



HAL
open science

La constitution de l'ionosphère

R. Jouaust

► **To cite this version:**

R. Jouaust. La constitution de l'ionosphère. Journal de Physique et le Radium, 1936, 7 (7), pp.289-296. 10.1051/jphysrad:0193600707028900 . jpa-00233426

HAL Id: jpa-00233426

<https://hal.science/jpa-00233426>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA CONSTITUTION DE L'IONOSPHERE

PAR R. JOUAUST.

Sommaire. — L'emploi des ondes radioélectriques a permis l'étude de l'ionisation de la haute atmosphère aux altitudes comprises entre 100 et 500 km. région qu'on dénomme l'ionosphère. Il a été constaté que l'ionosphère comportant essentiellement trois régions de variation rapide de la densité électronique.

On a pu évaluer pour chacune de ces régions la valeur de cette densité qui présente des variations diurnes et saisonnières. L'étude de ces variations conduit à la conclusion que l'ionisation de la haute atmosphère est due en grande partie à l'action des rayons ultra-violet et que la disparition des électrons est due à la recombinaison des ions positifs.

Par ionosphère, on entend la partie de la haute atmosphère entre 100 et 400 km d'altitude qui intervient dans la propagation des ondes radioélectriques. Ce nom d'ionosphère lui vient du fait que pour expliquer les phénomènes observés, on admet, que dans cette région se trouvent un grand nombre de particules électrisées. Jadis, les propriétés de l'ionosphère étaient déduites des lois qu'on observait en cours d'exploitation relatives à la propagation des ondes radioélectriques. Depuis quelques années des expériences directes ont été réalisées pour étudier cette région de l'atmosphère dont la constitution semble reliée à un certain nombre de manifestations géophysiques ou astrophysiques (perturbations magnétiques, activité solaire). La connaissance de cette constitution peut donc être utile pour aider à élucider le mécanisme qui régit l'existence de ces diverses manifestations.

C'est le physicien anglais Appleton qui institua les premières expériences pour l'étude systématique de l'ionosphère. Mais la méthode la plus employée aujourd'hui est celle du sondage vertical ou des pulsations rapides dues aux physiciens américains Breit et Tuve.

Nous allons décrire sommairement cette méthode : un poste radiotélégraphique travaillant sur faible longueur d'onde (inférieure à 2 mégacycles par seconde ou 150 m de longueur d'onde) émet des signaux très brefs, de l'ordre de quelques dix millièmes de seconde. Ces signaux sont reçus à une faible distance et après amplification convenable enregistrés sur un oscillographe. L'enregistrement au lieu d'être unique est double. Il présente l'allure de la figure 1.

On admet que le signal 1 correspond à l'onde de sol et le signal 2 à une réflexion des ondes sur les couches ionisées de la haute atmosphère (1).

Il est facile de se rendre compte que le produit du temps qui s'est écoulé entre l'enregistrement des deux signaux par la vitesse de la lumière donne le

(1) Cette méthode a été appliquée en particulier par Appleton et ses collaborateurs en Angleterre ; Kirby, Berkner et Stuart, Gilliland aux Etats-Un's. C'est aux travaux de ces expérimentateurs que nous empruntons la majorité des renseignements contenus dans cette étude.

double de la distance entre le sol et la couche réfléchissante de la haute atmosphère.

Que se passe-t-il lorsqu'on fait varier la fréquence de l'émission. Les résultats sont traduits par la figure 2 où on a porté en abscisse les fréquences et en ordonnée les hauteurs qui sont mentionnées plus haut. Ces résultats sont du reste variables d'un jour à l'autre, d'une région à une autre. La courbe que nous reproduisons pour indiquer la marche générale des phénomènes se rapporte à des observations faites à midi au voisinage de l'équinoxe de printemps dans le sud de l'Angleterre.



Fig. 1.

Les réflexions ou échos commencent de jour à se produire à partir de 2 mégacycles. De 2 mégacycles à 3 mégacycles la réflexion paraît se produire sur une couche située à environ 100 km de hauteur. Vers 3 mégacycles une discontinuité se produit et jusqu'à 4 mégacycles la réflexion a lieu entre 200 et 300 km de hauteur. Puis vers 4 mégacycles nouvelle discontinuité et la réflexion semble se produire dans une nouvelle région moins bien définie et comprise entre 400 et 500 km. A 7 mégacycles les échos disparaissent.

Nous insistons bien sur ce point. Les résultats sont variables avec le lieu des expériences et l'heure de la journée. La courbe que nous avons donnée représente pourtant en gros ce qui se passe dans le milieu de la journée et sous nos latitudes.

Les trois régions de l'ionosphère mise en évidence sur cette courbe ont été désignées par Appleton, sous les noms de couche E, couche F₁, couche F₂.

Par couche, il conviendrait de désigner, comme nous le verrons dans la suite, une région de l'atmosphère où la densité d'ionisation varie brusquement.

La couche E semble bien correspondre à cette conception. Sa hauteur est à peu près indépendante de la

fréquence avec laquelle on la détermine. La hauteur trouvée est la même lorsqu'elle est déduite de mesures faites à grande distance ou à faible distance. Tout ceci correspond bien à ce qui se passerait pour la réflexion sur la zone de séparation de deux milieux d'indice différent. Les autres couches semblent moins bien délimitées. Parfois dans la matinée, on observe des réflexions sur une couche intermédiaire entre E et F₁. On dénomme E₂ cette couche intermédiaire.

Comme nous l'avons dit, le phénomène présente des variations journalières. Au fur et à mesure qu'on approche du coucher du soleil, on constate que la fréquence limite de la couche E diminue, et après le coucher du soleil, on observe sur cette couche des réflexions pour des longueurs d'onde qui n'étaient pas réfléchies de jour. On pourrait dire que la couche E éprouve une sorte de glissement vers les grandes longueurs d'onde. La hauteur de la couche F₁ s'élève au fur et à mesure que le jour s'avance et au coucher du soleil elle vient se confondre avec la couche F₂ qui, elle s'abaisse. Mais, aujourd'hui, c'est un autre facteur que la hauteur apparente des couches qui sert à caractériser l'état de l'ionosphère.

Ceci nous amène à exposer la théorie par laquelle les physiciens anglo-saxons à la suite d'Eccles et de Larmor ont expliqué les phénomènes observés. D'autres théories ont été mises avant. Sans prendre partie dans la discussion, nous croyons nécessaire d'exposer les idées théoriques des principaux expérimentateurs. Les expériences ayant été guidées et leurs résultats traduits conformément à cette théorie, il est absolument nécessaire d'y avoir recours pour exposer leurs travaux. La théorie imaginée par Eccles est la suivante :

Dans un milieu ionisé contenant *N* porteurs électrisés par centimètre cube à une altitude suffisante pour que la pression soit assez faible pour que le nombre des chocs entre porteurs et molécules soit négligeable devant la fréquence des oscillations, l'indice de réfraction pour des ondes de fréquence *f* est (*e* charge du porteur dans le système électrostatique, *m* sa masse) (1).

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\pi m f^2}.$$

Pour une certaine valeur de la fréquence *f*, l'indice devient imaginaire, ce qui n'a plus aucune signification physique. On admet que la réflexion a lieu pour toutes les fréquences pour lesquelles cette condition d'imaginariété est remplie. D'autre part la netteté de ces réflexions oblige à admettre qu'il y a dans la haute atmosphère des régions pour lesquelles on passe brusquement d'une valeur réelle à une valeur imaginaire, c'est-à-dire des régions dans lesquelles le gradient de la densité électronique est élevé. C'est à ces régions qu'on a donné le nom de couches.

Nous disons que les porteurs électrisés sont des

électrons. *A priori*, rien ne permet d'affirmer qu'il en est ainsi. C'est l'influence du champ magnétique terrestre sur la propagation des ondes qui permet cette affirmation. En effet, Larmor, puis Appleton ont complété la théorie d'Eccles en tenant compte de l'action du champ magnétique terrestre sur les porteurs électriques en mouvement. Nous résumerons sommairement les résultats de cette étude (1).

L'indice de réfraction devient :

$$n^2 = 1 + \frac{2}{2x - \frac{y_T^2}{1+x} \pm \sqrt{\frac{y_T^4}{1-x} + 4y_L^2}} \quad \text{U.E.S.}$$

avec

$$\alpha = -\frac{m\omega^2}{4\pi Ne^2} \quad y_L = \frac{m\omega}{4\pi Ne^2} \left(\frac{H_L}{mc}\right)$$

$$y_T = \frac{m\omega}{4\pi Ne^2} \left(\frac{H_T}{mc}\right)$$

$$\omega = 2\pi f \text{ pulsation de l'onde,}$$

H_L et *H_T* les composantes du champ magnétique terrestre parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde exprimées dans le système électromagnétique.

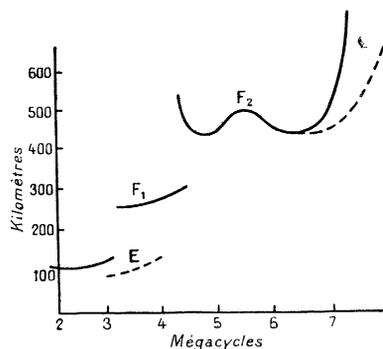


Fig. 2.

On voit qu'il existe deux valeurs de la fréquence rendant nulle la valeur de l'indice, l'une : $1 + \alpha = 0$ ou

$$1 = \frac{4\pi Ne^2}{m\omega^2}$$

qui conduit à la même valeur de la fréquence critique que la théorie d'Eccles dans laquelle on ne tient pas compte du champ terrestre; l'autre :

$$1 + \alpha = -\sqrt{y_T^2 + y_L^2}.$$

La théorie montre également que dans ces conditions une onde plane se transforme en deux ondes polarisées circulairement en sens inverse; chacune de ces ondes

(1) L'absorption se calcule en faisant intervenir les chocs négligés ci-dessus. Pour la démonstration, voir Mesny: « Les Ondes électriques courtes. »

(1) Pour le détail des calculs, voir : C. V. APPLETON. *Proceedings of Wireless Section of the Institution of Electrical Engineers*, septembre 1932.

correspond à l'une des valeurs d'indice critique calculée ci-dessus.

Celle pour laquelle la valeur de l'indice critique est la même que celle déduite de la formule d'Eccles est appelée le rayon ordinaire, l'autre le rayon extraordinaire. Par suite de l'absorption, on n'observe pas toujours le rayon extraordinaire. Cependant dans l'expérience d'après laquelle nous avons tracé la figure 2, on avait pu le mettre en évidence et les couches correspondant à sa réflexion figurent en pointillé.

Il est facile de prédéterminer le sens de la polarisation du rayon ordinaire suivant que les porteurs électrisés sont des ions ou des électrons, sens de rotation qui doit être inverse dans l'hémisphère nord et l'hémisphère austral. Appleton en Angleterre et Green en Australie ont bien vérifié que le sens de polarisation du rayon ordinaire correspondait au cas d'électrons.

Néanmoins tout récemment Kirby et Judson (1) ont émis l'hypothèse que pour la couche E les porteurs électriques agissant sur la propagation des ondes étaient des ions lourds et non des masses électroniques. Ils basent cette hypothèse sur ce fait qu'ils n'auraient jamais observé de doublement de la couche E et aussi sur des considérations sur la recombinaison des porteurs électrisés qui auraient besoin d'être discutées.

Dans tout ce qui suivra, nous admettrons l'existence unique d'électrons.

Pendant quelque temps les physiciens anglais avaient substitué à la formule d'Eccles donnée plus haut la formule suivante due à Hartres :

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{4\pi^2 mf^2 + \frac{1}{3} 4\pi Ne^2}$$

obtenue en introduisant une polarisation comme le fait Lorenz dans la théorie des diélectriques. Devant les critiques de Darwin, ils sont revenus à la formule originelle d'Eccles. D'après cette formule, on voit que lorsque le nombre d'électrons par centimètre cube est tel que :

$$N = \frac{\pi mf^2}{e^2} \tag{2}$$

l'indice de réfraction devient nul.

La valeur f^2 déduite de cette relation est la plus grande des fréquences pour laquelle il peut y avoir réflexion sur une couche de densité N . C'est ce qu'on appelle la fréquence critique. Les expériences actuelles sur l'ionosphère sont conduites de façon à déterminer la fréquence limite de chaque couche et à en déduire par la formule 2 ce qu'on est convenu d'appeler la densité électronique de la couche.

Il est certainement plus sage, pour étudier les propriétés de l'ionosphère, de raisonner sur cette densité électronique que sur les hauteurs apparentes des couches, dont la mesure est assez aléatoire. En effet, lorsque

des ondes traversent des milieux ionisés, leur vitesse est différente de la vitesse de la lumière. C'est ce qu'on appelle la vitesse de groupe reliée à l'indice par la relation

$$u = cn.$$

On voit que lorsque l'indice approche de zéro, la vitesse de groupe devient très faible. Une onde qui traverse la couche E voit sa vitesse retardée par cette couche, cette vitesse variant d'ailleurs avec la fréquence de l'onde. Les valeurs que l'on déduit pour la hauteur des couches F en admettant qu'elles cheminent avec la vitesse de la lumière sont donc erronées et les variations de la vitesse de groupe avec la fréquence peuvent expliquer l'allure irrégulière de la hauteur apparente de F. C'est donc la densité électronique ou du moins ce qu'en vertu des théories exposées ci-dessus, on appelle la densité ionique, qui caractérise l'état de l'ionosphère.

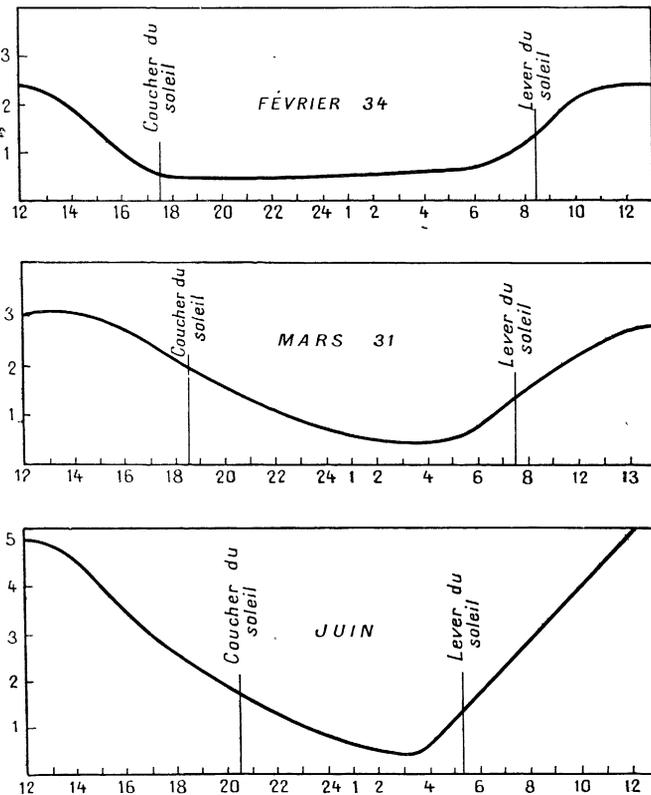


Fig. 3.

Cette densité ionique présente des variations diurnes. Il est bien entendu que, pour déterminer ces variations diurnes, il est nécessaire de prendre des moyennes pour éliminer des variations accidentelles sur lesquelles nous reviendrons.

Examinons d'abord le cas de la couche E. La densité électronique augmente après le lever du soleil, passe par un maximum vers midi, puis décroît et dans le

(1) *Journal of Research of the National Bureau of Standards.*, 14, n° 4, 1935, p. 464.

courant de la nuit passe par un minimum plus ou moins aplati suivant la saison. Les courbes (fig. 3) extraites d'un travail d'Appleton montrent ces variations. Dans ces courbes les abscisses indiquent les heures et les ordonnées les fréquences en mégacycles, fréquences qui sont proportionnelles à la racine carrée de la densité électronique.

Tout récemment, Kirby et Judson ont publié des courbes montrant que pendant le jour à un moment donné de la journée la fréquence critique était propor-

tionnelle à $(\cos \psi)^{\frac{1}{2}}$ étant l'angle que font les rayons solaires avec le zénith. La densité électronique serait donc pendant les parties éclaircies du jour proportionnelle à $(\cos \psi)^{\frac{1}{2}}$.

Les résultats ci-dessus nous montrent immédiatement que la densité électronique dans la couche E a des variations saisonnières. La densité maximum qui a lieu à midi est plus grande en été qu'en hiver et le minimum de nuit est plus aplati en hiver qu'en été. Nous rapprocherons, tout de suite, ce dernier point du fait qu'en été la période de nuit aux hautes altitudes est excessivement courte.

Des travaux récents d'Appleton et de Naismith montrent que dans le sud de l'Angleterre la densité électronique de midi présente un maximum vers le solstice d'été et un minimum au solstice d'hiver. Le rapport de ce maximum à ce minimum est de 1,8, valeur numérique dont Appleton et Chapmann ont tiré des conclusions comme on le verra dans la suite. Nous indiquons, également, le résultat suivant dû à Appleton et valable pour le sud de l'Angleterre.

A l'équinoxe de printemps, la densité électronique dans la couche E est de $1,2 \times 10^5$ électrons par centimètre cube. Mitra (1) opérant aux Indes, dans une latitude plus basse, trouve dans les mêmes conditions 5×10^5 . Les variations diurnes et saisonnières de la couche F_2 sont beaucoup moins marquées.

D'après Appleton, la couche F_2 présenterait un maximum d'ionisation vers 10 h du temps local, un autre vers 18 à 19 h. La variation saisonnière serait peu nette. La densité électronique présenterait deux maxima peu marqués, l'un en mars, l'autre en octobre-novembre. L'ionisation est faible, en été le minimum nocturne de l'ionisation de F_2 coïnciderait en été avec le lever du soleil. Il le précéderait d'environ une heure en hiver.

Appleton indique au moment de l'équinoxe de printemps les densités maxima suivantes (toujours pour le sud de l'Angleterre) : $2,6 \times 10^{+5}$ électrons par centimètre cube pour la couche F_1 , $4,2 \times 10^{+5}$ pour la couche F_2 . Mitra, aux Indes, a trouvé jusqu'à 15×10^5 électrons pour F_2 . Kirby, Berkner et Stuart trouvent bien, comme Appleton, que l'ionisation de la couche F_2 est plus faible en été qu'en hiver, mais ne notent que le maximum du soir. Nous verrons plus tard comment

Appleton explique la manière dont se comporte la couche F_2 .

Pour terminer nous noterons que, si les mesures de densité ionique, faites sous l'équateur, ont conduit à des valeurs beaucoup plus élevées que celles trouvées par Appleton dans les régions du sud de l'Angleterre, les mesures faites dans les régions polaires donnent des résultats beaucoup plus faibles.

On peut se demander quel est l'agent ionisant de la haute atmosphère. Tous les phénomènes indiqués plus haut, en particulier le parallélisme entre la variation de la distance zénithale du soleil et la densité électronique, semblent bien indiquer qu'il s'agit d'un rayonnement émané du soleil et se propageant avec la vitesse de la lumière. On est tout de suite amené à penser qu'il s'agit de la radiation ultraviolette.

Pourtant Chapmann avait émis tout d'abord une opinion contradictoire. Se basant sur le fait que, dans l'étude des variations magnétiques, la composante lunaire est fortement influencée par les perturbations magnétiques, il avait supposé que la couche E pouvait être ionisée par des particules neutres émanées du soleil. Il les supposait neutres pour qu'elles ne fussent pas déviées par le champ magnétique terrestre. D'après les calculs de Milne, Chapmann leur attribuait une vitesse de 1 600 km par seconde. Dans ces conditions en tenant compte du mouvement de la terre et de celui de la lune, il arrivait à cette conclusion que toute éclipse solaire devait être accompagnée d'une éclipse corpusculaire se produisant un peu avant l'éclipse optique et dont la ligne de centralité était déportée parfois de plusieurs centaines de kilomètres à l'est.

On ne devait donc observer aucune variation dans la densité ionique de l'ionosphère sur la ligne de centralité de l'éclipse optique. L'éclipse du 31 août 1932 dont la ligne de centralité optique traversait le Canada, le New-Hampshire et une partie du Massachusset se prêtait admirablement à des expériences de ce genre. Des sondages verticaux de l'ionosphère furent faits près de Boston par Heinrick et Pickard, d'une part, Mimma et Wang d'autre part, et près de Sydney dans l'île du Cap Breton par Kirby, Berkner Gillian et Norton — par Henderson dans l'Ontario. Des expériences furent reprises par des physiciens japonais aux îles Carolines, pendant l'éclipse de février 1934.

Les résultats sont très nets. Ainsi pour l'éclipse du 31 août 1932 dont la partie corpusculaire aurait dû se produire deux heures auparavant et à plusieurs centaines de kilomètres dans l'Atlantique, on a constaté sur la ligne de centralité optique les résultats suivants : Henderson trouve au moment de l'éclipse une diminution de 50 pour 100 de l'ionisation de la couche E. Kirby et ses collaborateurs une diminution de 30 pour 100 dans l'ionisation de la couche E. Schaffer et Goodall trouvent également une diminution de l'ionisation de la couche E qui atteint son minimum 9 min après la totalité de l'éclipse.

Heinrick et Pickard s'étaient bornés à mesurer la hauteur de réflexion d'une onde de 3 500 kilocycles.

(1) MITRA. *Nature*, 21 mars 1930.

La hauteur de réflexion qui était de 180 km, s'est élevée à 300 et 400 km pendant l'éclipse. Le doute ne semble donc plus possible.

Il a été pourtant constaté un fait assez curieux qui semble indiquer l'existence d'une éclipse corpusculaire, mais pourtant, non pas comme le croyait Chapman sur des corpuscules neutres, mais sur des électrons. Alexanderson avait cherché à étudier l'influence de l'éclipse d'août 1932 en utilisant le dispositif suivant : un poste émetteur de télévision était établi à Shenectady, le poste récepteur (34,6 m de longueur d'onde) était à North Conway, sur la ligne de centralité. L'émission de télévision aurait dû donner à la réception une série de bandes parallèles. Pratiquement, dans les expériences faites les jours précédant l'éclipse, on n'obtint que de très mauvaises réceptions, au lieu de bandes, on n'obtint qu'une série de taches noires et blanches. Le jour de l'éclipse, deux heures avant le commencement de l'éclipse optique, il y eut un brusque évanouissement de la réception qui, cas fortuit sans doute, ne reprit que lors de l'éclipse optique.

La mauvaise qualité de la réception observée les jours précédant l'éclipse, est interprétée par Alexanderson comme indiquant des variations brusques du trajet des ondes, de l'ordre de 600 km.

Cela conduit évidemment à admettre que le trajet de ces ondes était de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres et Alexanderson pense que les ondes reçues à North Conway provenaient d'une diffusion sur des nuages électroniques situés au nord de l'Atlantique au voisinage de la région des aurores polaires. On peut concevoir que dans ces régions, il a pu se produire une éclipse corpusculaire plus ou moins partielle des porteurs électrisés venant du soleil. Mais en tout cas, ce résultat fort intéressant n'apporte aucune confirmation aux idées de Chapman de la possibilité de l'ionisation de la haute atmosphère par des corpuscules neutres.

Disons toutefois que Maeda qui a observé l'éclipse de soleil du 14 février 1934 à Loop-Island, à l'est des îles Carolines, tout en reconnaissant l'action très nette des rayons ultraviolets sur les couches E et F, pense que certaines particularités observées le jour de l'éclipse pourraient être expliquées par une éclipse corpusculaire.

L'ionisation de la haute atmosphère est bien due à des rayons ultraviolets.

Appleton, dans ces conditions, admet que les quatre couches qu'on peut observer sont dues à l'action de la lumière ultraviolette sur l'azote moléculaire et atomique, l'oxygène moléculaire et atomique pour les quels il indique les constantes suivantes :

Atome d'oxygène, potent. d'ionis.	13,6 V	corresp. à	910 Å
Mol. d'oxygène,	—	—	16 — 770 Å
Molécule d'azote,	—	—	16,9 — 730 Å

Des résultats ci-dessus, Appleton et Chapman ont tiré quelques considérations théoriques :

Soit à un instant donné q le régime de production d'électrons sous l'action de l'agent ionisant. Cette production est équilibrée par la décroissance de l'ionisation, Si celle-ci est produite par la recombinaison des électrons et des ions, on a, en appelant N la densité ionique :

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2. \quad (1)$$

Mais il se pourrait que les électrons cessassent d'agir sur la propagation des ondes radioélectriques en s'attachant à des atomes neutres.

Dans ce cas, on aurait :

$$\frac{dN}{dt} = q - \beta N.$$

A midi, au moment du maximum d'ionisation $\frac{dN}{dt}$ est nul; on a donc :

$$q = \alpha N^2$$

dans le premier cas et dans le second cas, on a :

$$q = \beta N.$$

Envisageons tout de suite le premier cas. Nous affecterons des lettres h et e les valeurs relatives au solstice d'hiver et au solstice d'été. On doit avoir pour les densités ioniques à midi, en hiver et en été :

$$\frac{N_e}{N_h} = \sqrt{\frac{q_e \alpha_h}{q_h \alpha_e}}$$

Mais, d'après Chapman, le taux d'ionisation q à midi est proportionnel au cosinus, l'angle zénithal ψ du soleil est inversement proportionnel à la température absolue du milieu. On a donc :

$$\frac{N_e}{N_h} = \sqrt{\frac{\cos \psi_e T_h \alpha_h}{\cos \psi_h T_e \alpha_e}}$$

et en admettant avec Milne que α est inversement proportionnel à $\tau^{\frac{1}{2}}$, τ température des électrons, on a finalement :

$$\frac{N_e}{N_h} = \sqrt{\frac{\cos \psi_e T_h}{\cos \psi_h T_e}} \sqrt{\frac{\tau_e}{\tau_h}}$$

Dans le sud de l'Angleterre pour le solstice d'hiver d'été, on a :

$$\sqrt{\frac{\cos \psi_e}{\cos \psi_h}} = 1,84$$

et à Washington $= 1,44$.

Or, les mesures de densité électronique, à midi, dans la couche E en Angleterre et à Washington, au solstice d'été, donnent :

$$\text{Angleterre : } \frac{Ne}{Nh} = 1,80$$

$$\text{Washington : } \frac{Ne}{Nh} = 1,40$$

ce qui semble indiquer : 1° que la disparition de l'ionisation est bien due à la recombinaison des ions et des électrons ; 2° que le produit $7 \tau^{\frac{1}{2}}$ est indépendant de la saison. Remarquons que Kirby et Judson ont trouvé que la densité ionique était proportionnelle à $\cos \psi^{\frac{1}{2}}$.

Puisqu'à un instant donné, on a :

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2$$

et que q est proportionnel à $\cos \psi$, ils en concluent que $\frac{dN}{dt}$ doit être très faible. αN^2 représenterait donc une combinaison rapide, donc une grande valeur de N , et en vertu des formules données plus haut, donnant le rapport $\frac{N}{m}$ en fonction de la fréquence critique, une grande valeur de m .

On n'aurait donc pas dans la couche E, d'après Kirby et Judson, des électrons, mais des ions lourds. Nous exposons cette idée sans la discuter. Notons que la décroissance de la densité ionique, au coucher du soleil, divers expérimentateurs ont déduit la valeur de α pour lequel on a trouvé des valeurs comprises entre $1,5 \times 10^{-10}$ et $4,5 \times 10^{-10}$.

Pour expliquer les phénomènes qui se passent dans la couche E et qui sont très nettement différents de ceux de la couche E, Appleton fait intervenir la température produite par l'action du soleil dans la région où se forme la couche F. La dilatation de l'atmosphère produirait une raréfaction entraînant une diminution de l'ionisation.

Nous n'avons pas envisagé ce qui se passe au-dessous de la couche F₂. Il y a là, évidemment, une région ionisée. Mais étant donné la pression plus élevée, les chocs y sont plus nombreux. Or, toutes les théories exposées ici sous une forme un peu simplifiée supposent que la fréquence des chocs est inférieure à la fréquence des ondes. S'il n'en est pas ainsi, il y a absorption. C'est pour cela que de jour on n'a pas de réflexion sur la couche E pour les fréquences inférieures à 2 mégacycles. Au contraire, lorsque la nuit arrive, l'ionisation diminuant partout, l'absorption dans la région inférieure à E diminue et des fréquences plus faibles que 2 mégacycles peuvent parvenir à la couche E et s'y réfléchir. C'est aussi pour cette raison que les postes de radiodiffusion ont une plus grande portée de nuit que de jour. De jour on n'entend que l'onde directe (onde de sol), de nuit ces ondes arrivent à la couche E, s'y réfléchissent et arrivent à grande distance.

Un phénomène très curieux a permis de déterminer

expérimentalement le nombre des chocs pendant la nuit dans la couche E. C'est ce qu'on appelle l'effet Luxembourg. Lorsque le grand cercle joignant un récepteur à un émetteur de radiodiffusion de petite longueur d'onde (200 à 300 m) passe à proximité du poste de Luxembourg, on constate que malgré la différence des longueurs d'onde, on entend Luxembourg sur l'onde courte, surtout pendant les silences, quand le poste à onde courte émet seulement son onde porteuse. Cette onde porteuse est modulée par Luxembourg. On attribue cette modulation à une sorte de modulation de l'ionosphère par le poste puissant de Luxembourg. Quand des ondes radioélectriques traversent l'ionosphère, les électrons prennent sous l'action du champ électrique une certaine vitesse qui vient se combiner avec leur vitesse d'agitation. En quelque sorte, les ondes modifient la température des électrons. En vertu de la relation $u = l\nu$, l libre parcours, ν fréquence des chocs, cette fréquence augmente, par suite, l'absorption d'énergie.

Au voisinage d'un grand poste comme Luxembourg, le coefficient d'absorption varie donc avec l'intensité du champ émis, par conséquent, avec la modulation du poste. L'absorption d'une onde continue traversant cette zone variera donc suivant la modulation du poste perturbateur et à la réception reproduira la modulation de ce poste.

Bailey et Martyn ont démontré que la profondeur de cette modulation étant inversement proportionnelle à $\sqrt{F^2 + B^2}$, F fréquence de modulation du poste perturbateur.

Des résultats obtenus par l'influence de Luxembourg sur les émissions du poste suisse de Beromünster écouté en Hollande, ils ont pu déduire que dans la couche E de nuit la fréquence des chocs était de l'ordre de 2×10^8 par sec.

Tout récemment, Walker a trouvé par des considérations sur les coefficients de réflexion $1,9 \times 10^8$ pour le nombre de chocs par seconde dans la couche F.

En admettant que pour des courants de fréquence très faible, la conductibilité spécifique de la haute atmosphère peut être calculée par la relation

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m} \times \frac{1}{\nu}$$

N nombre d'électrons par centimètre cube, e charge de l'électron, m sa masse, ν nombre de chocs par unité de temps, on est conduit pour la couche E à une conductibilité de l'ordre de 10^{-11} unités électromagnétiques C. G. S., de 10^{-11} pour la couche F₂.

Nous rappellerons que Schuster⁽¹⁾, pour expliquer les phénomènes magnétiques terrestres, avait été amené à attribuer à la haute atmosphère une conductibilité de 10^{-13} u. e. m. c. g. s. Nous nous bornons à signaler sans commentaires cette coïncidence.

(1) MURAIN. *Magnétisme et Electricité terrestres*, p. 20.

Les relations entre le Magnétisme terrestre et l'ionosphère.

On a constaté depuis longtemps qu'une relation devait exister entre les phénomènes manifestés par le magnétisme terrestre et la constitution de l'ionosphère. Les exploitants ont constaté, par exemple, que les communications transocéaniques (France-Etats-Unis) étaient moins bonnes, le jour où, l'Institut de Physique du Globe caractérisait le jour, comme agité au point de vue magnétique.

Il est évident, que c'est dans les régions polaires où les variations des phénomènes magnétiques sont le plus évidentes que la relation entre ces phénomènes et la constitution de l'ionosphère devait apparaître le plus clairement. L'année polaire 1931-1932 a en effet apporté des résultats fort intéressants. Les résultats ont surtout été fournis par la mission française du Scoresby-Sund, les missions anglaises et allemandes à Tromsø, la mission russe à Iakoutsk et la mission polonaise à l'île aux Ours.

Les deux couches trouvées sous les basses latitudes ont été retrouvées dans les régions polaires, mais avec des densités électroniques beaucoup plus faibles (de 70 pour 100). Comme conséquence, les longueurs d'onde employées pour le sondage vertical devaient être beaucoup plus faibles et il a été nécessaire de descendre jusqu'à des longueurs d'onde de 150 m, pour observer des échos.

Cette diminution de l'ionisation dans les régions polaires n'a rien qui doive surprendre, étant donné ce qui a été dit plus haut sur le rôle de la radiation ultraviolette sur l'ionisation.

La variation diurne de la couche E n'est pas la même dans les régions polaires que sous les latitudes tempérées.

C'est au voisinage du coucher du soleil que cette ionisation est maximum. On peut expliquer cette particularité de la façon suivante : dans les régions polaires, au voisinage de la zone d'activité aurorale maximum, où se trouvaient les diverses missions, l'ionisation n'est plus due uniquement à l'action de la lumière solaire. Les électrons émanés du soleil jouent un rôle (électrons primaires ou électrons secondaires suivant les idées de Dauvillier). Or, ces électrons arrivent sur la terre par la région d'obscurité. Comme l'a fait remarquer un des physiciens de la mission anglaise, c'est surtout pendant la période de nuit que les perturbations magnétiques étaient le plus fréquentes.

Toutes les missions ont été d'accord sur le point suivant : les perturbations magnétiques ont, pour effet, de supprimer les échos sur toutes les fréquences utilisées. Les échos ne réapparaissent qu'un certain temps après la disparition de la perturbation ; suivant l'expression imagée de Brun-Bruewitch, chef de la mission russe, on dirait qu'un écran s'intercale entre le sol et les couches réfléchissantes de l'ionosphère.

Les missions françaises et allemandes, qui effectuaient des mesures de champ de postes éloignés, ont

également constaté que la valeur de ce champ tombait à des valeurs très faibles et même devenait nulle au moment d'un orage magnétique. A ce sujet le Lieutenant de Vaisseau Haber, chef de la mission française, a pu constater qu'un violent orage magnétique, rendant impossible toute réception au Scoresby-Sund, se manifestait par un léger fléchissement des réceptions à Rabat, du poste de Pontoise. La mission allemande qui procédait à des relevés goniométriques a constaté que ces relevés étaient bien meilleurs les jours de grande agitation magnétique. Ceci implique la disparition des ondes réfléchies dans la haute atmosphère qui interférant avec l'onde directe, troublent les relevés.

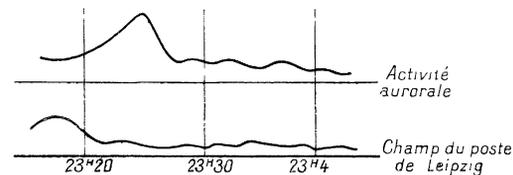


Fig. 4.

Les aurores polaires jouent le même rôle que les perturbations magnétiques. Nous reproduisons d'après la mission allemande des courbes (fig. 4) donnant, d'une part l'activité aurorale le 20 mars 1933 et l'intensité du champ du poste de Leipzig mesurée à Tromsø.

Signalons enfin que Lugeon à l'île aux Ours a constaté que les parasites qui se produisent sur les côtes américaines cessaient d'être perçus, lorsqu'une aurore se produisait à l'ouest du poste de réception.

Voici comment on peut, avec Appleton, expliquer ces résultats : les perturbations magnétiques et les phénomènes auroraux sont provoqués (Birkeland, Deslandres, Störmer) par l'arrivée dans l'atmosphère d'électrons émanés du soleil (indirectement suivant les idées de Dauvillier). Ces électrons pénètrent dans l'atmosphère bien au-dessous de la couche E, dans cette région à laquelle nous avons fait allusion à propos des ondes de radiodiffusion et qu'on appelle quelquefois la couche D. Dans cette région, les chocs sont nombreux, la pression étant assez élevée. Il en résulte un amortissement des ondes qui ne peuvent parvenir jusqu'à la couche E pour s'y réfléchir. L'idée de Brun-Bruewitch se trouve alors justifiée.

Étant donné ce qui a été dit, on peut s'attendre à trouver une relation entre la propagation des ondes et la période de 27 jours des taches solaires. C'est ce qu'ont mis en évidence, les missions françaises et allemandes. Elles ont d'abord constaté que l'intensité et la fréquence des perturbations magnétiques, d'une part, l'activité aurorale, d'autre part, présentaient nettement du moins pendant la période de nuit polaire, une périodicité de 27 jours.

La constitution de l'ionosphère, caractérisée pour les Français, par l'intensité du champ des postes éloignés, pour les Allemands, par l'évaluation du pouvoir

réfléchissant *apparent* de la couche E présentait la même périodicité, toujours pendant la nuit polaire, mais décalée d'une demi-période, les postes éloignés étant mieux reçus dans les périodes de calme magnétique et de faible activité aurorale.

Tous ces phénomènes devenaient moins nets pendant le jour polaire.

Dauvillier a eu l'idée de tracer la courbe de l'activité solaire caractérisée par les nombres de Wolff. Il a constaté que cette courbe qui, bien entendu, présente la périodicité de 27 jours, était en phase avec la courbe de bonne réception radiotélégraphique et en opposition de phase avec les courbes d'activité magnétique et d'activité aurorale.

Rappelons qu'il a déjà été signalé (Mathias, *Traité d'Electricité atmosphérique et tellurique*, p. 346) qu'au Groenland, le maximum des aurores polaires se produisaient au moment du minimum des taches solaires, alors que d'après Fritz, dans d'autres régions les maxima et les minima correspondaient pour les deux phénomènes.

Les recherches sur l'ionosphère entreprises pendant l'année polaire ont été continuées à Tromsø, par le professeur Harang, directeur du Nordlyobservatoire. D'une communication qu'il a bien voulu nous faire, il résulte que lors des périodes d'agitation magnétique, on constate une diminution de la densité électronique de la couche F₂. Appleton, pour expliquer cette diminution, admet que les causes qui provoquent l'agitation magnétique, provoquent également une élévation de température de la haute atmosphère.

Relation entre l'ionisation de la couche E et les phénomènes orageux.

C. T. R. Wilson avait émis l'opinion que les causes qui provoquent les phénomènes orageux agissaient

également sur la couche E. Bailey et Martyn ⁽¹⁾ ont cherché à expliquer théoriquement le mécanisme qui pouvait relier les deux phénomènes. Appleton ⁽²⁾ signale que des relations ont été trouvées entre le nombre des orages et les taches solaires.

En ce qui concerne les ondes radioélectriques Watson Watt a indiqué qu'au cours d'un orage, il avait pu constater que la densité de la couche E s'était élevée à 8×10^5 électrons par centimètre cube; celle de la couche F étant tombée à 4×10^5 . D'une façon générale, d'après Watson Watt, les orages d'été lorsqu'ils se rapprochent à une cinquantaine de kilomètres du point où on procède à des sondages verticaux provoquent une augmentation notable de l'ionisation de la couche E.

Ces affirmations de Watson Watt sont contredites par Kirby et Judson ⁽³⁾ qui prétendent que les anomalies constatées parfois dans la couche E, se caractérisant par des réflexions sur des fréquences élevées, sont dues à une toute autre cause qu'une augmentation de l'ionisation. Ils en auraient constaté à Washington, alors qu'aucun orage n'avait sévi pendant les 24 h précédentes à moins de 300 km du poste. Mitra, au contraire, observant sous la latitude des Indes, prétend que les orages sont susceptibles de modifier l'état de la couche E.

Conclusion. — Tels sont, aujourd'hui, les principaux résultats qu'on peut considérer comme acquis, relativement à la constitution de l'ionosphère. Isolés, ces résultats ne présenteraient pas beaucoup d'intérêt, mais rapprochés d'autres phénomènes géophysiques, ils semblent pouvoir donner des renseignements sur le mécanisme qui régit ces phénomènes.

⁽¹⁾ *Phil. Mag.*, 1934, 18, p. 369.

⁽²⁾ *Proc. Roy. Soc.*, 1933, 141, p. 701.

⁽³⁾ *J. Research Bur. Stand.*, avril 1935, 44, p. 473.