

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 79 (1953)
Heft: 9-10: École polytechnique de l'Université de Lausanne: publication du centenaire 1853-1953, fasc. no 1

Artikel: Ondes ultra-courtes et météorologie
Autor: Dufour, Jean
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-59752>

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: 03.07.2025

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

Coût de l'éclairage par fluorescence

On peut se demander si la fluorescence ne fait pas payer trop cher les avantages qu'elle procure. Il est certain qu'un appareil fluorescent coûte plus cher (environ deux fois plus) qu'un appareil incandescent de même flux. Mais il faut noter que cette différence modifie relativement peu le devis total d'une installation neuve à câbles souterrains, le prix de l'appareil ne représentant qu'une petite partie de la dépense totale. Preuve en est que plusieurs villes sinistrées de Normandie, de Picardie et du nord de la France ont reconstitué leur dispositif d'éclairage public avec des appareils fluorescents.

Les frais d'entretien, en fluorescence, sont légèrement plus élevés qu'en incandescence, chaque appareil com-

prenant plusieurs lampes. Cependant, la vie moyenne d'une lampe fluorescente est au moins quatre fois plus longue que celle d'une lampe à incandescence. Ceci explique que, malgré les remplacements éventuels de starters, les frais d'entretien sont, en gros, les mêmes que ceux de l'incandescence.

Reste la question consommation de courant. La fluorescence permet d'effectuer sur ce poste une économie massive; à Paris elle est d'au moins 60 % (à flux lumineux égal). Il va de soi que le montant de l'économie varie selon le prix du courant. Mais quel que soit ce prix et compte tenu des dépenses d'entretien et de l'amortissement des candélabres et appareils, l'éclairage public par fluorescence est plus économique que l'éclairage par incandescence.

ONDES ULTRA-COURTES ET MÉTÉOROLOGIE

par JEAN DUFOUR, ingénieur E. P. U. L., Berne

L'utilisation, pendant la dernière guerre, d'ondes de plus en plus courtes pour les besoins militaires et, en particulier, pour les services de détection, a tôt fait apparaître le rôle important que les conditions météorologiques régnant le long de la liaison jouaient sur les conditions de transmission. Les progrès techniques acquis à cette époque et continuellement perfectionnés sont utilisés actuellement sur une grande échelle soit pour la radiodiffusion par ondes ultra-courtes modulées en fréquence (émetteurs FM), soit pour la télévision, soit pour des liaisons commerciales par faisceaux hertziens en ondes métriques, décimétriques ou centimétriques. Toutes ces différentes applications sont en partie limitées dans leurs possibilités par les conditions de propagation des ondes et, en particulier, par les variations d'intensité du signal reçu, variations dues à des effets météorologiques.

De tels effets se présentent aussi pour le cas des ondes moyennes et longues [1], mais les variations qu'ils provoquent sont de moindre amplitude et ont par conséquent moins d'importance; aussi nous bornerons-nous à examiner ici le cas des ondes inférieures à 10 m.

A part certains cas exceptionnels, ces ondes traversent l'ionosphère sans pouvoir être réfléchies par l'une ou l'autre des couches ionisées; on aura donc affaire, à la réception, uniquement à l'onde de sol, et les cas de propagation à très grandes distances, comme on les réalise en ondes courtes (longueur d'ondes de 10 à 100 m), ne se présentent pas. Les ondes inférieures à 10 m se propagent d'une manière analogue aux ondes lumineuses: elles peuvent être réfractées, diffractées, réfléchies et absorbées par le milieu ou par les obstacles se trouvant sur le trajet de propagation. Celui-ci étant essentiellement compris dans les couches inférieures de l'atmosphère, on a le cas de la *propagation troposphérique*.

Nous ne nous attarderons pas ici aux phénomènes de diffraction et de réflexion qui peuvent se traiter

d'une manière analogue à celle utilisée en optique, mais examinerons de plus près les phénomènes de réfraction et dirons deux mots, en terminant, de l'absorption.

Réfraction troposphérique

Si le milieu dans lequel l'onde se propage était homogène, c'est-à-dire si l'indice de réfraction n de l'air était partout le même, le rayon se propagerait en ligne droite. Comme la terre est sphérique, la portée serait limitée à l'horizon géométrique du point d'émission. En réalité, l'indice de réfraction varie d'un point à un autre dépendant des conditions de pression, de température et d'humidité de l'air. Des considérations en partie théoriques et en partie expérimentales donnent pour n la relation suivante utilisée par les météorologues et les physiciens [2]:

$$(1) \quad (n - 1) 10^6 = \frac{79}{T} \left(p - \frac{e}{7} + \frac{4800 e}{T} \right)$$

avec: T = température absolue, en degrés centésimaux

p = pression atmosphérique en millibars

e = pression partielle de la vapeur d'eau en millibars.

Etant donnée la diminution de p et de T avec l'altitude, on voit que n varie également avec la hauteur au-dessus du sol; en général il diminue. Pour une première étude, nous admettrons, par contre, que l'atmosphère est stratifiée parallèlement à la surface de la terre, donc que n est constant quand on se déplace à hauteur fixe.

Dans un milieu où l'indice de réfraction décroît progressivement avec l'altitude, les règles de l'optique nous montrent que le rayon est courbé vers le sol avec une courbure K donnée par la relation:

$$(2) \quad K = - \frac{dn}{dh} \cdot \frac{\sin i}{n}$$

En admettant un angle d'incidence i , voisin de $\frac{\pi}{2}$, ce qui est toujours le cas dans ces problèmes de propagation, et en tenant compte du fait que n est toujours très voisin de 1, la courbure K , par définition égale à l'inverse du rayon de courbure ρ , peut s'écrire

$$(2') \quad K = -\frac{dn}{dh} = \frac{1}{\rho}.$$

Par suite de cette courbure, la portée optique d'un rayon est accrue par rapport à l'horizon géométrique. Comme il n'est toutefois pas pratique de travailler avec un rayon courbé sur une surface courbe également, on introduit une courbure fictive K'_T de la terre telle que la trajectoire du rayon devienne une droite. Pour cela, il suffit de retrancher de la courbure de la terre K_T la courbure du rayon dans l'espace K , d'où

$$(3) \quad K'_T = K_T - K.$$

En faisant correspondre à la courbure K'_T un indice de réfraction fictif N tel que

$$(4) \quad K'_T = \frac{dN}{dh}$$

et en remarquant que la courbure de la terre réelle est égale à $\frac{1}{a}$ où a est le rayon effectif de la terre, l'équation (3) devient

$$(5) \quad \frac{dN}{dh} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh}$$

dont une solution est :

$$(6) \quad N = n + \frac{h}{a}.$$

N est ce qu'on appelle l'indice de réfraction modifié. Comme n est très voisin de 1, à moins d'un millième près, et que, pour les hauteurs entrant en considération, $\frac{h}{a}$ est aussi en général inférieur à $1/1000$, on utilise pour des raisons pratiques le module de réfraction M qui est l'excès de l'indice de réfraction modifié par rapport à l'unité exprimée en millionnièmes.

$$(7) \quad M = \left(n - 1 + \frac{h}{a}\right) 10^6 \text{ exprimé en « unités-}M \text{ »}$$

pour $h = 0$ M varie entre 250 et 500.

Si l'on porte sur un graphique M (en abscisse) en fonction de h (en ordonnée), on obtient la « courbe- M » qui permet de se rendre compte rapidement des propriétés de l'atmosphère quant à la réfraction.

Si $\frac{dM}{dh} = 0$, c'est-à-dire si la courbe a une partie verticale, on a

$$\frac{dn}{dh} + \frac{1}{a} = 0.$$

La courbure du rayon $K = -\frac{dn}{dh}$ est d'après (2') égale à la courbure de la terre $\frac{1}{a}$. On voit donc qu'un rayon partant horizontalement se propagera parallèlement à la terre et pourra atteindre ainsi de très grandes

distances. Si $\frac{dM}{dh} < 0$, donc si le gradient de M est négatif, la courbure du rayon sera plus grande que la courbure de la terre, et le rayon est renvoyé vers la terre ; celle-ci peut le réfléchir à son tour et l'onde se trouve guidée entre le sol et la couche où l'on a $\frac{dM}{dh} < 0$.

On a la formation d'un conduit troposphérique. Dans ce cas, on peut avoir des portées d'émetteurs bien au-delà de l'horizon optique. Un exemple classique est la vision, sur un écran de radar placé à Bombay, des côtes de l'Arabie se trouvant à plus de 2000 km de distance.

Enfin, si $\frac{dM}{dh} > 0$, cas le plus fréquent, on a seulement une courbure plus ou moins grande du rayon, mais toujours plus petite que celle de la terre ; la distance de propagation sera limitée à l'horizon électrique plus ou moins éloigné.

Formation des conduits

On vient de voir que la condition pour qu'un conduit existe est que l'on ait une couche de l'atmosphère avec

$$(8) \quad \frac{dn}{dh} < -\frac{1}{a}$$

donc avec un fort gradient négatif de l'indice de réfraction. Ceci peut provenir d'une rapide diminution de l'humidité ou (et) d'une forte augmentation de la température avec l'altitude. Ce dernier cas est ce que l'on connaît sous le nom d'inversion de température. Les inversions peuvent avoir différentes origines. Un cas fréquent d'inversion est provoqué par le refroidissement nocturne du sol. Par temps clair, le sol s'échauffe le jour sous l'effet du rayonnement solaire ; l'air chauffé à son contact s'élève et tend à accroître la température de tout le volume d'air au-dessus du sol. Dès le coucher du soleil, le sol se refroidit par rayonnement, mais la convection cesse. L'air refroidi au contact du sol étant plus lourd que l'air chaud tend à rester aussi bas que possible, formant ainsi au sol une couche d'air plus froide que les couches plus élevées. La température augmente avec la hauteur à partir du sol ; on a une inversion superficielle. Un cas analogue se présente au voisinage d'une côte quand des masses d'air chaud et sec du continent arrivent sur une mer froide. Les couches inférieures voisines de l'eau deviennent plus froides et plus humides que les couches élevées. Dans ces deux cas on peut avoir formation de conduits de surface ; ils sont en général peu épais, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Les inversions dues au refroidissement nocturne ont une périodicité journalière ; celles dues aux masses d'air chaud peuvent être stables pendant plusieurs jours si les conditions météorologiques ne changent pas.

Il peut se produire aussi des conduits élevés, en particulier lors de passages de fronts, quand des masses d'air de température et d'humidité différentes glissent l'une sur l'autre sans se mélanger. L'air chaud, et en général plus sec, étant plus léger se trouvera au-dessus de l'air froid, d'où inversion de température.

Dans le cas des fronts, on n'a pas non plus toujours une stratification horizontale ; le long du sol l'indice de réfraction peut changer et l'on peut s'attendre à avoir

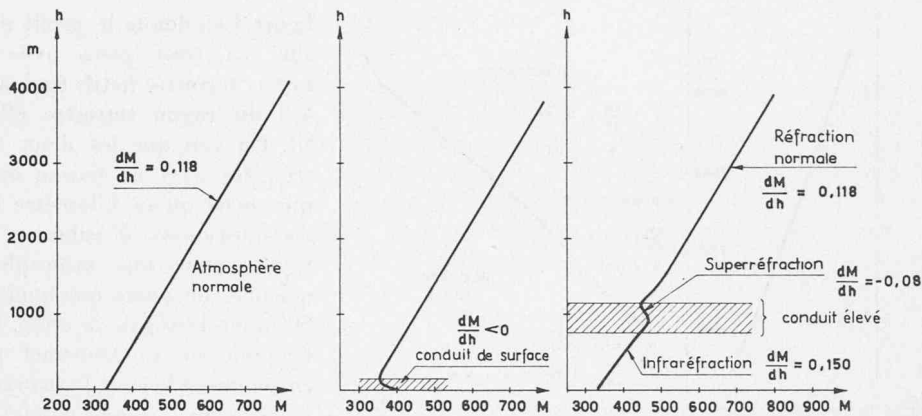


Fig. 1.
Quelques types de courbes-M.

A gauche pour l'atmosphère « normale », au milieu avec un « conduit de surface », à droite avec un « conduit élevé ».

également des déviations du rayon dans un plan horizontal.

La figure 1 donne trois exemples de courbe-M : avec une atmosphère normale, avec un conduit de surface et avec un conduit élevé. On admet que le conduit est limité à sa partie supérieure par la hauteur à laquelle M passe par un minimum et à sa partie inférieure soit par le sol soit par la hauteur à laquelle M reprend la même valeur qu'à la limite supérieure du conduit. Ces discontinuités de la courbe-M sont plus ou moins brutales et peuvent produire des conduits plus ou moins épais. Comme dans le cas des guides d'ondes métalliques, la longueur d'onde transmissible est liée à la dimension du conduit ; une épaisseur minimum de celui-ci est nécessaire pour la réflexion d'une longueur d'onde donnée et cette épaisseur sera d'autant plus grande que l'onde sera longue ; les cas de *guidage* seront donc d'autant plus fréquents que les ondes seront courtes.

Quelques valeurs numériques

Un grand nombre de mesures faites en différents points, principalement des régions tempérées, ont donné en moyenne une décroissance sensiblement linéaire de n avec l'altitude selon la loi :

$$(9) \quad \frac{dn}{dh} = -0,039 \cdot 10^{-6}$$

qui correspond à une diminution de la température de $0,65^\circ \text{C}$ par 100 m et à une humidité relative de 60 % constante avec l'altitude. En admettant comme rayon moyen de la terre la distance $a = 6370 \text{ km}$, on obtient d'après (5) et (7)

$$(10) \quad \frac{dM}{dh} = 0,118 \quad \text{Unités-M/m.}$$

Cette valeur est définie comme le *gradient normal* du module de réfraction [3], et une atmosphère présentant ce gradient est appelée *atmosphère normale*. Si $dM/dh > 0,118$, on a de l'infraréfraction ; si $dM/dh < 0,118$, on a de la superréfraction.

A titre d'exemple, la figure 2 donne, sous la forme d'une courbe de fréquences cumulées, la répartition dans le temps de la différence du module de réfraction M entre le Chasseron, 1590 m, et Neuchâtel, 487 m. La statistique s'étend sur une période de 16 mois avec trois mesures par jour à 8, 14 et 22 heures. En ordonnée se trouve la valeur du gradient et en abscisse le pourcen-

tage du temps pendant lequel cette valeur est atteinte ou dépassée. On trouve une valeur médiane de 0,1185 unités-M/m en très bonne concordance avec la valeur donnée en (10). En hiver, cette valeur médiane monte à 0,122 ; en été elle est un peu plus faible : 0,114. Pour 98 % du temps dM/dh est compris entre 0,087 et 0,135. Il faut remarquer toutefois que ces résultats se rapportent à une couche de 1100 m d'épaisseur et que les gradients locaux peuvent être plus importants. Des mesures analogues pour d'autres paires de station, Rigi-Zurich, Jungfraujoch-Berne, donnent des résultats semblables [4].

Pour déterminer les gradients locaux, il faudrait posséder un grand nombre d'observations météorologiques simultanées aux différentes hauteurs ; on peut les obtenir en partie par les radio-sondages de l'atmosphère. Un radio-sondage, qui sera prochainement doublé, est fait journellement depuis la station aérologique de Payerne. La figure 3 donne un exemple d'une courbe-M obtenue par le radio-sondage du 16 juin 1952. On y a reporté les valeurs t , e , $p = f(h)$ et la courbe-M correspondante. On voit que, par suite de la rapide diminution de l'humidité entre le sol et 1050 m, on a dans cette couche de la superréfraction. En revanche, entre 1400 et 2500 m, on a l'atmosphère normale. La superréfraction

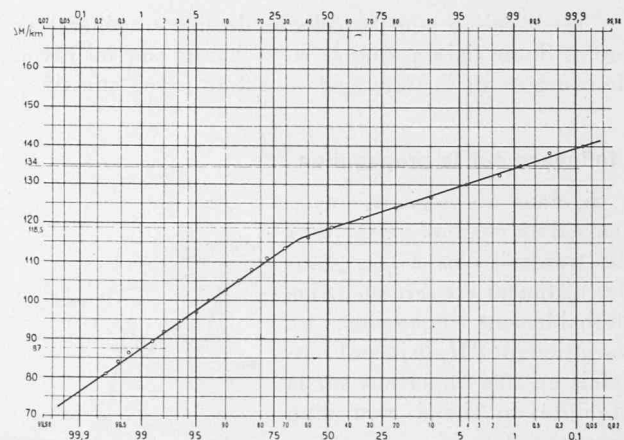


Fig. 2. — Courbe de fréquences cumulées du gradient moyen du module de réfraction mesuré entre le Chasseron (1590 m) et Neuchâtel (487 m). L'abscisse donne, en pourcentage du nombre total d'observations, le nombre de mesures où le gradient dépasse la valeur portée en ordonnée.

Période de juin 1947 à septembre 1948.

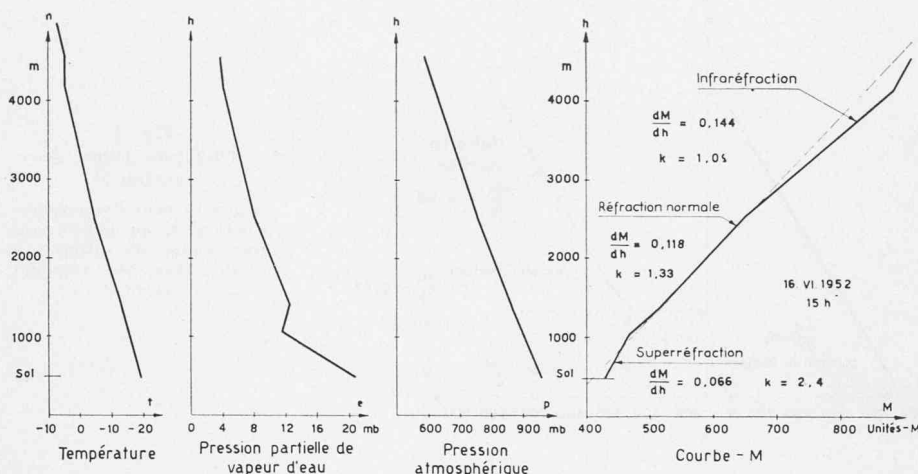


Fig. 3. — Exemple d'une courbe-M donnée par le radio-sondage de Payerne, le 16 juin 1952. On note une superréfraction assez marquée jusqu'à 1000 m de hauteur.

ci-dessus augmentera un peu la portée de l'émetteur, mais on est encore loin des conditions de formation d'un conduit.

D'après la relation (4), la valeur $\frac{dN}{dh}$ ou $\frac{dM}{dh} \cdot 10^{-6}$ est égale à la courbure K'_T d'une terre fictive au-dessus de laquelle les rayons se propageraient en ligne droite. L'inverse de cette valeur est égal au rayon ρ' de cette terre fictive. On a l'habitude de l'exprimer en proportion du rayon réel de la terre :

$$(11) \quad \frac{1}{K'_T} = \frac{1}{\frac{dN}{dh}} = \rho' = ka.$$

Si le gradient du module de réfraction varie, on pourra considérer que la propagation se fait toujours en ligne droite mais sur une terre dont le rayon ka varie. Pour l'atmosphère normale on a :

$$ka = \frac{1}{0,118 \cdot 10^{-6}} = 8500 \text{ km}$$

$$k = \frac{8500}{6370} \approx \frac{4}{3}.$$

C'est la raison pour laquelle on dessine en général les profils d'une liaison étudiée en se basant sur un rayon de courbure de la terre égal au $4/3$ du rayon effectif.

Influence sur la propagation

Si, dans nos régions, l'existence d'un conduit permettant des transmissions à très grandes distances est rare ou même probablement impossible, les variations de dM/dh jouent toutefois un rôle important sur la stabilité du signal reçu d'un émetteur donné.

Prenons à titre d'exemple la liaison Genève-Chasseral, premier tronçon du câble hertzien Genève-Zurich avec relais au Chasseral et à l'Uetliberg. La

figure 4 en donne le profil dessiné en trait plein avec le rayon terrestre fictif égal aux $4/3$ du rayon terrestre effectif. On voit que les deux extrémités sont en liaison optique mais qu'au kilomètre 83, au nord-ouest d'Aubonne, le rayon pour une atmosphère normale ne passe que quelque 80 m au-dessus de la crête. Or, l'énergie ne se transmet pas entièrement le long de ce rayon, mais la plus grande partie est contenue dans l'ellipsoïde de Fresnel ayant ce rayon comme axe. Si la première zone de Fresnel est entièrement dégagée, on a une transmission sensible-

ment sans perte, correspondant à peu près à la propagation dans l'espace libre ; mais plus les obstacles se trouvant sur le trajet obstrueront cette zone, plus l'intensité du champ diminuera. Le rayon de la première zone de Fresnel r_1 , à une distance d_1 d'une extrémité de la liaison, la distance à l'autre extrémité étant d_2 , est donné par la relation

$$(12) \quad r_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

dans notre cas pour une longueur d'onde de 96 cm : $r_1 = 165 \text{ m}$.

La figure 5 donne, dans sa partie inférieure, la variation du champ médian E_m (valeur dépassée pendant 1 heure pour chaque période de 2 heures) à Genève, d'un émetteur situé au Chasseral et travaillant sur 313 Mc/s les 26 et 27 juin 1947, ainsi que la valeur de k obtenue à partir de la différence des modules de réfraction mesurés au Chasseral et à Genève. On voit la bonne corrélation qui existe dans ce cas. La partie supérieure de la figure 5 représente une coupe de l'ellipsoïde avec le profil transversal du sol, au kilomètre 83 où le rayon est le plus proche du sol. Le cercle de droite représente la situation à 19 heures quand la réfraction est la plus faible, celui de gauche à 22 heures pour $k = 1,7$ ou $dM/dh = 0,092$, donc quand la réfraction est plus forte

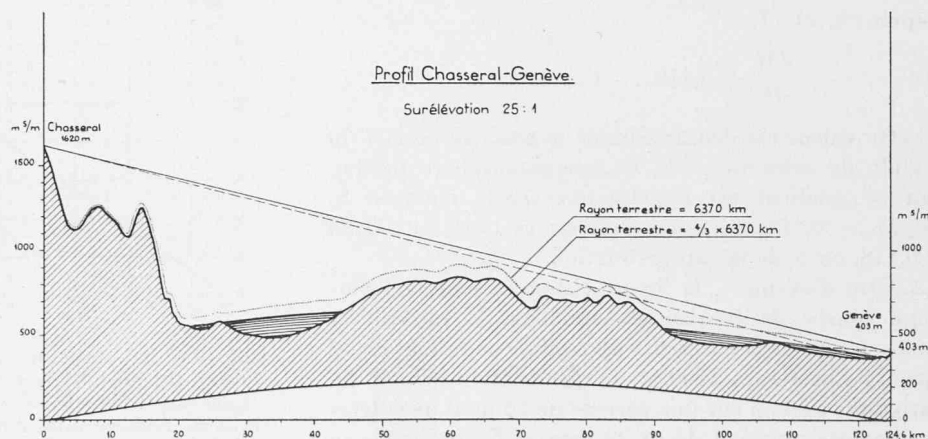


Fig. 4. — Profil de la liaison Chasseral-Genève (poste du Mont-Blanc).

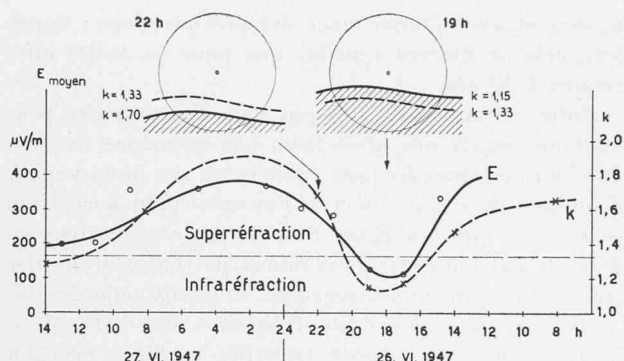


Fig. 5. — Variations du champ et de la réfraction atmosphérique.

E Champ moyen, à Genève, d'un émetteur de 313 Mc/s placé au Chasseral.

k Rapport du rayon apparent de la terre à son rayon réel, d'après les modules de réfraction mesurés au Chasseron et à Genève. En haut: Coupe de l'ellipsoïde de Fresnel et position relative du sol pour différentes valeurs de *k*, à une distance de 83 km du Chasseral.

que normale. On voit bien comme les variations de champ correspondent à l'obstruction plus ou moins grande de l'ellipsoïde. Notons encore que quand *k* prend la valeur normale des 4/3, on trouve sur la figure 5 des champs de 210-240 $\mu\text{V/m}$, et l'analyse statistique des enregistrements faits pendant près de deux ans donnait un champ médian de 230 $\mu\text{V/m}$ [4].

Il n'y avait malheureusement pas de sondage ce jour-là, mais c'était une belle journée particulièrement chaude et avec très faible humidité relative en fin d'après-midi.

L'exemple ci-dessus est un cas extrême ; les variations ne sont en général pas si prononcées, au moins pour les distances qui se présentent en Suisse. Il est clair que ces variations dépendent du profil de la liaison et de la longueur d'onde ; elles se produisent lentement.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que le rayon direct émetteur-récepteur. En réalité le signal reçu en un point est la somme vectorielle du champ du rayon direct et du champ d'un ou plusieurs rayons réfléchis par le sol ou les montagnes environnantes. Par suite du chemin plus grand qu'il a à parcourir, le rayon réfléchi est déphasé par rapport au rayon direct, la phase tournant de 360° pour chaque longueur d'onde de différence des chemins. Or, de faibles variations du rayon de courbure des rayons sur une distance d'une centaine de kilomètres suffisent à produire des différences d'une demi-longueur d'onde. L'amplitude des variations du champ dépend de la différence d'intensité des deux rayons. Dans le cas d'une antenne de réception peu élevée au-dessus du sol, la réflexion se fait non loin de l'antenne ; si les conditions de réflexion au sol sont bonnes, le rayon réfléchi arrive sensiblement avec la même intensité que le rayon direct et le champ résultant peut tomber à zéro. Ce cas se présente à Genève pour la liaison ci-dessus, la réflexion se faisant sur le lac.

La figure 6 donne le détail de l'enregistrement du 26 juin 1947 entre 15 et 22 heures. A la variation moyenne reportée sur la figure 5 se superposent des variations plus rapides dues aux interférences du rayon direct et du rayon réfléchi. On voit que le champ peut tomber momentanément à près de 12 $\mu\text{V/m}$ soit 26 dB

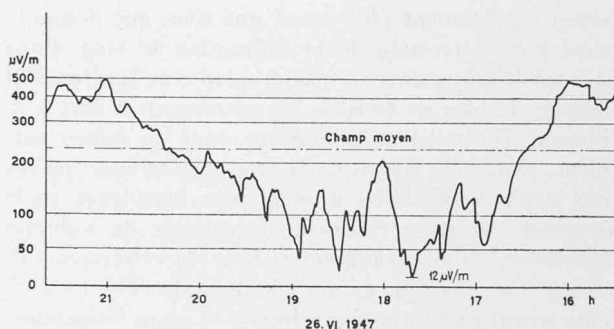


Fig. 6. — Détail d'enregistrement du champ sur 313 Mc/s, à Genève.

au-dessous de sa valeur moyenne. Si l'on cherche à augmenter la stabilité d'une liaison, il y aura intérêt à choisir les emplacements des stations terminales de manière qu'une telle réflexion ne soit pas favorisée.

Pour donner une idée de l'ordre de grandeur et de la probabilité de ces variations, nous avons reporté sur la figure 7 les courbes de fréquences cumulées des champs minimums, moyens et maximums observés sur cette liaison pour chaque période de deux heures de juin 1947 à mai 1949, en décibels par rapport au champ dans l'espace libre.

Les observations montrent que les grandes variations de champ se produisent surtout par temps beau et calme ; c'est évidemment ainsi que les conditions pour l'établissement d'une stratification sont les plus favorables. Par temps de pluie et de vent, la troposphère est agitée et par conséquent plus homogène ; la propagation est plus stable.

Diffusion par la turbulence atmosphérique

Nous avons examiné ci-dessus le cas d'une troposphère stratifiée ; ce cas spécial ne permet pas d'expliquer toutes les observations que l'on fait sur le comportement du champ. En particulier, on mesure à une grande distance au-delà de l'horizon optique un champ

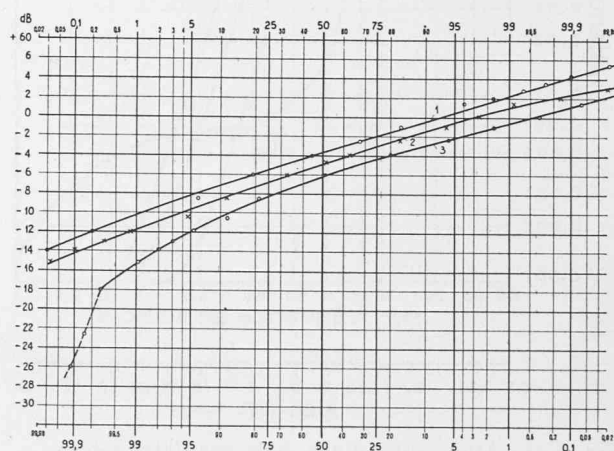


Fig. 7. — Courbes de fréquences cumulées des champs mesurés à Genève de juin 1947 à mai 1949. L'abscisse donne le pourcentage des observations où les champs maximums (1), moyens (2) et minimums (3), pour chaque période de deux heures, dépassent la valeur portée en ordonnée.

moyen notablement plus grand que celui que donne le calcul par la formule de la diffraction le long d'une terre sphérique, même en tenant compte de la réfraction normale. Booker et Gordon [5] attribuent ce fait à la diffusion des ondes se produisant dans un milieu turbulent. Dans une région de la troposphère assez élevée pour avoir la visibilité directe avec l'émetteur et le récepteur, on peut concevoir l'existence de volumes élémentaires d'air ayant des indices de réfraction différents. Par chacune de ces « bulles », les rayons incidents seront plus ou moins réfractés et, dans l'ensemble, on aura une diffusion de l'énergie dans les différentes directions, et en particulier vers le sol, ce qui expliquerait les valeurs de champ observées.

Absorption des ondes par l'atmosphère

Disons encore pour terminer deux mots de l'affaiblissement que subissent les ondes dans l'atmosphère. On vient de voir qu'une onde était « diffusée » par des irrégularités de l'air, ces irrégularités peuvent être des volumes d'air, mais aussi par exemple des gouttes de pluie ; dans le sens de propagation l'énergie transmise sera donc réduite. Cette réduction croît avec la fré-

quence et avec l'importance des précipitations ; toutefois, cela ne devient sensible que pour les ondes inférieures à 10 cm.

Enfin, certains gaz contenus dans l'atmosphère peuvent provoquer une absorption par résonance moléculaire sur certaines fréquences ; c'est le cas de la vapeur d'eau pour $\lambda = 1,25$ cm et de l'oxygène pour $\lambda = 5$ mm et $\lambda = 2,5$ mm. La figure 8 donne les atténuations en décibels par kilomètre provoquées par l'absorption des gaz et par des précipitations plus ou moins violentes [6].

On voit que pour une fréquence de 4000 Mc/s, $\lambda = 7,5$ cm, sur laquelle travaille le câble hertzien d'expérimentation Berne-Chasseral-Genève, on peut s'attendre pour le trajet Chasseral-Genève (125 km) et pour une pluie moyenne de 20 mm/heure à un affaiblissement de près de 2 dB. Ce n'est, dans ce cas, pas considérable, mais ces pertes mettent une limite à l'emploi d'ondes de plus en plus courtes pour certains services. Pour les radars, en particulier, on aurait intérêt à diminuer la longueur d'onde le plus possible pour augmenter la finesse d'analyse ; mais les précipitations peuvent alors plus facilement « boucher » la vue, comme c'est le cas pour les ondes optiques dont on se rapproche ainsi de plus en plus.

Conclusions

Nous n'avons pu aborder ici que quelques-unes des relations qui existent entre la météorologie et la radio-électricité, leur mécanisme et leur influence. Du fait qu'actuellement les observations météorologiques à disposition pour un instant donné sont relativement restreintes, il est difficile d'expliquer ou de prévoir chaque cas de propagation observé, d'autant plus qu'une masse d'autres facteurs interviennent. On arrive toutefois, grâce aux nombreuses mesures déjà effectuées et à l'aide de méthodes statistiques, à prédéterminer avec une certaine approximation les conditions à attendre sur une liaison donnée.

Si la connaissance de ces phénomènes est utile ou même nécessaire aux radioélectriciens, elle l'est tout autant aux météorologues, auxquels elle ouvre de nouveaux moyens d'investigation des conditions régnant dans la basse atmosphère.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. GERBER et A. WERTHMÜLLER, Bern : *Über die vegetabile Absorption der Bodenswelle*. Bull. tech. PTT XXIII : 1945, n° 1, p. 12 et suivantes.
- [2] *Meteorological Factors in Radio Wave Propagation*. Report of a Conference held on 8 April 1946 by the Physical Society and the Royal Meteorological Society, London. Edité par The Physical Society.
- [3] Comité consultatif international des Radiocommunications (C. C. I. R.). — Documents de la VI^e Assemblée plénière, Genève, 1951. Volume 1, Avis n° 54.
- [4] J. DUFOUR : *Quelques observations sur la propagation des ondes décimétriques en Suisse*. Bull. techn. PTT, XXVIII, nov. 1950, p. 417-422.
- [5] H. G. BOOKER et W. E. GORDON : *A Theory of radio scattering in the troposphere*. Proc. IRE 38, 1950, p. 401.
- [6] Summary technical report of the National Defense Research Committee (NDCR). Vol. 1, 1946, Washington, p. 90.

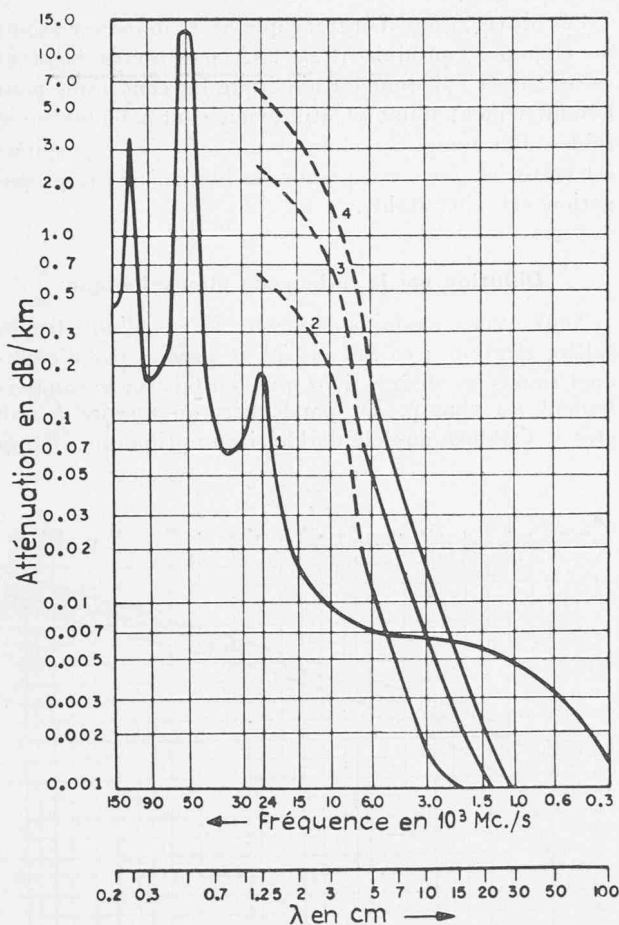


Fig. 8. — Atténuation d'une onde par l'atmosphère, en fonction de la fréquence.

1. Absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau ensemble ($p = 760$ mm, $t = 20^\circ$ C, vapeur d'eau = $7,5$ g/m³, d'après Van Vleck).
2. Pluie modérée : 6 mm/h.
3. Forte pluie : 22 mm/h.
4. Pluie orageuse : 43 mm/h.