Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles

Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève

Band: 11 (1929)

Artikel: La nouvelle méthode de sondagé électromagnétique vertical et quasi-horizontal de l'atmosphère

Autor: Lugeon, Jean

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-740985

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

LA
Nouvelle méthode de sondage électromagnétique vertical et quasi-horizontal de l'atmosphère[1]

PAR

Jean LUGEON

(Avec 9 fig.).

La méthode très générale de sondage de la troposphère, de la stratosphère, voire même de l'ionosphère, que je me crois autorisé à proposer, est basée sur les propriétés photoélectriques complexes des rayons rasants du soleil au moment du passage des anneaux crépusculaires, sur le champ électromagnétique enregistré par un poste de T. S. F.

Les théories récentes sur la propagation des ondes hertziennes, particulièrement des ondes courtes, s'accordent sur l'existence dans les hautes régions de notre atmosphère d'une couche fortement ionisée qui jouerait le rôle d'un véritable miroir, renvoyant vers la terre les rayons électromagnétiques issus des points de sa surface. Cette couche est importante pour l'explication de la méthode.

Considérons un poste de T. S. F., F (fig. 1), émettant un signal avec une intensité constante et situé à une certaine distance d'un poste récepteur R, de manière que ce dernier reçoive les ondes réfléchies par le miroir concentrique à la terre. Les rayons

[1] Communication présentée à la réunion annuelle de la Société suisse de Géophysique, Météorologie et Astronomie à Davos, le 30-31 août 1929.

BIBLIOTHÈQUE DE L'UNIVERSITÉ

réfléchis seront inclinés par rapport à la verticale au poste récepteur, d'un angle qu'il est possible de déterminer, car il est fonction de la longueur d'onde de l'émission.

D'après une relation établie par le Commandant Mesny dans son livre classique sur les ondes courtes, « la variation d'ionisation exigée pour ramener les ondes sur la terre croît en raison

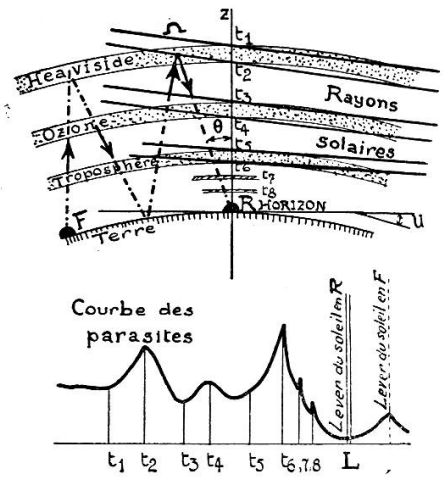

Fig. 1.

inverse du carré de la longueur d'onde ». Il en résulte que l'angle θ est donné *grosso modo*, au moins pour les ondes courtes, par la relation: $\cos \theta = \frac{\lambda}{75}$, où λ est la longueur d'onde.

On voit immédiatement que, plus la longueur d'onde augmente, plus l'angle décroît, et, par conséquent, plus les rayons réfléchis se rapprochent de la verticale. Pour les besoins de notre thèse, nous admettrons, en première approximation, que des ondes de plusieurs milliers de mètres de longueur reçues au poste récepteur, descendent sensiblement du zénith. Si le récepteur est situé à une distance suffisante du transmetteur, il en recevra donc les émissions après plusieurs réflexions successives.

Ces considérations s'appliquent aussi à la plupart des ondes hertziennes naturelles — parasites ou atmosphériques — qui prennent naissance dans des foyers d'émission situés près du sol. Dans la suite je ne considérerai que ces ondes que l'on a dénommées aussi les perturbations du champ électromagnétique. A

l'oscillographe, elles présentent l'aspect de trains d'ondes espacés et très amortis. Ici elles remplaceront donc d'une manière économique le poste transmetteur, puisqu'elles sillonnent à tout instant l'atmosphère, du moins en Europe centrale. L'objet de cette étude est d'en utiliser, non seulement la propriété d'être réfléchies par le miroir hertzien, mais également les nombreuses particularités qui proviennent du fait de la variabilité de leurs foyers d'émissions au crépuscule.

L'appareil récepteur utilisé est mon *atmoradiographe* [1], composé d'un amplificateur du type apériodique suivi de plusieurs relais transformant l'énergie captée en courant télégraphique actionnant un cinémographe, qui inscrit d'une manière très suggestive et facilement interprétable la fréquence par minute des trains parasites. Les ordonnées de la courbe sont d'ailleurs proportionnelles au champ électromagnétique moyen, ainsi qu'on peut l'affirmer en enregistrant, en parallèle, à l'aide d'un appareil chargeant, après détection et redressement, un condensateur dont le courant de charge est dépensé lentement dans un milliampèremètre inscripteur. C'est avec ce dernier type d'enregistreur que j'avais fait, de 1925 à 1927, mon étude sur les « Atmosphériques des front quasi-stationnaires sur le versant nord des Alpes [1] ».

Reprenons (fig. 1) le raisonnement interrompu, en admettant que les lois de propagation des ondes amorties sont applicables dans une large mesure aux parasites enregistrés.

Si le parcours de l'onde est plongé dans l'obscurité totale — respectivement en pleine lumière — le champ développé au récepteur, toutes choses égales d'ailleurs, sera constant.

Examinons comment ce champ se comportera lorsque les rayons de l'aurore descendant du zénith traversent successivement les diverses couches atmosphériques, sous les latitudes de l'Europe Centrale.

[1] Jean LUGEON, Un appareil radio-électrique pour déceler l'origine géographique de l'air. *Archives* (5), 10, p. 311 (1928) et *Act. Soc. helvétique Sc. nat.*, Lausanne, 1928, p. 141.

[1] Jean LUGEON, Les atmosphériques des fronts quasi-stationnaires sur le versant nord des Alpes. *Archives* (5), 10, p. 68 (1928) et *Id. Act.*, Bâle, 1927, p. 108.

Aussi longtemps que l'angle de dépression du soleil, soit l'angle de ses rayons avec l'horizon de l'antenne du récepteur, dépassera 20° à 25°, selon la saison, on ne remarquera rien d'anormal dans le champ. En effet, les rayons rasants passent à ce moment là bien au-dessus de la zone périphérique qui renferme les ondes hertziennes. Leur altitude limite à minuit vrai est de 370 kilomètres au solstice d'été et de 9326 kilomètres au solstice d'hiver, au zénith de Zurich.

Par contre, dès que le premier rayon descendant devient tangent par le haut, au temps t_1, à la première couche ionisée qu'il rencontre, soit la couche de Heaviside-Kenelly qui réfléchit ou réfracte les ondes hertziennes considérées pour les renvoyer vers le récepteur, il se produira une variation du champ, puisqu'une partie du milieu que parcourent les ondes est soumise à l'action photoélectrique du rayonnement solaire et que l'autre partie est encore dans l'obscurité. La conséquence en sera généralement une augmentation brutale du champ à la réception, dès l'instant t_1; l'intensité continuera d'ailleurs à progresser jusqu'à un premier maximum qui se produit au temps t_2, où, la couche étant entièrement éclairée, le premier rayon la quitte par le bas.

Ce phénomène peut s'expliquer par un accroissement progressif de l'ionisation de la couche dû à l'effet photoélectrique. La densité ionique, ou mieux l'opacité électromagnétique de la couche, augmenterait ainsi en suivant spontanément le mouvement des rayons pénétrants. Le rapport entre les énergies incidente et réfléchie de l'onde hertzienne augmenterait donc corrélativement à l'opacité de la couche. En d'autres termes, le milieu ionisé, de réfractant qu'il serait dans l'obscurité totale, deviendrait réfléchissant dans la lumière. Et, si le trajet des ondes réfractées devait être grand, à l'intérieur de la couche, pendant la nuit, il sera raccourci, voire annulé, dès que les rayons lumineux auront percé cette couche. Je n'insiste d'ailleurs pas sur cette hypothèse qui peut être interprétée différemment, selon le processus du phénomène photoélectrique solaire, à la pression des gaz qui n'atteint à l'altitude de la couche de Heaviside que quelques millièmes de millimètre de mercure. Il n'est d'ailleurs pas exclu que des parasites prennent naissance dans la couche

au moment du passage des rayons solaires. Le premier maximum serait ainsi expliqué, puisqu'il coïnciderait avec une émission temporaire de parasites à propagation verticale se superposant à la réception aux parasites lointains utilisés pour le sondage.

Après le premier maximum au temps t_2, le champ devrait, semble-t-il, rester constant. Ce serait le cas s'il y avait continuité électrique, moléculaire et thermique entre la couche et le milieu inférieur. Mais l'expérience montrant que le premier maximum est suivi d'un abaissement rapide du champ, on en conclut qu'il y a effectivement une surface de discontinuité entre la couche et le milieu inférieur.

Supposons qu'une deuxième couche analogue à la première, soit située entre celle-ci et le sol (couche d'ozone). A l'instant t_3 où le premier rayon solaire deviendra tangent au haut de cette couche, on constatera une nouvelle et brusque variation du champ à la réception. Ce phénomène s'expliquerait d'une manière à peu près analogue au cas précédent. Par effet photoélectriqe, la conductibilité de cette couche serait modifiée et les rayons qui la traversent subiraient, dans son épaisseur, une altération traduite par une augmentation du champ au sol. On pourrait supposer aussi que les rayons solaires, en provoquant l'ionisation du milieu intermédiaire compris entre les couches, font varier d'une manière générale le champ électromagnétique qui y est développé. D'ailleurs, quelle que soit l'interprétation donnée, nous admettrons que les rayons solaires, après avoir quitté par le bas cette deuxième couche, provoquent une nouvelle diminution du champ, jusqu'à l'instant t_5, où ils entrent en contact avec une troisième couche située à une altitude inférieure (la limite de la troposphère et de la stratosphère). Là, le phénomène est toujours extrêmement net. Un maximum, généralement plus important que les deux précédents, termine le cycle des variations du champ dues à la traversée de la stratosphère par les rayons de l'aurore. Ce dernier maximum au temps t_6 est suivi d'une courbe d'expiration affectant la forme d'une demi-parabole, dont l'axe coïncide sensiblement avec l'ordonnée du lever du soleil, si la troposphère est parfaitement pure. Par contre, si la troposphère est feuilletée de nuages, brumes, brouillards, bancs ionisés, la courbe d'expiration sera

dentelée, et chacune des dents correspondra précisément aux temps t_7, t_8, etc., où les rayons solaires traversent une de ces strates.

L'expérience démontre ces faits d'une manière indéniable, soit à l'aide de sondages par avions, par ballonnets, ou par la simple considération des observations de montagne qui permettent de déterminer exactement l'altitude des plafonds nuageux, jusqu'au Jungfraujoch, la plus élevée des stations suisses, à 3457 m. Dans l'hiver 1928-1929, particulièrement, où la mer de brouillard, due à l'inversion de température, plana plusieurs semaines entre les altitudes de 900 et 1800 m, il me fut possible d'en mesurer l'épaisseur et la hauteur au-dessus de Zurich, à quelques dizaines de mètres près, par comparaison avec les observations d'Einsiedeln, du Righi, des Rochers de Naye, du Pilate, du Säntis et du Jungfraujoch.

Il est vrai que tous les nuages ne jouissent pas de ces propriétés électromagnétiques. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les cirrus et les nuages de la famille des stratus et des alto-stratus.

Pour faciliter les calculs, j'ai établi des abaques en partant des formules suivantes. La hauteur au-dessus du sol est donnée avec une approximation suffisante par la formule:

$$H = R\left(\frac{1}{\cos U} - 1\right),$$

où H est la hauteur et U l'angle de dépression du soleil. Celui-ci est déterminé par:

$$-\sin U = \sin\varphi \sin\vartheta + \cos\varphi \cos\vartheta \cos(t_0 + t),$$

où φ = latitude, ϑ = déclinaison du soleil, t_0 = angle horaire du soleil à son lever, t = temps donné par le diagramme, soit nombre de minutes écoulées entre l'ordonnée d'un des points considérés de la courbe d'enregistrement et l'ordonnée du lever du soleil. Voici quelques valeurs pour Zurich ($\varphi = 47° 23'$; $\lambda = 8° 33'$):

Altitude z *du premier rayon tangent, correspondant à un angle de dépression* u *du soleil,* t *minutes avant le lever astronomique à Zurich.*

Solstice d'hiver			Equinoxes			Solstice d'été		
t	*u*	*z*	*t*	*u*	*z*	*t*	*u*	*z*
5′	41′	485M	5′	50′	693M	5′	40′	455M
10′	1° 22′	1800M	10′	1° 40′	2720M	10′	1° 21′	1760M
15′	2° 5′	4170M	15′	2° 32′	6200M	15′	2° 1′	3890M
20′	2° 48′	7525M	20′	3° 23′	11150M	20′	2° 41′	6880M
25′	3° 30′	11900M	25′	4° 14′	17360M	25′	3° 20′	10820M
30′	4° 14′	17360M	30′	5° 4′	25km	30′	3° 58′	15300M
50′	7° 12′	51km	50′	8° 25′	69km	50′	6° 23′	40km
75′	11° 3′	119km	75′	12° 35′	157km	75′	9° 14′	84km
100′	15°	225km	100′	16° 36′	228km	100′	11° 47′	137km
150′	23° 13′	562km	150′	24° 17′	617km	150′	15° 50′	252km

Ce tableau montre que la vitesse d'abaissement des rayons du soleil le long de la verticale du lieu est variable, non seulement d'un jour à l'autre, mais également avec l'altitude à laquelle on considère le rayon. Près du sol la vitesse est de l'ordre de 180 à 280 m à la minute, selon la saison, alors que vers 100 km, elle atteint le chiffre de 1000 m à la minute. Il en résulte que l'approximation des observations diminue en raison directe de l'altitude. Par ailleurs, il faudrait tenir compte aussi du diamètre apparent du soleil à son lever, qui est loin d'être négligeable, puisque la durée du passage du disque à l'horizon atteint, à vue d'œil, environ 3 ½ minutes. Pour autant que j'ai pu m'en rendre compte par l'examen de quelques centaines de diagrammes d'enregistrement, les erreurs commises dans les calculs semblent être négligeables, si on rattache les formules au centre même du soleil. Ce fait tendrait à démontrer que l'activité photoélectrique de ses rayons rasants, sur les couches de la basse atmosphère, est douée d'une certaine inertie, et que cette action serait concentrée dans un très petit faisceau de rayons, correspondant finalement à un diamètre apparent ponctuel de l'astre. Je ne puis guère expliquer les choses autrement, sinon les chiffres que j'ai donné pour la mer de brouillard seraient illusoires,

l'approximation sur l'évaluation de l'altitude n'étant que de 3 ½ minutes × 180 m/minutes = 600 m environ, si l'on considère la durée du passage complet du disque à l'horizon. Je crois d'ailleurs pouvoir étayer cette théorie par les arguments suivants: Plus l'activité solaire est grande, plus les maxima sont élevés et les dentelures de la courbe d'expiration aiguës. Si l'on compare le rapport entre la surface apparente des taches au voisinage du méridien central, à la surface totale de l'astre, on constate également une relation analogue.

Quoi qu'il en soit, malgré la fragilité de ces hypothèses, je laisse parler l'expérience. Les faits semblent probants. Il est très intéressant de constater aussi que la réfraction optique ne semble pas intervenir, ce qui démontrerait que les corpuscules électrisés émis par le soleil et venant successivement ioniser les couches considérées, selon le schéma décrit, ne seraient pas réfractés en traversant tangentiellement l'atmosphère. A l'aurore, peu avant le lever, ils seraient d'environ 30 minutes d'arc en retard sur le lever observé, ce qui correspond à une altitude de 280 m aux équinoxes et de 325 m aux solstices, environ, pour les couches près du sol. Ces propriétés facilitent donc les calculs astronomiques, puisqu'il ne semble pas nécessaire de tenir compte de la réfraction.

Evaluation empirique de la température des inversions.

En étudiant un grand nombre de diagrammes au passage des anneaux crépusculaires, et, en concomitance, la variation de la température de l'air dans le sens vertical, connue avec une bonne approximation jusqu'à l'altitude de 3457 m, j'ai trouvé par temps anticyclonique et forte inversion de température une étonnante similitude entre les valeurs des amplitudes du dernier maximum nocturne du champ et l'amplitude de l'inversion de température, dont le maximum de courbure est situé entre les altitudes de 1400 et 1700 m (fig. 2). Ce phénomène imprévu est

[1] La lettre L signifie lever du soleil.

très difficilement explicable dans l'état actuel de nos connaissances sur l'effet photoélectrique de la radiation solaire sur les couches d'inversion de la basse atmosphère.

On constate, par exemple, pour les journées du 1er au 5 février 1929, que la relation est presque linéaire, si l'on reporte arbitrairement les amplitudes du champ et des inversions de température sur deux axes de coordonnées rectangulaires. J'ai tiré de cette relation une *formule empirique* pour déterminer la variation de température sur la verticale du lieu d'observation. En admettant, jour après jour, le principe de continuité des phénomènes météorologiques, il m'a été possible de calculer à Zurich, la température de l'air dans la couche de 2000 m reposant sur le sol en période anticyclonique stable, avec une approximation de 1 à 2 degrés, par rapport aux observations des stations de montagne précitées. Je ne veux pas entrer ici dans les détails du procédé qui demande à être étudié avec un plus grand nombre d'observations.

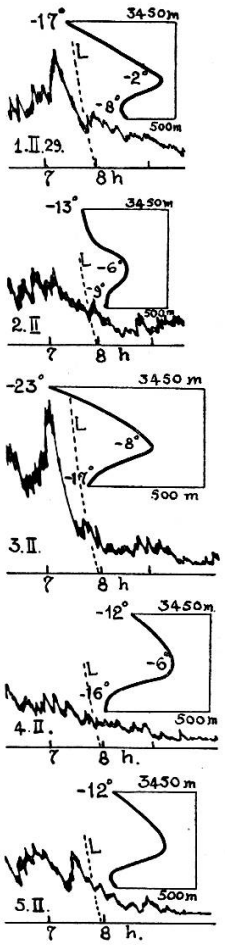

Fig. 2.

Particularités électromagnétiques de l'anneau crépusculaire.

Lors même que la constatation précédente ne pourrait pas être interprétée — il faudra sans doute de longues et minutieuses recherches de laboratoire pour en comprendre le mécanisme — la méthode de sondage permet non seulement de fixer l'altitude des couches d'inversion, mais donne une idée sur leur stabilité thermodynamique. Ainsi, lorsque l'air se réchauffe en altitude, le dernier maximum s'émousse, alors qu'au contraire il s'affile lorsque le coude d'inversion devient très pointu par suite de l'afflux de nouvelles masses d'air froid en couche mince de quelques centaines de mètres d'épaisseur sur le sol.

En classant les diverses formes du dernier maximum et de sa courbe d'expiration qui se termine au lever du soleil, on constate aussi que ces images sont en relation avec la situation barométrique continentale. Ainsi, en période de fœhn, le maximum est arrondi en ogive concave vers les abscisses et hérissé de dentelures très fines, alors qu'en régime du sud-ouest il a la forme d'une pyramide dont les arêtes sont convexes vers les abscisses (fig. 3).

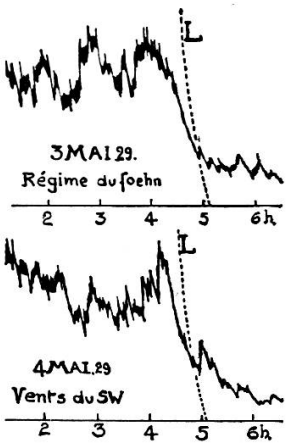

Fig. 3.

L'analyse des nombreuses particularités de la courbe d'enregistrement au moment du passage de l'anneau crépusculaire de l'aurore peut donc présenter un grand intérêt pour la diagnose locale des conjonctures météorologiques continentales en régime de transition, principalement lors de l'effondrement d'un anticlyclone.

Pour la compréhension de ce mécanisme, je suis obligé d'ouvrir ici une parenthèse. J'avais montré, dans mes travaux antérieurs [1], que les parasites locaux de petite portée varient

[1] Jean LUGEON, Relations entre diverses discontinuités météorologiques et les oscillations hertziennes parasites au voisinage des chaînes de montagnes. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 180, p. 594 (1925). Voir aussi: Les idées françaises sur la dynamique des parasites de la T. S. F. et leur extension en Suisse; Sur un nouveau procédé expérimental pour l'exploration des parasites atmosphériques. *Archives* (5), 7, p. 406 (1925); Brèves remarques concernant le mécanisme des orages de l'année 1925. *Ann. der Schw. Meteo. Zentralanst.*, 1925, Zurich, 1927.

en une certaine mesure avec le gradient vertical de température. Ile peuvent disparaître complètement au-dessus de la couche d'inversion de température et sont d'ailleurs le produit direct de la nature géographique de l'air en circulation: l'air polaire en comportant davantage que l'air maritime et l'air tropical en étant pour ainsi dire exempt [1]. Ces observations ont été confirmées par d'autres auteurs, pour ne citer que les recherches du Capitaine Robert Bureau [1] entre le Mont-Valérien et St-Cyr. On est donc amené à mettre à profit ces singularités pour déterminer sur le sol, la stabilité de la couche d'inversion ou, ce qui revient au même, de la mer de brouillard.

« Si cette couche d'air pollué est thermodynamiquement stable, il n'en est certainement pas de même de son *état électrique*, par quoi j'entends son ionisation et d'une manière générale tous les agents susceptibles de donner lieu à des variations de la conductibilité, du champ électrique, du courant vertical et enfin des atmosphériques. Cet état électrique subit une variation journalière très importante qui fait changer du tout au tout les *propriétés électromagnétiques* de la couche d'inversion de température entre le jour et la nuit. Cette variation est le produit direct de la radiation solaire. Elle est surtout remarquable à l'aurore où elle entraîne une extinction rapide et même l'annulation de la fréquence des trains d'oscillations parasites et de leur intensité. Le régime des parasites nocturnes, par contre, s'établit beaucoup plus lentement, après le passage de l'anneau crépusculaire. La couche est donc douée d'une *inertie électromagnétique post-crépusculaire nocturne* qui semble être fonction de la durée de l'éclairement diurne et, en une certaine mesure, de l'intensité de cette radiation, qui, par ailleurs, est en rapport étroit avec la pureté et la température des masses d'air superposées à la couche. C'est ainsi que, si des cirrus d'un front ou la marge d'un système nuageux masquent un instant les rayons solaires, les parasites débuteront d'une part plus rapidement après le coucher, d'autre part ils seront plus faibles qu'au cas où le ciel serait resté pur pendant

[1] Robert Bureau, Les Atmosphériques. *L'Onde électrique*, n° 55, Paris, 1926; Sur l'origine de certains parasites, *id.*, n° 88, Paris, 1929.

la journée. L'examen du diagramme permet donc de déceler, sous la mer de brouillard, la présence de nuages supérieurs, invisibles à l'œil [1]. »

La couche d'inversion serait donc productrice de parasites locaux de très faible portée et essentiellement nocturnes, augmentant subitement, mais pour une très courte durée, au moment où les rayons solaires directs ou, dans certains cas, les rayons réfléchis par des couches d'altitude supérieure, viennent l'éclairer. Ces parasites-là disparaissent définitivement quelques fractions de minutes après le lever du soleil sur le plan d'horizon de la couche, lorsque celle-ci est inondée de lumière.

Avec le type d'enregistreur que j'ai construit, on pourra remarquer des maxima de l'intensité moyenne par minute du champ ou simplement de la fréquence des décharges, au moment du passage des rayons solaires dans d'autres milieux; ainsi des parasites qui prendraient naissance au sein de la couche de Heaviside, dans les mêmes circonstances.

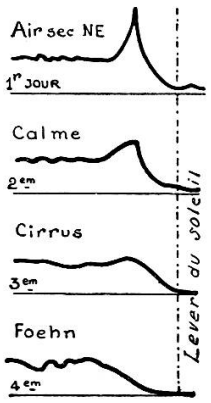

Fig. 4.

Par contre, dès que la destruction de la couche d'inversion commencera, soit par le renversement des vents d'altitude et l'arrivée sus-jacente de masses d'air de nature différente ou le réchauffement, soit encore par la variation de l'inclinaison des surfaces isobariques due au changement de sens du gradient barométrique, ces effets électromagnétiques s'atténueront progressivement et le maximum s'affaissera de jour en jour jusqu'à l'établissement définitif du régime de fœhn (fig. 4).

Le sondage quasi-horizontal, en longitude et en latitude.

Ces remarquables propriétés photoélectriques des rayons rasants du soleil se font sentir non seulement au moment où le

[1] Jean Lugeon, Une méthode pour sonder l'atmosphère à l'aide des perturbations du champ électromagnétique au passage de l'anneau crépusculaire. *C. R.*, t. 188, p. 1114, Paris, 1929.

soleil se lève à Zurich, mais il est possible, grâce à leur production à très grande distance, de déterminer la longitude, voire même la latitude des perturbations météorologiques solidaires de foyers d'émission de parasites, tels que les fronts froids des dépressions, par exemple. Il faut pour celà considérer la variation journalière des atmosphériques dits lointains, dont la portée atteint plusieurs milliers de kilomètres, à l'inverse des atmosphériques locaux dont je viens de parler et qui ne se propagent qu'à quelques centaines de mètres.

« Le régime des atmosphériques lointains, captés dans l'obscurité totale, s'établit progressivement après que le soleil s'est couché sous l'horizon de leur *foyer d'émission*. Leur premier maximum est atteint, peu après la fin du crépuscule astronomique sur ledit foyer, lorsque le dernier rayon solaire a quitté le miroir de réflexion des ondes hertziennes. Inversement, dès que les premiers rayons de l'aurore pointent dans le zénith du foyer ou du récepteur, selon que celui-ci est à l'ouest ou à l'est de celui-là, la propagation à grande distance est progressivement étouffée, puis annulée lorsque le jour est complet sur le parcours de l'onde, entre le foyer et le récepteur.

Un minimum des parasites lointains a lieu sensiblement quand le soleil est à l'opposé du méridien récepteur, à minuit vrai. Ce fait est imputable à la marée de la couche de Heaviside, dont l'altitude serait maximum à ce moment-là et par conséquent la longueur du chemin des ondes également maximum, d'où affaiblissement du champ à la réception.

La position géographique des discontinuités météorologiques d'où rayonnent des atmosphériques lointains est donnée par la forme de la courbe d'enregistrement. Soit un foyer d'émission F sur le méridien du récepteur R (dépression sur la Méditerranée) (fig. 5). La courbe des parasites sera symétrique par rapport à minuit vrai, puisque, toutes proportions gardées, les phases crépusculaires sont les mêmes en F et en R. Si le foyer est à l'ouest de R, sensiblement sur le même parallèle (dépression sur l'Atlantique ou front polaire), le départ des parasites lointains aura lieu après le coucher du soleil en R, avec un retard équivalent à la différence de temps entre les crépuscules en R et en F. Le diagramme donnant ce temps, on en déduit la

longitude de F. Si le foyer est à l'est de R (front régénéré sur les Balkans, la Russie), la courbe est identique au cas précédent, mais renversée par rapport à minuit vrai. La longitude de F est alors donnée par le dernier maximum nocturne, correspondant à la fin de la nuit au foyer.

La comparaison de ces courbes, jour après jour, permet de déterminer à grande distance la vitesse moyenne de déplacement par jour d'une perturbation solidaire d'un foyer de parasites. Considérons un foyer à l'ouest de R et qui s'en rapproche (fig. 5). Soient F_1, F_2, F_3 ses positions successives au moment

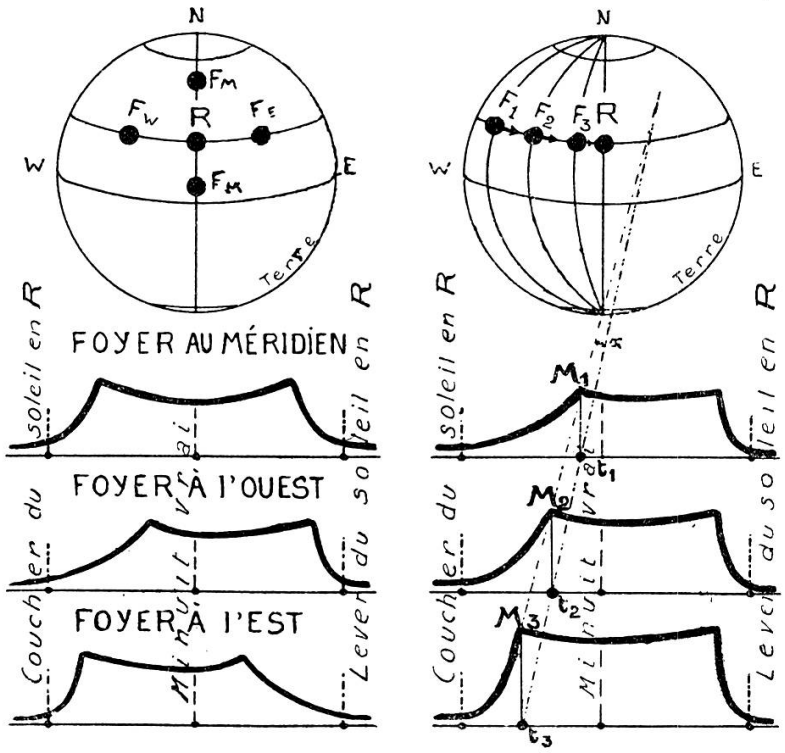

Fig. 5.

où l'anneau crépusculaire le traverse. Sa longitude initiale F_1 sera déterminée par le premier maximum M_1 en R, qui correspond au moment où le trajet RF_1 est plongé dans l'obscurité totale, soit à la fin du crépuscule en F_1, au temps t_1. Le jour suivant le même maximum se produira, mais plus tôt, au temps t_2, puisque le foyer en F_2 se sera rapproché de R. On a sa longitude pour les mêmes raisons. Et ainsi de suite pour F_3. Si le foyer s'est déplacé sensiblement sur le même parallèle que

R, sa vitesse en kilomètres-heure est alors $\frac{F_1 - F_2}{t_1 - t_2}$, en convertissant les différences de longitudes en kilomètres et les temps en heures.

Les points t_1, t_2, t_3, seront sur une droite, si la vitesse reste constante. Si l'énergie du foyer ne varie pas, pendant les jours considérés, les points M_1, M_2, M_3, s'alignent. Leur angle α avec la droite précédente est un *indice de potentiel* de la perturbation et en définit l'importance thermodynamique. Si ces points sont sur une ligne quelconque, par rapport à la droite t_1, t_2, t_3, on aura une idée de la perte ou du gain d'énergie pendant la translation [1]. »

Grâce à l'extrême obligeance de mon éminent collègue de l'Office national météorologique de France, M. le Capitaine Robert Bureau, j'ai pu vérifier cette théorie par la juxtaposition des diagrammes de Zurich et de St-Cyr près de Paris, obtenus par un appareil presqu'en tous points semblable au mien. Il est vrai que la base Paris-Zurich s'est révélée dans bien des cas un peu trop faible, le décalage du coucher et du lever n'étant pour les mois considérés que de 21 minutes. Mais, en mai 1929, j'ai eu la bonne fortune, grâce à la générosité de M. E. Nicola, de pouvoir placer un deuxième *atmoradiographe* de mon système à Lausanne. M. Nicola qui en surveille très consciencieusement la marche m'a ainsi permis de réaliser un triangle Paris-Lausanne-Zurich permettant de préciser la provenance et la portée des atmosphériques. La base Lausanne-Zurich, de 170 km, correspondant à un décalage du lever de 8 minutes à l'équinoxe et de 4 minutes au solstice, est amplement suffisante pour reconnaître la nature lointaine ou locale des atmosphériques utilisés pendant le passage des anneaux crépusculaires, pour le sondage de l'atmosphère [2].

[1] Jean LUGEON, Un procédé pour déterminer à grande distance la position géographique et la vitesse de certaines dicsontinuités ou perturbations météorologiques à l'aide des atmosphériques qu'elles émettent. *C. R.*, t. 188, p. 1690, Paris, 1929. Voir aussi: La genèse des orages de chaleur et leur prévision à l'aide des atmosphériques. *C. R.*, t. 189, p. 363, Paris, 1929.

[2] La comparaison des diagrammes de Lausanne et Zurich obtenus avec des cylindres et des enregistreurs identiques, pour les mois de juin à août 1929, où la couche d'inversion anticyclonique dépasse

Ayant ainsi classé les atmosphériques par leur portée, on remarquera qu'il se peut parfaitement, dans des conditions météorologiques déterminées, que les atmosphériques dits locaux, qui prennent naissance sur la couche d'inversion, sur la surface de subsidence des fronts en général ou plus spécialement des discontinuités où l'air froid est actif, atteignent subitement, mais pour une courte durée, des portées considérables, au moment précis où les rayons rasants du soleil, en frôlant les

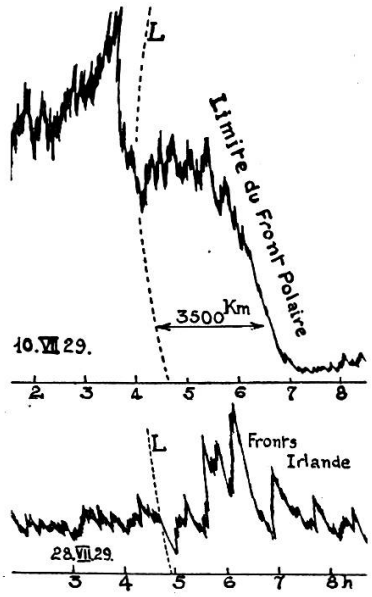

Fig. 6.

foyers, y créent des décharges quasi-supplémentaires, en activant les échanges électriques, par effet photoélectrique. On expliquerait de la sorte les pointes qui se produisent simultanément à Zurich, Lausanne et Paris après le lever du soleil, et qui correspondent presque toujours en longitude, d'après la méthode de calcul préconisée, au passage de l'anneau crépusculaire sur des fronts situés sur l'Angleterre ou l'Océan (fig. 6).

Ces propriétés des atmosphériques crépusculaires permettent en résumé de situer non seulement la longitude des foyers dont

l'altitude de 2000 m et reste faible, montre que dans le 10 % seulement des cas on a affaire à des parasites locaux, dont la portée est inférieure à la longueur de la base, 170 km. Par contre, entre Paris et Zurich, distants de 500 km, la proportion des désaccords s'élève à 30 %, pour les 2000 heures d'enregistrements comparés.

ils sont solidaires, mais également la latitude, avec un seul cadre, sans recoupement radiogoniométrique, en observant l'azimut au moment du maximum occasionné par le passage des rayons solaires. Je me suis appliqué à faire ces observations à l'ouïe à l'aide de la méthode bien connue du zéro d'un cadre compensé. Dans une trentaine de journées, les positions géographiques ainsi obtenues ont coïncidé rigoureusement avec le front polaire ou ses dérivés, dessinés sur la carte synoptique de l'hémisphère nord.

En généralisant ces notions nouvelles à tout un hémisphère, il est facile de prévoir que la variation journalière normale des atmosphériques émis par un foyer lointain est essentiellement dépendante de sa latitude et de celle du poste récepteur, qu'elle est en outre conditionnée par la position astronomique du soleil. Il est donc possible d'en calculer d'avance la forme théorique à l'aide d'un graphique donnant l'heure du coucher et du lever du soleil en fonction de la longitude et de la latitude. Si l'on dispose des courbes d'enregistrement tracées par deux enregistreurs, sans dispositif radiogoniométrique, situés à une distance suffisante — supérieure à 600 km, par exemple — il sera facile de repérer les foyers, à quelques degrés géographiques près, avec ledit graphique.

Critique et extension de la méthode.

Je me suis borné à ne tracer ici que les grandes lignes de cette nouvelle méthode qui demande à être étudiée dans tous ses détails, car elle n'est certainement pas applicable aux très nombreuses possibilités qui se présentent dans la nature. Il ne faut pas se leurrer: des années d'enregistrements sont nécessaires pour en démontrer la vérité. Les « anneaux crépusculaires » enregistrés sont fréquemment faussés par la superposition des décharges orageuses trop rapprochées, ils sont altérés aussi par des écrans électrisés en altitude, renforcés par les anticyclones[1], déformés par des variations météorologiques brusques,

[1] Jean Lugeon, Propagation et réfraction des atmosphériques dans la troposphère. *Association française pour l'Avancement des Sciences, Congrès du Havre*, juillet 1929.

comme la chute du vent, etc. Vu la multiplicité des causes auxquelles sont liés les parasites, on en comprendra d'autant mieux la difficulté d'un classement rationnel.

Le type d'appareil utilisé demande d'ailleurs à être perfectionné et simplifié; la théorie en est mal connue. Mais la première question à résoudre au point de vue géophysique est celle de l'extinction des parasites à l'aurore, indépendamment des variations du champ électromagnétique[1]. Cette extinction est variable selon le type d'amplificateur et selon la longueur d'onde sur laquelle il est accordé.

J'ai fait pendant les premiers mois de l'année 1929 des enregistrements simultanés sur 29 m et 10000 m de longueur d'onde avec deux appareils en tous points identiques et j'ai pu constater une opposition de phase qui se résume ainsi: en règle générale les maxima de la fréquence par minute des parasites sur 29 m correspondent aux minima sur 10000 m, pendant le passage de l'anneau crépusculaire. La courbe des parasites sur courtes longueur d'onde se termine au lever du soleil par un maximum dont l'axe coïncide généralement avec cet instant précis, à l'inverse donc des parasites sur grande longueur d'onde dont le dernier maximum nocturne se produit notablement avant le passage du soleil à l'horizon (fig. 7 et 8).

Cette constatation est d'une importance primordiale pour la démonstration expérimentale de la méthode de sondage des

[1] On peut se faire une image du phénomène d'extinction des parasites au passage de l'anneau crépusculaire, avec le type d'appareil utilisé, en assimilant leur foyer d'émission à un front de bataille où les armes de tous calibres bombarderaient sans aucun ordre le zénith de « balles hertziennes ». Les plus petites comme les plus grosses, respectivement les trains parasites les plus faibles comme les plus intenses, sont enregistrées une à une pendant l'obscurité complète, par un basculage du relais.A l'aurore, les rayons du soleil en descendant du zénith vers la terre absorbent successivement et progressivement ces balles en commençant par les petites pour arriver finalement aux grosses, lorsqu'ils atteignent le sol. Ainsi, la fréquence des basculages du relais diminuerait progressivement aussi, puisque le nombre des balles ou plutôt leur énergie tomberait en fin de compte au-dessous de la sensibilité limite du relais. Comme les ordonnées du diagramme sont proportionnelles à la fréquence du relais, la courbe s'approche donc progressivement des abscisses au lever du soleil.

hautes couches. En effet, j'ai dit plus haut que l'angle de réflexion des ondes sur la couche de Heaviside était d'autant plus grand que la longueur était plus petite. Or, si l'on calcule cet angle θ, d'après la différence des temps entre la production du dernier maximum nocturne sur grande et sur courte longueur d'onde, on trouve précisément qu'il correspond à l'instant où les rayons rasants du soleil entrent en contact avec la couche de Heaviside à l'endroit où a lieu la dernière réflexion de l'onde courte émise par un foyer très lointain à l'ouest du récepteur (point Ω, fig. 1). Et, chose encore plus instructive, cet angle θ correspond sensiblement à celui de la formule précitée de Mesny.

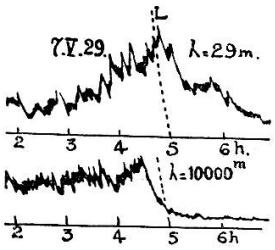

Fig. 7.

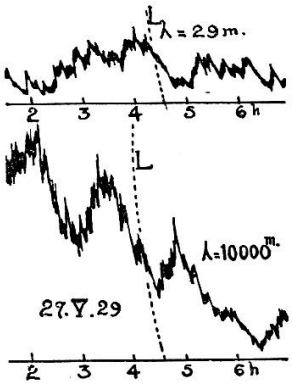

Fig. 8.

Ce serait donc bien là une confirmation de la méthode, à la condition toutefois qu'on justifiât l'hypothèse que les parasites considérés sur ces deux longueurs d'onde sont émis simultanément par le même foyer. On m'a objecté que cet antagonisme entre les maxima et minima enregistrés sur ces deux bandes de longueurs d'ondes provenait du fonctionnement des enregistreurs eux-mêmes, et que j'obtenais à la fois les mêmes parasites, mais dans des parties différentes de leur spectre de fréquences. Des observations minutieuses au tube de Braun, selon la méthode de Waston Watt, m'ont prouvé qu'il n'y avait pas lieu de tenir compte de cette objection, au moins pendant le passage de l'anneau crépusculaire. Les trains de parasites ne sont pas les mêmes, dans la plupart des cas.

A supposer, alors, que les calculs précédents soient conformes à la réalité, on en pourra déduire l'inclinaison de la couche de

Heaviside ou mieux dit son excentricité par rapport à la terre au moment de l'aurore. Car on sait que cette couche est soumise à une véritable marée journalière dont l'amplitude, d'après mes calculs, vaudrait au moins 60 kilomètres. Ce procédé de calcul implique, bien entendu, que le rayon utile de la « sphère » de Heaviside est indépendant de la longueur d'onde, ce qui, d'après d'autres calculs, ne semble pas être tout à fait exact.

Au niveau des aurores polaires.

S'il est vrai que la couche de Heaviside se laisse traverser par les ondes hertziennes à certains moments de la journée, selon les hypothèses de Störmer pour expliquer l'écho, la méthode de sondage préconisée doit pouvoir être mise à profit,

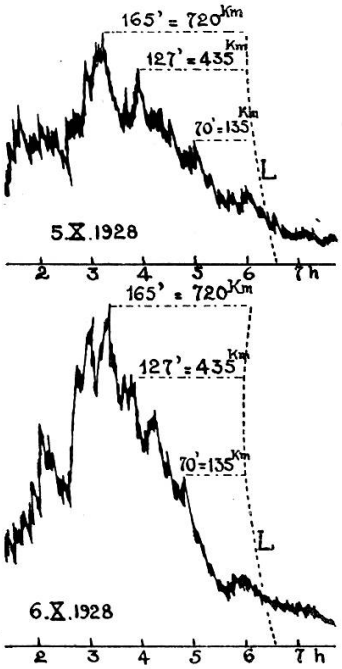

Fig. 9.

aussi, pour l'étude des régions situées entre 100 kilomètres et la limite supérieure qu'atteignent les rayons solaires tangents à la terre, au zénith du récepteur à minuit vrai (370 km le 21 juin, 9326 km le 23 décembre, à Zurich).

Dans l'incertitude où nous sommes sur la composition électronique de ces hautes zones, je ne pousserai pas davantage mes investigations. Je me bornerai à citer le fait remarquable que les diagrammes des parasites des anneaux crépusculaires d'une série de journées consécutives ont souvent des formes semblables: les maxima se produisant jour après jour à quelques secondes près au même moment, compté depuis l'heure du lever. Ce phénomène se répète fréquemment lorsque les rayons rasant se déplacent entre les altitudes de 750 et 150 km (fig. 9). Je l'ai observé par des situations météorologiques très changeantes; d'où l'on peut conclure qu'il est bien indépendant de ce qui se passe dans la troposphère. Peut-être l'effet photoélectrique des rayons solaires produit-il aussi des parasites, au delà de la couche de Heaviside ? Cette hypothèse très discutée demanderait, pour être étayée, des enregistrements au voisinage du cercle polaire et leur comparaison avec la formation des aurores au zénith du récepteur. Et même si l'existence des « parasites cosmiques » était mise en doute par des arguments péremptoires, le principe de la méthode de sondage ne serait pas nécessairement faux; la haute région considérée, composée d'une série de couches ionisées concentriques, jouerait autant de fois le même rôle que la couche de Heaviside. Il y à là matière à faire bien d'autres hypothèses, hélas toutes quelque peu fantaisistes, avant qu'il ne nous soit donné de pénétrer avec les instruments nécessaires dans l'ionosphère.