,\dfrac{\sin\gamma}{\sin(\gamma+\mu)}}{\mathrm{VP}\operatorname{tang}\beta} = \cot\beta\,\frac{\sin\gamma}{\sin(\gamma+\mu)},$$

$$\frac{\mathrm{NM}}{r+h} = \sin(\mu-\alpha).$$

Lorsque N, H et O sont sur le même cercle, on a

$$\overline{\mathrm{NP}^2} = \overline{\mathrm{HP}}\left(\overline{2\,\mathrm{NM}} - \mathrm{H}p\right),$$

$$\mathrm{NM} = \frac{\overline{\mathrm{NH}^2}}{2\,\mathrm{HP}} = \frac{2\,\overline{\mathrm{NM}^2}\sin^2\dfrac{\delta}{2}}{\mathrm{HP}},$$

$$1 = 2\,\frac{\mathrm{NM}\sin^2\dfrac{\delta}{2}}{\mathrm{HP}} = 2\,\frac{(r+h)\sin(\mu-\alpha)\sin^2\dfrac{\delta}{2}}{\mathrm{HP}},$$

$$\frac{\mathrm{HP}}{\mathrm{VH}} = \frac{\sin\gamma}{\sin\mu}, \qquad \frac{\mathrm{VH}}{r+h} = \frac{\sin\alpha}{\cos\gamma}.$$

Introduisons ces valeurs et développons, il vient

$$\cot\alpha = \cot\mu + \frac{\operatorname{tang}\gamma}{2\sin^2\frac{\delta}{2}\sin^2\mu}.$$

Les valeurs des quantités cherchées sont alors

$$r + h = r\frac{\cos\gamma}{\cos(\gamma+\alpha)},$$
$$l = (r+h)\sin(\mu-\alpha),$$
$$m = (r+h)\cos(\mu-\alpha);$$

ces formules ne sont pas applicables lorsque $\gamma = 90°$.

En effet, on a $\alpha = 0$ et

$$h = \mathrm{HP}\sin\mu = \frac{\overline{\mathrm{NP}^2}}{2\mathrm{NM} - \mathrm{HP}}\sin\mu = \frac{\overline{\mathrm{VP}^2}\operatorname{tang}^2\beta\sin\mu}{2(r+h)\sin\mu - \frac{\mathrm{VP}}{\cos\mu}},$$

$$\mathrm{HP} = \frac{\mathrm{VP}}{\cos\mu} = \frac{h\cot\mu}{\cos\mu}.$$

En employant les valeurs mentionnées, on trouve

$$h = \frac{2r\sin^2\mu}{1 + \cos^2\mu\operatorname{tang}^2\beta - 2\sin^2\mu}$$

et

$$r + h = r\frac{1 + \cos^2\mu\operatorname{tang}^2\beta}{1 + \cos^2\mu\operatorname{tang}^2\beta - 2\sin^2\mu},$$
$$l = (r+h)\sin\mu,$$
$$m = (r+h)\cos\mu.$$

Nous donnerons les formules qu'a employées le célèbre Norwégien Hansteen. Il suppose que les mesures se font en deux points situés à peu près sur le même méridien.

Soient

A, B ces points et c l'angle que forment les rayons terrestres passant par ces points;

x l'angle formé par le rayon de la Terre passant par B avec la droite qui joint le point dont on cherche la hauteur, au centre de la Terre;

α et β les angles formés avec le plan horizontal des lignes visuelles menées de A et B au point en question;

on peut écrire

$$\frac{r+h}{r} = \frac{\cos\beta}{\cos(\beta+x)}\quad\frac{r+h}{r} = \frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha+c+x)},$$

d'où l'on tire

$$\operatorname{tang} x = \frac{\cos\alpha - \cos(\alpha + c)}{\cos\alpha \operatorname{tang}\beta - \sin(\alpha + c)},$$

où r est le rayon de la Terre, et h la hauteur cherchée.

Les formules de M. H. A. Newton (*Silliman's Journ. of Science*, 2e série, vol. XXIX, p. 286), applicables aux observations semblables à celles de M. Nordenskiöld, sont à peu près les mêmes comme ci-dessus.

NOTE III (p. 54 et 59).

On doit attacher une signification importante aux déterminations de la hauteur de l'aurore boréale, parce que les hauteurs exagérées ont donné lieu à l'établissement des soi-disant théories cosmiques pour l'explication de ce phénomène.

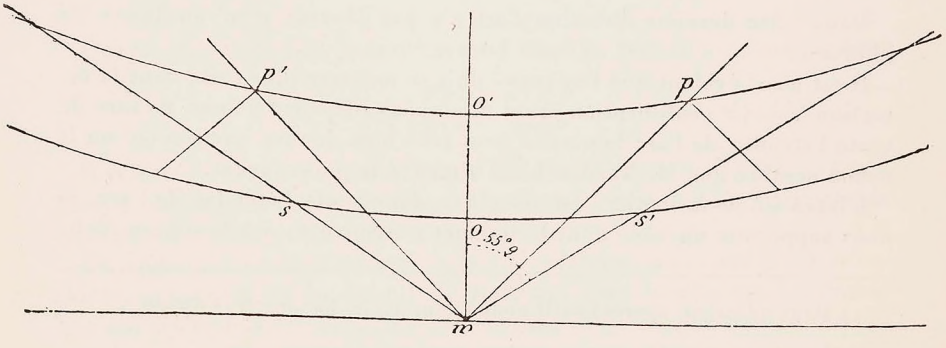
Nous avons examiné de plus près comment l'espace lumineux se présente au spectateur.

Dans la *fig.* 19, w signifie la position d'observation, ss' le bord le plus près de l'espace lumineux, pp' le bord le plus éloigné, oo' son étendue horizontale; nous supposons $wo = a = 120^{km}$, $oo' = 120^{km}$ et la hauteur h au-dessus de la Terre $= 22^{km}$. Nous supposerons ensuite le rayon de courbure r de la zone maximum

$$r = 15a = 1800^{km}.$$

L'espace lumineux se projette sur le ciel en forme d'arc dans la direc-

Fig. 19.



tion où se montre la plus grande intensité de lumière; ce qui arrive lorsque la ligne de visée traverse la plus grande largeur de la couche lumineuse. En supposant à celle-ci une profondeur (direction verticale) de 20^{km}, le

prolongement de la ligne visuelle devient à peu près diagonal dans la section verticale de l'espace lumineux. Le plan horizontal réduit la hauteur h à la quantité h_1 :

$$h_1 = R\left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right),$$

si R signifie le rayon de la Terre et α l'angle que forment les rayons terrestres par les points ω et O. Un degré d'arc sur la surface terrestre est en général égal à 111^{km}, et par conséquent $\alpha = 1°,1$, d'où résulte

$$h_1 = 1^{km},5\ (1)$$

et

$$\sin\gamma = \frac{22 - 1.5}{120} = 0,17 \qquad \text{et} \qquad \gamma = 10°.$$

L'arc a donc une hauteur angulaire de 10° et, à une distance x de 530^{km} environ, l'espace lumineux disparaît des deux côtés au-dessous de l'horizon.

De la formule

$$r^2 = (r + 2a)^2 + x^2 + 2(r + 2a)x\cos\varphi$$

nous pouvons calculer l'angle φ que forment alors les lignes ws et ws avec wo,

$$\varphi = 56°,2.$$

L'espace lumineux doit s'élever environ de 1° à 2° au-dessus de l'horizon pour pouvoir être mesuré, d'où il résulte que l'extrémité de l'arc sera située entre les lignes de visée, pour lesquelles

$$\varphi = 56°,2 \qquad \text{et} \qquad \varphi = 45°.$$

Dans cette dernière direction l'arc n'a pas dépassé 1°40′ au-dessus de l'horizon.

Il est aussi évident que l'intensité doit se montrer plus forte dans la direction V = 45° (l'absorption étant diminuée); de sorte qu'une mesure de toute l'étendue de l'arc lumineux peut très bien donner environ 90° ou le même nombre que M. Nordenskiöld a trouvé le plus souvent.

L'intensité de la lumière est assez fixe dans toute l'étendue de l'arc. Si nous supposons un cône dont le sommet se trouve en w à la station d'ob-

---

(1) Dans un calcul approximatif nous allons avoir, lorsque $R = 6367^{km},5$:

$\alpha = 1°.$	2°.	3°.	4°.	5°.	6°.
$h = 1^{km},3$	$3^{km},8$	$9^{km},0$	$15^{km},8$	$25^{km},0$	$35^{km},2.$

Pour des angles intermédiaires l'interpolation donne des valeurs assez sûres pour notre but.

servation et qu'à la distance égale à un la surface de sa base soit aussi égale à un, nous aurons, en désignant par δ le rayon de sa base,

$$\pi\delta^2 = 1 \qquad \text{et} \qquad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

et à la distance a

$$\delta = \frac{a}{\sqrt{\pi}}.$$

La section produite par l'espace lumineux donnera un tronc de cône lumineux, dont l'intensité de la lumière dans la direction $o\omega$ sera

$$i = k\int \frac{\pi\delta_a^2\, dx}{(a+x)^2}, \qquad \delta_a = \frac{a+x}{\sqrt{\pi}},$$

d'où

$$i = k\int_a^{a+b} \sqrt{\pi}\, dx = k'b,$$

où b représente la longueur oo' de l'axe du tronc de cône, x une partie quelconque de la même ligne et k et k' des constantes.

L'intensité de la lumière est donc proportionnelle à b dans la direction ωo; dans une autre direction, formant avec ωo l'angle φ, nous avons l'intensité i_φ

$$i_\varphi = k'\frac{b}{\cos\varphi}.$$

Ainsi, l'intensité de la lumière augmenterait s'il n'y avait pas d'absorption.

En appelant f la partie de chaque unité de i absorbée par une couche d'air, dont l'épaisseur est 1, la couche, dont l'épaisseur est a, absorbera une partie représentée par afi, et une couche de l'épaisseur $\frac{a}{\cos\varphi}$ une partie $\frac{afi}{\cos\varphi}$.

L'expression complète pour l'intensité dans la direction φ devient ainsi

$$i_\varphi = \frac{k'b}{\cos\varphi} - \frac{afk'b}{\cos^2\varphi}.$$

Il résulte de là que l'intensité totale de la lumière de l'arc devient à peu près la même si l'on admet que l'absorption compense l'augmentation dans une direction quelconque φ.

En appliquant ce qui précède aux observations faites par M. Nordenskiöld aux environs du détroit de Behring, nous trouverons facilement que son arc ordinaire, mesurant une étendue de 90° et une hauteur de 10°, peut bien provenir d'un espace lumineux ayant les dimensions et étant à la distance supposées plus haut.

Citons encore l'exemple suivant :

Supposons $\omega o = 600^{km}$ et $oo' = 120^{km}$; il résulte $h = 136^{km},7$, si la hau-

teur angulaire a été 10°, mais dans ce cas β aurait été 37° et l'étendue de l'arc 74°, ce qui démontre que l'espace lumineux a été plus rapproché et situé à une hauteur beaucoup plus petite.

En examinant la cause de cette singularité, nous trouvons qu'elle dépend principalement de la grandeur de β. Par la formule

$$\operatorname{tang}\frac{\delta}{2} = \cot\beta\,\frac{\sin\nu}{\sin(\mu+\gamma)} \text{ (Note II)},$$

δ est déterminé par β, car dans les observations de M. Nordenskiöld γ et μ sont presque toujours constants ($\gamma = 10°$, $\mu = 25°$).

Nous venons de voir que les observations d'un espace lumineux, à la distance et à la hauteur que nous l'avons supposé, donnent toujours β *trop petit*, parce que cet espace disparaît sous l'horizon; plus on trouve β petit, plus δ devient grand, et par δ on détermine a, ou la distance du point d'observation au pied de la perpendiculaire de l'arc, mesuré en degrés sur la surface de la Terre.

En écrivant ainsi la formule de a

$$\cot a = \cot\mu + \frac{1}{\sin^2\frac{\delta}{2}}\,\frac{\operatorname{tang}\gamma}{2\sin^2\mu},$$

on voit facilement que la grandeur de a est déterminée par $\sin\frac{\delta}{2}$, lorsque γ et μ sont constants. Par suite des mesures qui ont donné β, il résulte que δ et a sont trop grands.

En comparant *les suppositions*, on les trouvera à peu près les mêmes.

Suppositions de M. Nordenskiöld.

1° Couronne de lumière dans l'espace (au-dessus de la zone maximum).

2° δ variable, $\operatorname{tang}\frac{\delta}{2} = \cot\beta\,\frac{\sin\gamma}{\sin(\gamma+\mu)}$.

3° $\mu = 25°$.

4° $\cot a = \cot\mu + \dfrac{\operatorname{tang}\gamma}{2\sin^2\frac{\delta}{2}\sin^2\mu}$.

a peut varier de 25° jusqu'à un nombre plus petit. Pour $\beta = 45°$, $\gamma = 10°$, $\mu = 25°$, on obtient $\delta = 32°41',2$ et $a = 6°31'$.

Nos suppositions.

1° Espace lumineux parallèle à la zone maximum.

2° δ constant = 14° à peu près.

3° μ = environ 25°.

4° $\cot a = \cot\mu + 67,3.0,494$

$$\left(\frac{1}{\sin^2\delta} = 67,3\right)\ \frac{\operatorname{tang}\gamma}{2\sin^2\gamma} = 0,494,$$

$\gamma = 1°,0$, $\mu = 25°$,
a ne surpasse pas $1°36',5$.

La hauteur h de la Gloire est déterminée par a, selon la formule

$$h = r\left[\frac{\cos\gamma}{\cos(\gamma+a)} - 1\right],$$

dans laquelle r représente le rayon de la Terre. Il est évident qu'une faible augmentation de a accroît considérablement la valeur de h.

Pour $\gamma = 10°$, $\alpha = 2°$ et $\alpha = 3°$, on reçoit la valeur de $h = 43^{km}, 3$ et 68^{km}, ou une augmentation de 25^{km} pour chaque degré. Les résultats seraient à peu près semblables si l'espace lumineux ne se courbait pas le long de la zone maximum.

Les hypothèses que nous avons faites concernant la distance du point d'observation de l'espace lumineux et la hauteur de celui-ci au-dessus de la Terre peuvent être variées sans que γ et β changent de valeur.

Il en résulte que l'on ne peut guère prouver l'existence d'une Gloire, située à une hauteur de 190^{km} au-dessus de la Terre et ayant un diamètre de 0,32 rayons terrestres, bien que nous convenions que les circonstances dans lesquelles se montrait l'arc ordinaire étaient propres à fournir les données aux calculs que M. Nordenskiöld a faits avec beaucoup de talent.

1° Lorsque les phénomènes que M. Nordenskiöld a observés peuvent être causés par la présence d'un espace lumineux dans les circonstances citées, et 2° lorsque des mesures directes dans les contrées polaires et dans d'autres endroits de la Terre ne donnent jamais le droit de croire qu'un phénomène de l'aurore boréale peut apparaître à une telle hauteur, et enfin lorsque les qualités physiques de l'atmosphère sont telles que de semblables phénomènes apparaissent de préférence à une hauteur située entre 30^{km} et 70^{km}, nous n'hésitons pas à prétendre que les observations du port d'hiver de la *Véga* concernent un tel espace lumineux à distance variable et à une hauteur au-dessus de la Terre entre les limites citées ou encore plus bas.

La position de la Gloire, qui est un résultat des calculs de M. Nordenskiöld, provient en partie de ce que *l'espace lumineux* a été à peu près parallèle à cette zone et de ce que le port d'hiver de la *Véga* était situé près de lui. Ses limites ne sont pas si bien déterminées qu'on pourrait dire avec certitude à quelle distance était le bord sud de la zone du port de la *Véga*, mais, en supposant 200^{km} à 400^{km}, nous ne sommes pas trop loin de la vérité. Dans ces circonstances, l'arc aura ordinairement une étendue de 90° avec une hauteur de 10°.

Que l'arc ordinaire ait disparu au mois de mars, quand l'espace dans lequel les calculs de M. Nordenskiöld placent la Gloire fut frappé des rayons du soleil, c'est une circonstance à laquelle on ne peut pas donner trop d'importance. Une lumière, quoique faible, se répand déjà alors, à cause de la dispersion, dans toute l'atmosphère au-dessus de l'endroit éclairé, et cette lumière a bien pu être suffisante pour masquer le faible espace éclairé.

Ce qui a permis d'observer le phénomène avec une grande régularité, c'est justement la position occupée par la *Véga* aux environs de la zone maximum et aussi parce que ce port d'hivernage était entouré au nord et au nord-est d'une mer couverte de glace. En effet, la nature du sol a une réelle influence sur l'apparition des aurores et une surface unie contribue en grande partie à augmenter la régularité de ces apparitions.

NOTE IV (p. 59).

M. Edlund a remarqué que la hauteur des aurores boréales mesurant plusieurs centaines de kilomètres serait possible, parce que les étoiles filantes nous démontrent qu'il y a encore de l'air raréfié à une telle hauteur, et que cet air pourrait bien être lumineux par l'action d'un courant électrique. Des mesures exactes, faites dans l'avenir, résoudront cette question.

NOTE V (p. 64).

Selon les calculs de Gauss, le pôle Sud magnétique se trouvait à

$$72°35' \text{ lat. S.} \quad \text{et} \quad 152°30' \text{ long. E. de Greenwich.}$$

Toutes les dates représentent les temps pour lesquels elles sont calculées; actuellement, ces pôles occupent des positions différentes, mais, comme leur signification est assez petite, il n'est pas nécessaire de calculer des positions exactes

---

NOTE VI (p. 64).

La formule suivante envisage la liaison entre les trois quantités

$$I = \frac{H}{\cos i},$$

où I est l'intensité totale, H la composante horizontale, et i l'inclinaison.

NOTE VII (p. 68 et 85).

Cette théorie est si bien connue, que nous nous bornons à citer les auteurs suivants, qui en ont donné une exposition complète :

Gauss (*Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*), Erman und Peterson [*loc. cit.* (17)], Airy G.-B. (*On the magnetismus*), Verdet (*Œuvres*, IV, II[e] Partie, p. 378); Erman et Peterson ont repris le travail de Gauss avec des matériaux d'observations bien plus étendus, et à présent on peut dire qu'on est en état de déterminer le phénomène du magnétisme terrestre d'une manière aussi exacte que la plupart des phénomènes astronomiques.

NOTE VIII (p. 83).

Les autres travaux sur les courants telluriques, si intéressants qu'ils soient, par exemple les travaux de Becquerel, Baumgartner, Hamilton, Matteucci, Walker, etc., n'ont pas un intérêt spécial pour notre but.

NOTE IX (p. 89).

Gauss trouva pour le moment principal 853800 quadrillions d'unités. En comparant ce moment à celui d'une barre magnétique pesant environ un demi-kilogramme, on trouvera que huit de ces barres devraient être placées dans chaque mètre cube de la Terre pour que le moment résultant fût de la grandeur citée.

NOTE X (p. 91).

Le Travail de M. R. Capron, sur *Aurorœ and their spectra*, est un des plus étendus dans cette branche de la Science, et le lecteur y trouve beaucoup de renseignements sur l'aurore boréale.

M. R. Capron a aussi remarqué cette singularité de la raie caractéristique de l'aurore boréale.

NOTE XI (p. 93).

M. Sundell a d'abord construit une pompe à mercure et à acide sulfurique, avec laquelle il a pu pousser la raréfaction au plus haut degré. Avec des tubes ainsi préparés, il a étudié le spectre de l'air. M. Sundell a bien voulu me confier ses déterminations, bien qu'il les regarde comme préliminaires. La lumière était produite par l'influence d'une étincelle jaillissant en dehors.

NOTE XI *bis* (p. 121).

Les Mémoires de M. Edlund concernant cette question sont publiés dans les *Actes de l'Académie royale de Suède*, t. XVI, n° 1, et t. XX, n° 7; 1884.

Dans le premier Mémoire, il traite les phénomènes principaux de l'induction unipolaire et leur application à la Terre, en ayant égard à la distribution du magnétisme terrestre. Dans le dernier, il détermine la grandeur de la force.

Pour éclaircir les effets qui sont produits par l'induction unipolaire, nous allons exposer les forces qui y sont efficaces.

Si nous nous figurons une molécule électrique m à la latitude φ et à la distance a de la Terre, elle sera soumise aux forces suivantes :

1° Par suite de l'induction unipolaire la molécule m sera poussée dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'aiguille d'inclinaison. Si cette force est appelée ε et la résistance de l'air contre le mouvement de la molécule γ, nous aurons l'expression de cette force F

$$F = \frac{\varepsilon}{\gamma}.$$

2° L'électricité négative de la Terre exerce sur m une attraction dans le sens vertical, dont la grandeur soit représentée par ε' et la résistance de l'air dans la même direction par γ'; l'expression de cette force F′ devient ainsi

$$F' = \frac{\varepsilon'}{\gamma'}.$$

La force F a une composante dans la direction verticale $= F \cos i$, où i représente l'inclinaison. Cette composante diminue avec la latitude et est égale à zéro dans les pôles magnétiques.

L'expression totale pour la force dans la direction verticale devient ainsi

$$F \cos i - F'.$$

Dans le dernier Mémoire, M. Edlund détermine expérimentalement la force ε, et la trouve aux environs de l'équateur égale à $0{,}0231\ D = 0^{volt},0256$ pour chaque mètre de différence de hauteur.

Selon toute probabilité, la force ε' augmente avec la latitude. Une détermination approximative de sa grandeur a bien été faite par Sir W. Thomson, mais comme nous ne connaissons pas les variations de la force, une discussion ultérieure sera sans utilité. Nous pouvons cependant, *a priori*, comprendre que les deux forces sont du même ordre de grandeur.

La résultante y de ces forces sera

$$y = F^2 + F'^2 - 2FF' \cos i,$$

et l'angle A que la résultante forme avec la direction verticale

$$\sin A = \frac{F}{y} \sin i.$$

Si F était égal à F′, l'induction unipolaire serait compensée, et nulle ascendance de l'électricité n'arriverait; si $F_1 = 0,5\,F$, l'angle A deviendrait 90°, quand l'inclinaison serait 60°, ce qui arrive en Europe vers 45° de latitude et en Amérique vers 30°.

Dans les Mémoires que nous avons cités, M. Edlund ne prend en consi-

ération que l'induction unipolaire et trouve par suite de ses calculs, en considérant en même temps les variations du pouvoir conducteur de l'air, non seulement la source de l'électricité atmosphérique, mais encore la cause de sa distribution dans l'atmosphère.

L'induction unipolaire ne produit l'électricité dans l'atmosphère qu'aux environs de l'équateur. L'effet que nous lui attribuons est du reste exposé plus loin dans le Mémoire.

NOTE XII (p. 127).

Ce raisonnement s'applique seulement au cas où les deux fluides sont tout à fait libres et répandus sur des corps dont les dimensions sont petites comparativement aux distances.

Dans le cas présent, l'augmentation de la force entre les deux sphères est moindre, et nous en tiendrons compte dans l'application.

Nous avons donné un développement de cette application dans les *Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève,* 1876, janvier.

NOTE XIII (p. 147).

Dans son Mémoire déjà cité sur les aurores boréales, au détroit de Behring, M. Nordenskiöld dit qu'il n'a jamais vu la raie caractéristique de l'aurore dans les basses couches de l'atmosphère, ni autour des montagnes, ni sur la neige ou ailleurs autour de la station d'observation. Il remarque, de plus, qu'on observe pendant le jour une raie bien limitée, dont le milieu correspond à $\lambda = 585$. Comme on pourrait penser que cette raie, qui est formée de deux fortes bandes d'absorption, a été confondue avec la raie caractéristique de l'aurore boréale, il est nécessaire de rappeler que nous avons déjà signalé, dans un Mémoire de 1873, cette raie et même déterminé sa longueur d'onde; mais comme elle est si bien marquée, dans « le spectre normal » de Ångström ($\lambda = 5785 + 5880$), une telle détermination perd tout intérêt.

Cette raie n'est visible qu'à la lumière du jour et elle se montre bien nettement et fixe; la raie caractéristique, au contraire, s'est toujours vue dans une lumière changeante et est située plus au vert du spectre ($\lambda = 5570$), à une assez grande distance de la première. Il est ainsi tout à fait impossible de confondre ces deux raies.

NOTE XIV (p. 149).

Dans un Mémoire, inséré dans *the Nature* (Vol. XXX, p. 80) : *Auroral researches in Iceland*, M. S. Tromholt rend compte des expériences faites par lui-même en Islande au mois de mars 1884. M. Tromholt avait installé un appareil d'écoulement sur la montagne Mount Esja, 812^{m} de hauteur, située à 14^{km} de Reykiavik.

Il n'a rien pu voir à l'œil nu, car il semble que M. Tromholt ne possédait pas de spectroscope.

Ces expériences ont été faites dans des circonstances tellement défavorables que, d'après ce que je connais moi-même sur ce sujet, il lui eût été impossible de voir quelque phénomène lumineux.

En voici les raisons :

1° L'année ou plutôt l'hiver 1884 était très défavorable pour ce genre d'expériences, chose bien démontrée par les observations simultanées de Sodankylâ et de Kultala. C'est du reste la remarque que l'auteur fait dans son Mémoire;

2° Dans la saison avancée où ces expériences ont été exécutées, la lumière du soleil aux régions arctiques est déjà si intense le soir et le matin qu'elle masque facilement de faibles phénomènes lumineux;

3° La distance de Reykiavik à Esja est trop grande pour qu'il soit possible d'observer la lumière faible produite par l'appareil d'écoulement.

Je n'ai jamais vu cette lumière en forme de rayon à une distance plus grande que 4^{km} et M. Tromholt se trouvait à une distance de 14^{km} où l'intensité de la lumière s'est affaiblie jusqu'à plus de $\frac{1}{12}$.

De nos expériences il résulte qu'une différence de $1^{km},11$ est assez grande pour masquer un rayon visible à $1^{km},54$. (Voir le Rapport de M. Roos, p. 148.)

4° Comme la lumière en question en forme de lueur diffuse est plus faible qu'en forme de rayon, il était, à plus forte raison, impossible de voir celui-ci, surtout si l'observateur n'avait pas de spectroscope à sa disposition.

M. Tromholt cite aussi (*Nature*, vol. XXIX, p. 537) des expériences faites avec un appareil d'écoulement situé à 13^{m} environ au-dessus de la mer; mais, comme il ne donne pas les moyens de juger de son installation, il est tout à fait impossible de pouvoir tirer quelques conclusions de ses expériences. Je veux seulement faire remarquer qu'il ne nous a pas été possible d'obtenir des déviations du galvanomètre avec un petit appareil placé environ à 33^{m} au-dessus du sol. Si l'on veut bien tenir compte que la station de Sodankylâ est à $181^{m},1$ au-dessus de la mer, on comprendra la raison pour laquelle M. Tromholt n'a pu voir d'effet quelconque.

Après cette expérience, M. Tromholt a publié un Ouvrage populaire dont le titre est en anglais *Under the rays of the aurora* et une édition norwégienne, *Under nordlysets Straaler*. Dans cet Ouvrage, p. 458 et

suivantes, il s'est empressé de juger les expériences de l'expédition finlandaise, pendant l'année 1884 à Sodankylâ et à Kultala, comme donnant des résultats vagues et incertains quant à la lumière produite par l'appareil d'écoulement. A la même page il s'est aussi permis de dire que les observations spectroscopiques ont été incertaines, parce qu'on voit quelquefois la raie caractéristique dans toutes les directions possibles sans que l'aurore boréale soit visible.

Je me vois obligé de protester ouvertement contre cette manière de traiter des *faits* observés et rassemblés avec beaucoup de peine et de travail; car d'abord M. Tromholt n'a pas voulu, avant d'en juger, attendre la publication des observations complètes; il a encore, par des raisons que je ne comprends pas, traité d'une manière tout à fait fourvoyante ce qui est déjà publié, car les observateurs de Sodankylâ et de Kultala n'ont jamais commis la faute de prétendre que la raie caractéristique de l'aurore boréale ait apparu de l'appareil d'écoulement quand on l'a trouvée tout autour de l'observateur; d'autres erreurs pourraient être citées.

Heureusement je serai bientôt en état de publier *in extenso* toutes les observations de l'expédition polaire finlandaise et j'espère qu'alors le monde savant me fera l'honneur d'un jugement juste.

NOTE XV (p. 162).

Dans une série de Mémoires insérés dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* (des mois d'août 1883; avril 1884), M. Quet a voulu démontrer la possibilité d'un effet direct du Soleil au point de vue électrique. La discussion de ses hypothèses nous conduirait trop loin.

ERRATA.

Page.	Ligne.	*Au lieu de :*	*Lisez :*
14	2	jaunâtre	jaunâtre la
14	11	de les	de ne pas les
17	14 et 16	Rolin	Roller
46	14 en remontant	F. Bergenau	T. Bergman (11)
46	1	82^{m}	82^{km}
47	2	(4 et 11)	(12)
47	4 en remontant	Loomis (1)	Loomis (7)
49	19	34°	— 34°
62	9	l'est	l'ouest
85	5	récentes	récentes (25)
91	10	5579	5570
92	4	Zönner	Zöllner
112	7	*effacez* (101_b)	
113	14	28	(31 et 32)
118	13	Blake	Blake (34)
122	à la fin de la ligne 4	*ajoutez* (Note XI^{bis})	

PLANCHES

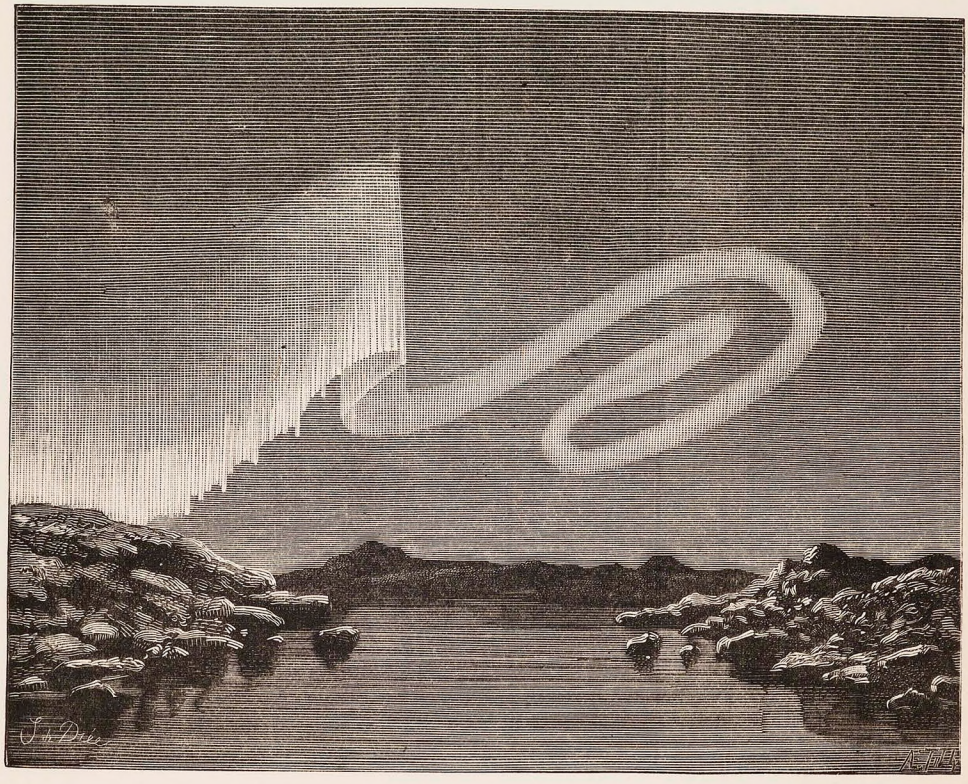
VI A XIV.

PLANCHE VI.

AURORE BORÉALE EN FORME DE DRAPERIE.

[Bossekop, le 21 janvier 1839, à 6 h. du soir, dans le Nord-Est. (Cette forme a été observée souvent en Laponie, 1882-83).]

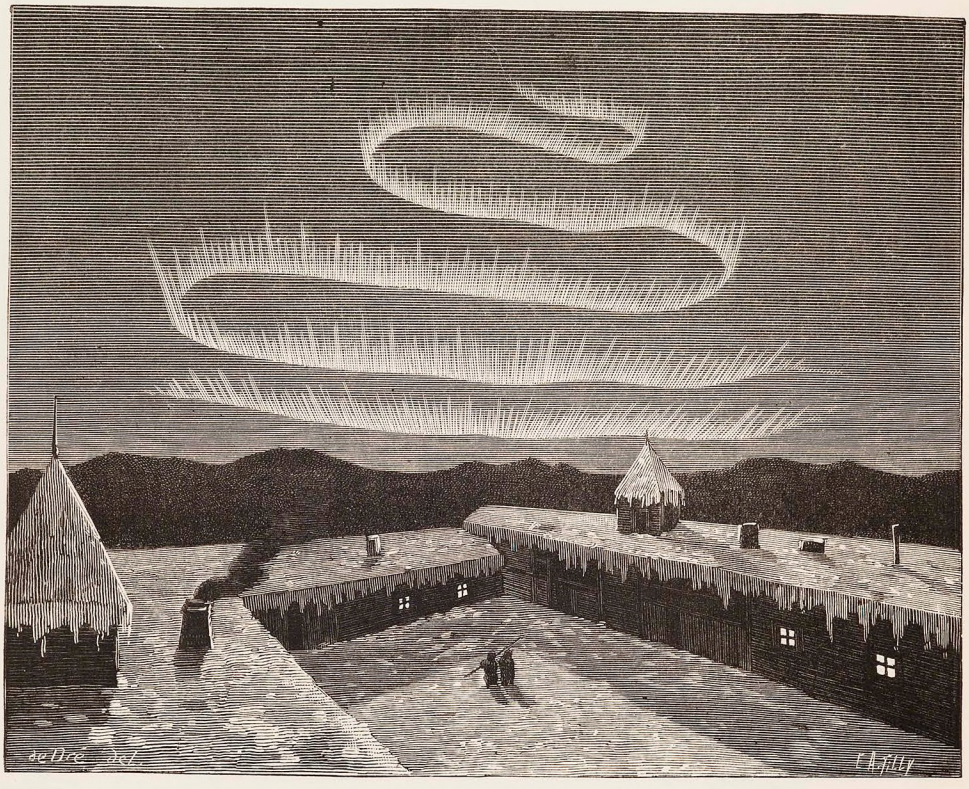
Planche VII.



AURORE BORÉALE, EN FORME DE DRAPERIE, AVEC UNE BANDE ONDULANTE.

(Bossekop, le 30 décembre 1838, à 8 h. 32 m. du soir, dans le Nord-Ouest.)

Planche VIII.



AURORE BORÉALE AVEC BANDE ONDULANTE ET RAYONS.

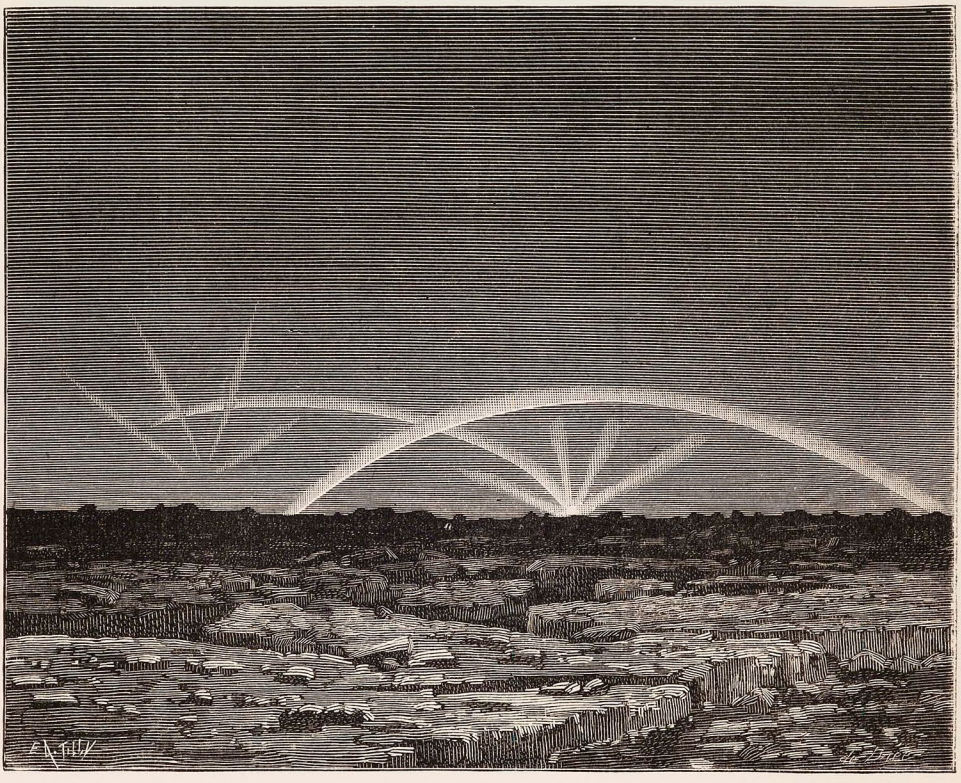
[Alaska, le 27 décembre 1868, M. Whymner).]

Planche IX.

AURORE BORÉALE AVEC ARC INCOMPLET ET LUEURS BIZARRES.

[Le 3 mars 1879, à 9 h. 50 m. du soir. (Voyage de la *Véga*.)]

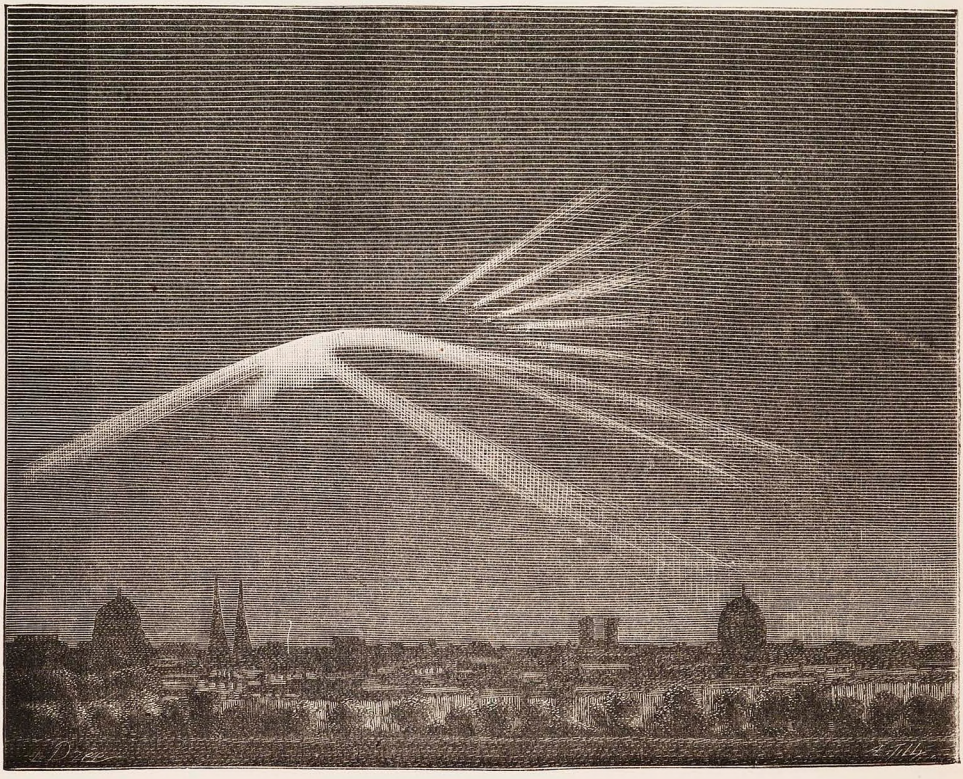
Planche X.



AURORE BORÉALE AVEC DEUX ARCS SE CROISANT.

[Le 5 mars 1879, à 1 h. 25 m. du matin. (Voyage de la *Véga*.)]

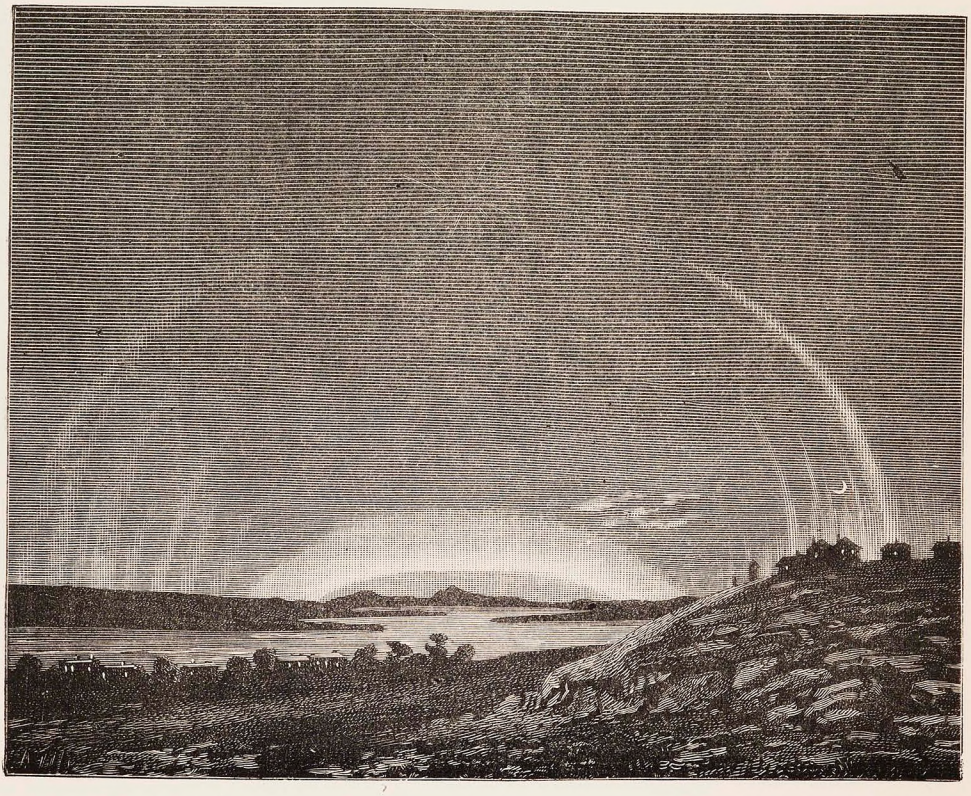
Planche XI.



AURORE POLAIRE AVEC NŒUDS DE LUMIÈRE, ARC INCOMPLET ET RAYONS.

(Paris, le 4 février 1872.)

Planche XII.



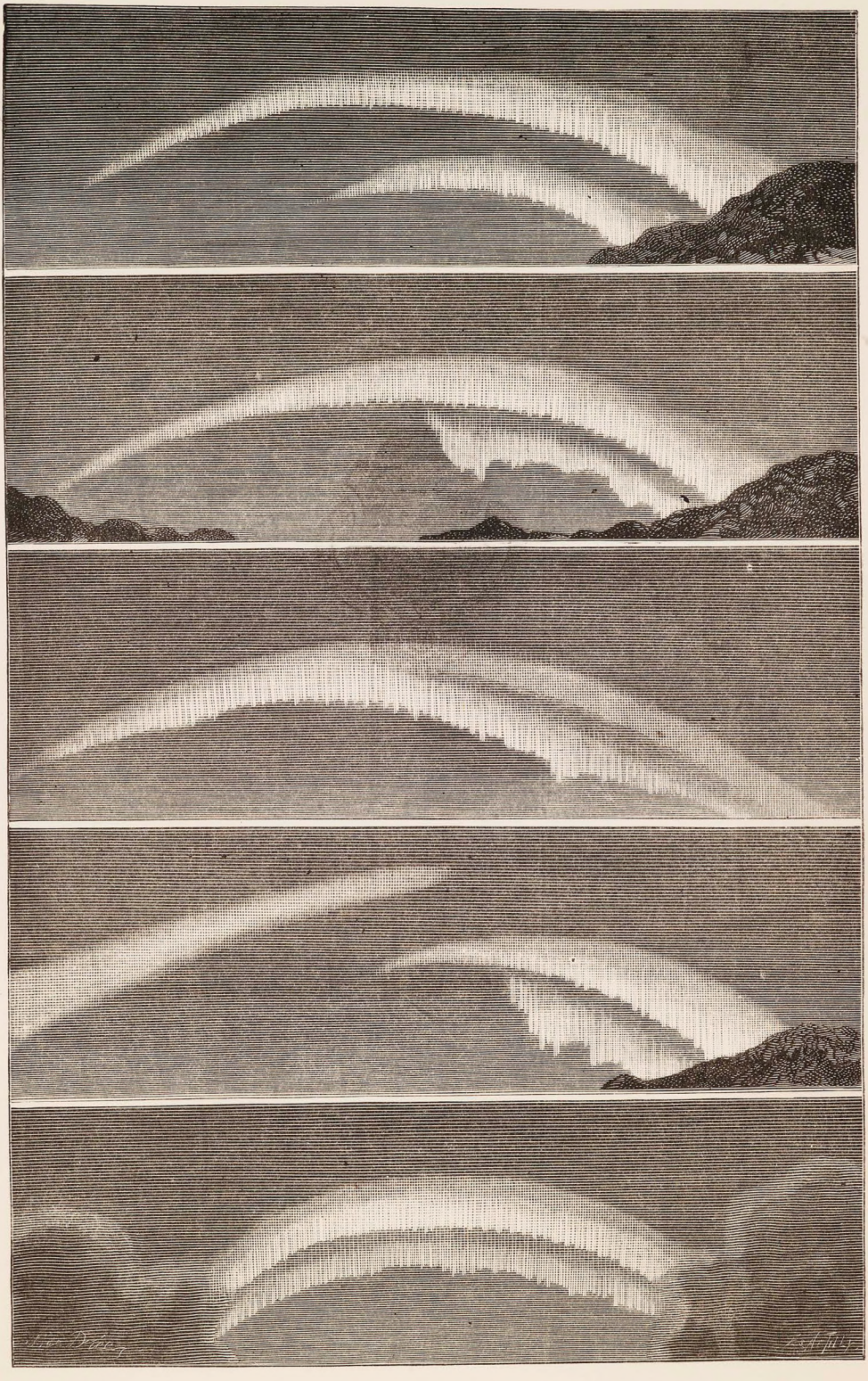
AURORE AUSTRALE AVEC ARC LARGE ET TRACES D'ARC MULTIPLES,

[Melbourne (Australie), le 2 septembre 1850, à 10 h. 26 m. du soir.]

Planche XIII.

AURORE BORÉALE AVEC LUEURS BIZARRES.

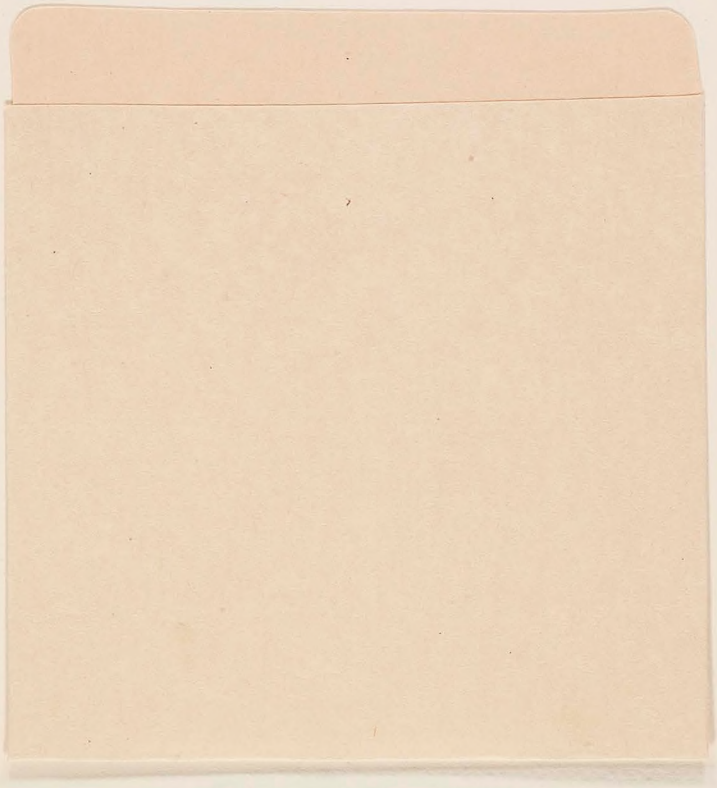
[En février 1874, expédition du *Tegethof* (Weyprecht et Payer).]



APPARENCES SUCCESSIVES DE L'AURORE BORÉALE.

(Bossekop, le 12 janvier 1839. — De 1 h. à 5 h. 30 du soir, et à 6 h. 15 m., 6 h. 30 m., 7 h., 7 h. 20 m.)

ECCE · LABORA
CONTRISTARI
ET · NOLI ·



omstrom
l'Aurore
Boréale
551.594
Lem