

RAPPORT 229-6

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DU SOL

(Question 1/5)

(1959-1963-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

Ce Rapport analyse les facteurs physiques dont dépendent les caractéristiques électriques du sol. Le Rapport 879 traite des méthodes employées pour évaluer et déterminer la valeur de ces caractéristiques électriques en relation avec le calcul de la propagation radioélectrique.

2. Les caractéristiques du sol

Les caractéristiques électriques de tout milieu peuvent s'exprimer par trois paramètres, qui sont la perméabilité, μ , la permittivité, ϵ et la conductivité, σ . Ces trois paramètres influent sur la propagation des ondes conformément à l'expression suivante, qui donne le coefficient de propagation k :

$$k = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = j\omega \sqrt{\mu \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} \quad (1)$$

la dépendance de temps $\exp(j\omega t)$ étant sous-entendue.

La perméabilité du sol, μ , peut normalement être considérée comme égale à la perméabilité en espace libre, de sorte que, dans la plupart des problèmes de propagation, il suffit de connaître la permittivité, ϵ , et la conductivité, σ . Lorsqu'on se réfère au sol, le coefficient de propagation peut être décrit comme suit:

$$k = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - j60 \sigma \lambda} \quad (2)$$

où ϵ_r est la permittivité relative, σ est en S/m et λ est la longueur d'onde en espace libre, en m.

On peut noter que les densités des courants de déplacement et de conduction sont, entre elles, dans le rapport de ϵ_r à $60 \sigma \lambda$, ce qui permet de juger de leur importance relative. On constate qu'aux fréquences supérieures à 100 MHz, il faut tenir compte de la variation de la permittivité et de la conductivité en fonction de la fréquence (dipolaire et ionique) [Saxton et Lane, 1952]. On notera, en outre, que l'on a souvent utilisé une valeur de 80 pour la permittivité relative de l'eau de mer aux basses températures et aux fréquences inférieures à environ 1 GHz. La valeur réelle, même pour des fréquences relativement basses, dépend de la température et de la composition de l'eau de mer.

La Recommandation 527 donne pour différents types de sol, des valeurs représentatives de la conductivité et de la permittivité, en fonction de la fréquence. Ces valeurs, souvent qualifiées de valeurs intrinsèques, se rapportent à la structure homogène du sol au-dessous de la surface et peuvent être déterminées par des mesures en laboratoire d'échantillons des sols. Elles coïncident généralement avec les valeurs obtenues par d'autres mesures de l'impédance de la surface dans le cas de structures homogènes du sous-sol.

Toutefois, la structure du sous-sol est rarement homogène; elle se compose plutôt de deux ou de plusieurs couches d'épaisseurs différentes, ayant des conductivités et des permittivités différentes. C'est un fait dont il faut tenir compte, ce que l'on obtient en introduisant la notion de paramètres équivalents. Cette notion permet d'appliquer les courbes de propagation de l'onde de sol pour une terre lisse et homogène de la Recommandation 368, le sous-sol hétérogène étant remplacé par une structure homogène équivalente dont les paramètres sont la conductivité et la permittivité équivalentes. Il est possible de déterminer ces paramètres si l'on connaît la valeur des paramètres pour chaque couche. Ces valeurs coïncident avec les résultats obtenus par des mesures de l'impédance du sol ou de l'impédance de l'antenne.

Dans certaines bandes de fréquences, pour lesquelles il convient d'étudier d'autres facteurs qui ont une influence sur la propagation de l'onde de sol, tels que les irrégularités du terrain, la couverture végétale, les objets présents à la surface du sol, etc., on peut étendre cette notion en appliquant la méthode de l'affaiblissement de l'onde de sol, ou par des méthodes analytiques.

3. Facteurs influant sur les caractéristiques électriques équivalentes

La valeur équivalente des constantes du sol dépend, non seulement de la nature du sol, mais aussi de sa teneur en humidité et de sa température; les autres facteurs qui interviennent sont la fréquence, la formation géologique générale du terrain, ainsi que la profondeur équivalente de pénétration et l'étalement latéral des ondes.

3.1 *Nature du sol*

De nombreuses mesures ont permis d'établir que la valeur des caractéristiques électriques varie avec la nature du sol; il semble cependant probable que cette variation est due, moins à la composition chimique du sol qu'à ses propriétés d'absorption et de rétention de l'humidité. La conductivité de l'argile est normalement de l'ordre de 10^{-2} S/m; or, on a pu montrer que, pour l'argile séchée, la conductivité peut descendre jusqu'à 10^{-4} S/m, c'est-à-dire à une valeur du même ordre que celle du granit.

3.2 *Teneur en humidité*

La teneur du sol en humidité est probablement le paramètre qui influe le plus sur la valeur de ses constantes électriques. Des mesures effectuées en laboratoire ont montré que, si l'on fait croître la teneur en humidité à partir d'une valeur faible, les valeurs augmentent rapidement et deviennent maximales pour des teneurs en humidité voisines de celles qu'on rencontre normalement dans les sols réels correspondants. Il semble que, en un lieu donné, l'humidité du sol reste très sensiblement constante toute l'année à des profondeurs égales ou supérieures à 1 m; il peut y avoir une augmentation de cette humidité pendant les chutes de pluie, mais, une fois que la pluie a cessé, l'écoulement des eaux ainsi que l'évaporation en surface ont tôt fait de la ramener à sa valeur normale.

Toutefois, un même sol peut présenter des variations d'humidité considérables d'un lieu à un autre, par suite de différences entre les formations géologiques générales, auxquelles correspond un écoulement plus ou moins rapide des eaux.

3.3 *Température*

Des mesures de laboratoire portant sur les caractéristiques électriques du sol ont montré que, aux basses fréquences, le coefficient de température de la conductivité est de l'ordre de 3% par degré Celsius; tandis qu'il est négligeable dans le cas de la permittivité. Au point de congélation de l'eau, on observe généralement une substantielle diminution de la valeur de la permittivité comme de la conductivité. Bien que les variations dont il s'agit soient appréciables, il convient de se rappeler que la température varie annuellement entre des limites de plus en plus serrées lorsque la profondeur augmente, aussi est-il vraisemblable que la température n'a une influence notable qu'aux fréquences élevées, pour lesquelles la pénétration des ondes est faible (voir le § 3.6), ou encore lorsque le sol est gelé sur une grande profondeur.

La Fig. 1 illustre l'influence de la conductivité [Albrecht, 1963] et de la permittivité relative [Blomquist, 1968] sur la teneur en eau et la température du sol. Il faut souligner que ces variations concernent uniquement les caractéristiques électriques intrinsèques. Les variations des caractéristiques électriques équivalentes dépendent de la mesure dans laquelle ces variations de la teneur en eau et de la température pénètrent dans le sol.

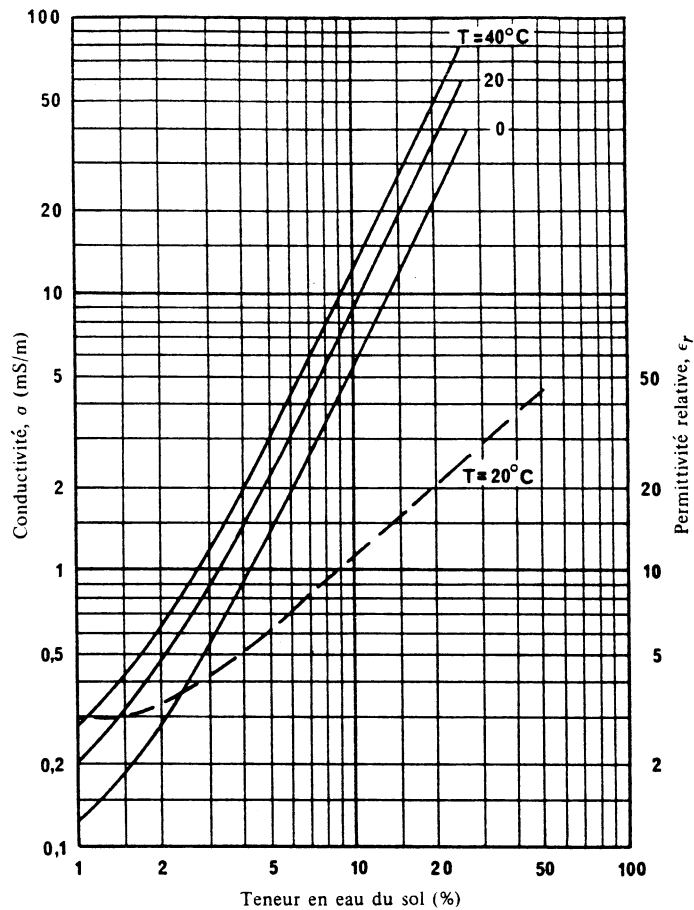


FIGURE 1 – Conductivité intrinsèque et permittivité relative du sol en fonction de la teneur en eau

— Conductivité, σ
 - - - Permittivité relative, ϵ_r

3.4 Variations saisonnières

L'effet des variations saisonnières sur l'affaiblissement de propagation de l'onde de sol dépend du rapport entre la profondeur du sol à laquelle se manifestent de telles variations et la profondeur de pénétration. Un tel effet dépend toujours de la fréquence. Les variations saisonnières observées lors de mesures de phase sur des émissions LORAN-C [Doherty et Johler, 1975] faites à la fréquence 100 kHz ont été interprétées comme dues uniquement à des variations de l'indice de réfraction. Des mesures en ondes hectométriques faites en Inde ont montré que le champ relevé pendant la mousson était presque le même que pendant la saison sèche. Des mesures faites en ondes hectométriques dans la zone tempérée en Finlande [Koskenniemi et Laiho, 1975] n'ont indiqué qu'une variation de champ de 1 à 2 dB entre l'été et l'hiver.

Des radioamateurs [Sevick, 1978] ont effectué aux Etats-Unis des mesures de la conductivité dans les premiers cinquante centimètres du sol, lesquelles font apparaître une variation saisonnière cyclique d'un facteur de deux pour la conductivité au voisinage de la surface du sol. Ces valeurs de conductivité semblent être fonction de la température moyenne du sol, de petites fluctuations étant liées aux précipitations mesurées.

3.5 Fréquence

Des mesures de laboratoire sur des échantillons de sol ont montré que la permittivité et la conductivité sont avec la fréquence dans une relation qui dépend sensiblement de la teneur en humidité du sol. Dans le cas de l'eau douce et de l'eau de mer, on peut se fonder sur les renseignements contenus dans l'ouvrage [Saxton et Lane, 1952] pour calculer les valeurs correspondant à une fréquence quelconque.

3.6 Formation géologique générale

D'une manière générale, les terrains au-dessus desquels s'effectue la propagation ne sont pas homogènes et les caractéristiques électriques équivalentes dépendent donc de plusieurs types de sol différents. C'est pourquoi il est important de connaître exactement la formation géologique d'ensemble de la région qu'on étudie. Dans une zone donnée, ou le long d'un parcours donné, les caractéristiques électriques équivalentes dépendent non seulement de la nature des sols formant la couche superficielle, mais aussi des couches sous-jacentes. Ces dernières peuvent faire partie du milieu que traversent les ondes; elles peuvent avoir encore une influence indirecte, en déterminant le niveau des eaux dans les couches supérieures.

3.7 Absorption de l'énergie par des objets à la surface de la Terre

Les objets se trouvant à la surface de la Terre n'influent pas directement sur la valeur des caractéristiques électriques du sol lui-même, mais ils peuvent participer dans une mesure importante à l'affaiblissement des ondes de sol; on peut tenir compte de ces pertes d'énergie en utilisant, dans les calculs de propagation, des valeurs des caractéristiques électriques modifiées de façon appropriée.

On obtient des valeurs particulièrement élevées de l'affaiblissement linéique lorsque la transmission se fait au-dessus d'un terrain boisé à des fréquences supérieures à environ 30 MHz [Blomquist, 1958; Rice, 1971; Saxton et Lane, 1955; Tamir 1967]. Cet affaiblissement peut être encore plus grand lorsque les arbres sont couverts de neige mouillée ou que leurs feuilles sont mouillées par la pluie. Cette question est traitée plus en détail dans le Rapport 1150.

4. Pénétration et étalement des ondes

4.1 La mesure dans laquelle les couches profondes du sol influent sur la valeur de ses caractéristiques électriques dépend de la profondeur de pénétration de l'énergie radioélectrique, δ , que l'on définit comme celle à laquelle l'intensité de l'onde est affaiblie dans le rapport $1/e$ (soit 37%) de la valeur qu'elle avait à la surface. La Recommandation 527 indique la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence pour différents types de sol et d'eau.

4.2 Si la profondeur de pénétration est inférieure à l'épaisseur de la couche, les couches sous-jacentes ont peu d'influence. Si au contraire la profondeur de pénétration est très supérieure à l'épaisseur de la couche superficielle, la propagation dépend des constantes du sol des couches inférieures. Dans les cas intermédiaires, les caractéristiques électriques équivalentes du sol peuvent se déterminer à l'aide d'une relation théorique [Wait, 1970] et d'un modèle approprié de la structure du sous-sol.

4.3 L'énergie radioélectrique reçue en un point donné ne se propage pas uniquement le long du trajet qui relie directement ce point à l'émetteur, mais également sur un grand nombre de trajets indirects répartis de part et d'autre du précédent. Il faut donc considérer les caractéristiques électriques, non seulement le long du trajet direct lui-même, mais aussi dans tout le domaine où se produit l'étalement latéral des ondes. Il n'est pas possible d'assigner des limites précises à ce domaine; on a cependant émis l'hypothèse qu'il coïncide, en fait, avec la première zone de Fresnel, c'est-à-dire avec l'ellipse dont les foyers sont situés à l'émetteur et au récepteur et dont les axes sont respectivement $(D + \lambda/2)$ et $\sqrt{D\lambda}$, D étant la longueur du trajet direct et λ la longueur d'onde.

5. Eau de mer

La conductivité électrique de l'eau de mer est fonction de la teneur en sel (salinité) et de la température. Aux fréquences inférieures à 1 GHz, sa valeur est donnée par l'expression:

$$\sigma = 0,18 C^{0,93} [1 + 0,02 (T - 20)] \quad \text{S/m} \quad (3)$$

où C est la teneur en sel en millièmes et T la température en degrés Celsius.

A 20 °C, on utilise une valeur de 5 S/m comme valeur moyenne à l'échelle mondiale. Dans certaines zones de la Mer Baltique, on a observé des valeurs inférieures à 1 S/m. Dans la Mer Rouge, la conductivité peut dépasser 6 S/m.

La permittivité de l'eau de mer est également fonction de la salinité et de la température. On a souvent utilisé une valeur de 80 pour exprimer la permittivité relative de l'eau de mer à 20 °C, bien que la valeur réelle à basses fréquences soit d'environ 70. Toutefois, aux fréquences inférieures à 100 MHz environ, ϵ_r est bien inférieur à $60 \lambda \sigma$. On peut alors utiliser l'une ou l'autre valeur pour calculer les facteurs de propagation de l'onde de sol au-dessus de la mer sans noter de différences mesurables dans les résultats.

6. Neige et glace

6.1 Glace d'eau de mer

La glace d'eau de mer est une substance complexe dont les caractéristiques électriques varient fortement selon la température et l'âge de la glace. On constate une bonne concordance entre les modèles physiques théoriques de la glace d'eau de mer [Luchininov, 1968] et les caractéristiques électriques mesurées [Wentworth et Cohn, 1964]. La gamme de valeurs de ces caractéristiques électriques est représentée à la Fig. 2 pour les fréquences comprises entre 0,1 et 30 MHz. Au-dessus d'environ 30 MHz, les caractéristiques électriques de la glace d'eau de mer se rapprochent asymptotiquement de celles de la glace d'eau douce (Recommandation 527).

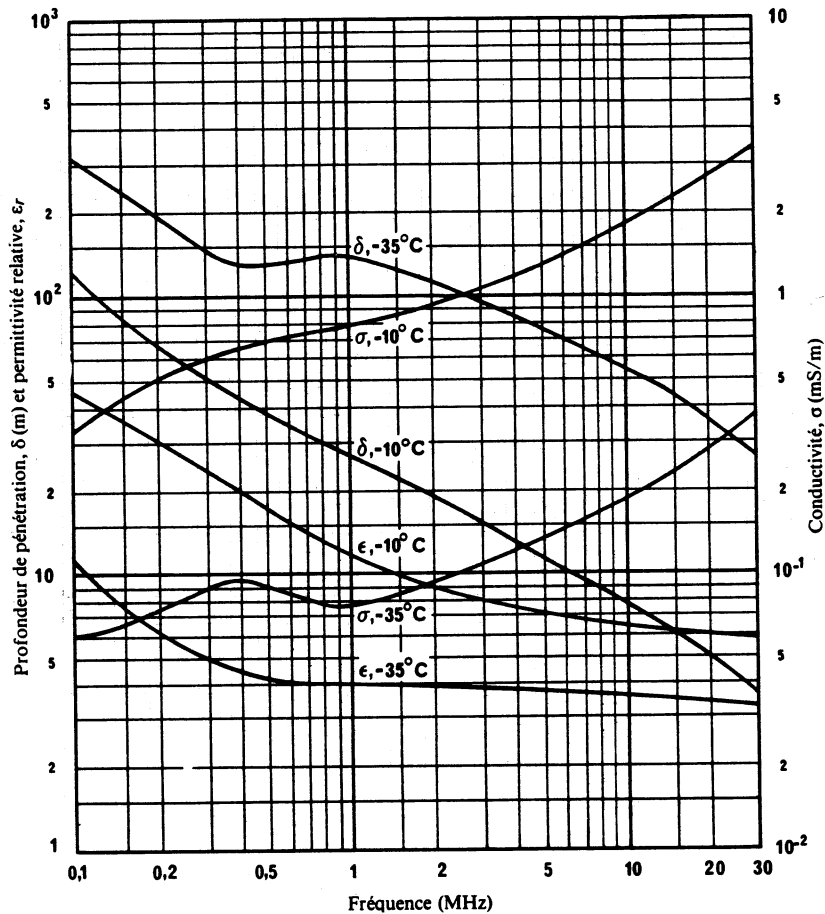


FIGURE 2 - Valeurs de la profondeur de pénétration (δ), de la permittivité relative (ϵ_r) et de la conductivité (σ) de la glace d'eau de mer [Wentworth et Cohn, 1964]

(Ces valeurs extrêmes se produisent à -10°C pour la glace nouvelle (moins d'un mois d'âge) et à -35°C pour la glace ancienne (plus d'un an d'âge)).

La propagation au-dessus de la glace d'eau de mer est anormale [Bourne et autres, 1970]. La présence d'une couche de glace de faible conductivité au-dessus de l'eau de mer dont la conductivité est élevée donne lieu à une onde de surface dont la propagation est guidée selon un mode dit «mode d'Elliott». Ce mode domine à faible distance de l'émetteur, et il peut alors se faire que son champ dépasse le champ en espace libre. Aux distances intermédiaires, cette onde de surface interfère avec l'onde de sol normale et le champ oscille avec la distance. Aux grandes distances, le champ se comporte comme l'onde de sol normale. La couche de glace a également une forte influence sur le gain en fonction de la hauteur. Une analyse théorique de la propagation au-dessus de la glace de mer [Hill et Wait, 1981] a permis d'aboutir à une explication cohérente des phénomènes observés et a conduit à suggérer que l'on peut tirer parti de ce comportement anormal pour la télédétection de champs de glace d'eau de mer à partir d'un aéronef.

La Fig. 2 indique également les profondeurs de pénétration dans la glace d'eau de mer pour la gamme de fréquences 0,1 à 30 MHz. On peut déterminer, à partir de la relation examinée au § 4.2. les valeurs équivalentes de la conductivité et de la permittivité d'une couche de glace couvrant une partie de l'océan si l'on connaît l'épaisseur de cette couche.

Il pourra également se produire des variations dans la propagation de l'onde de sol au-dessus de la glace d'eau de mer s'il se forme sur la glace une pellicule d'eau due à la pluie ou à la fonte en surface.

6.2 Glacé antarctique

Le continent antarctique est couvert d'une couche de glace d'une épaisseur moyenne de 2,2 km. Des mesures effectuées à 30 MHz dans le cadre du Projet Antarctique International [Jiracek et Bentley, 1971] ont montré que la perméabilité relative de cette glace est comprise entre 2,8 et 3,2, et que sa conductivité équivalente est comprise entre 5×10^{-5} et 10^{-6} S/m. La perméabilité relative varie linéairement en fonction de la densité de la glace.

Les ondes radioélectriques peuvent facilement pénétrer dans la glace de l'Antarctique et se réfléchir sur la roche de fond sous-jacente. Ce phénomène a été la cause d'anomalies dans les sondages ionosphériques verticaux et d'accidents d'avion désastreux suite à de fausses indications des radars altimétriques.

6.3 Neige

Les caractéristiques de la neige sont dynamiques. Elles changent suivant les phases successives de fonte et de gel de la neige. Il est utile de faire la distinction entre neige sèche et neige humide. La neige humide contient des inclusions d'eau sous forme liquide.

La perméabilité relative de la neige sèche est linéairement proportionnelle à la densité de la neige [Hallikainen et autres, 1986]. Pour des densités inférieures à 0,5 g/cm³, la perméabilité relative est donnée par l'expression

$$\epsilon_r = 1 + 1,9\rho$$

où ρ est la densité de la neige en g/cm³. La perméabilité relative de la neige sèche est généralement indépendante de la température et de la fréquence dans le domaine des hyperfréquences de 1 à 37 GHz. Le terme d'affaiblissement correspondant à la perméabilité de la neige sèche est négligeable aux fréquences inférieures à 15 GHz environ. La valeur $1,6 - j10^{-3}$ est une valeur type de la perméabilité relative complexe de la neige sèche.

La neige humide est un mélange complexe d'air, de glace et d'eau sous forme liquide. Les caractéristiques électriques mesurées peuvent être ajustées à un modèle de Debye modifié. Il suffit d'une petite quantité d'eau sous forme liquide pour modifier notablement les propriétés de la neige sèche. La neige humide est dispersive, la modification la plus marquée des caractéristiques électriques se produisant entre 3 et 18 GHz. La valeur $2 - j0,4$ est une valeur type de la permittivité relative complexe de la neige humide à 10 GHz.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBRECHT, H. J. [1963] Über den Einfluss von elektrischen Erdbodeneigenschaften und meteorologischen Parametern auf praktische Feldstärkeberechnungen bei Kurzwellenausbreitung (Influence des caractéristiques électriques du sol et des paramètres météorologiques sur les calculs pratiques du champ dans la propagation des ondes décamétriques). *Arch. Met. Geophys. Bioklim. Serv. A*, Vol. 13, 429-443.
- BLOMQUIST, Å. [1958] Local ground-wave field strength variations in the frequency range 30-1000 MHz. Proc. Conference on Electromagnetic Wave Propagation, Bruxelles, 127.
- BLOMQUIST, Å. [1968] *Propagation of Radio waves. The influence of the Earth's Surface*, chapitre 5, (en suédois), Educational Courses of the National Defense Research Institute, Stockholm, Suède.
- BOURNE, I. A., ROSS, D. B. et SEGAL, B. [1970] Phase instability in radio waves propagating across ice covered seas. AGARD Conf. Proc. N° 33.
- DOHERTY, R. H. et JOHLER, J. R. [1975] Meteorological influences on LORAN-C ground-wave propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1117-1124.
- HALLIKAINEN, M. T., ULABY, F. T. et ABDELRAZIK, M. [1986] - Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz Range, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, novembre. 1329-1339.
- HILL, D. A. et WAIT, J. R. [octobre 1981] HF radio-wave transmission over sea ice and remote sensing possibilities. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, Vol. GE-19, 4, 204-209.
- JIRACEK, G. R. et BENTLEY, C. R. [1971] - Velocity of electromagnetic waves in antarctic ice, *Antarctic Snow and Ice Studies 2, Antarctic Research Studies*, Vol. 16, American Geophysical Union.
- KOSKENNIEMI, O. et LAIHO, J. K. [octobre 1975] Mesure de la conductivité effective du sol finlandais, en ondes kilométriques et hectométriques. *Rev. de l'UER (Technique)*, 153, 237-240.
- LUCHININOV, V. S. [3 septembre 1968] Electrical Characteristics of Ice. *Zhurn. Tekn. Fiziki*, Vol. 38, 3; traduit en anglais: *Soviet Phys. - Tech. Phys.*, 13.
- RICE, P. L. [1971] Some effects of buildings and vegetation on VHF/UHF propagation. Proc. IEEE Mountain-West Conference on Electromagnetic Compatibility, Tucson, Arizona, Etats-Unis d'Amérique.
- SAXTON, J. A. et LANE, J. A. [octobre 1952] Electrical properties of sea water. *Wireless Engr.* ; Vol. 29, 349, 269-275.
- SAXTON, J. A. et LANE, J. A. [mai 1955] VHF and UHF reception. *Wireless World*, Vol. 61, 5, 229-232.
- SEVICK, J. [1978] Short ground-radial systems for short verticals. *QST*, Vol. LXII, 4, 30-33.
- TAMIR, T. [1967] On radio-wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 6, 806-817.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic waves in stratified media* (2^e édition), Pergamon Press, MacMillan, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- WENTWORTH, F. L. et COHN, M. [juin 1964] Electrical properties of sea ice at 0,1 to 30 Mc/s. *Radio Sci.*, Vol. 68D, 6, 681-691.
-