

## RECOMMANDATION UIT-R P.527-3\*

## CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DU SOL

(1978-1982-1990-1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la propagation de l'onde de sol dépend surtout des caractéristiques électriques du sol et que la mesure dans laquelle les couches inférieures influent sur les valeurs des caractéristiques électriques du sol dépend de la profondeur à laquelle pénètre l'énergie radioélectrique;
- b) que les caractéristiques électriques peuvent être représentées par trois paramètres: la perméabilité  $\mu$ , la permittivité  $\epsilon$  et la conductivité  $\sigma$ ;
- c) que l'on peut normalement considérer que la perméabilité du sol  $\mu$  est égale à la perméabilité du vide et que l'on a besoin de valeurs de la permittivité relative et de la conductivité en fonction de la fréquence pour différents types de sol;
- d) que l'on a besoin de connaître la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence,

*recommande*

que les renseignements de l'Annexe 1 soient utilisés pour calculer le champ de l'onde de sol aux fréquences considérées et dans les conditions indiquées.

## ANNEXE 1

## 1. Introduction

La présente Annexe donne les valeurs types des caractéristiques électriques pour différents types de sol et examine les facteurs physiques dont dépendent ces caractéristiques.

## 2. Valeurs de permittivité et de conductivité

La Fig. 1 donne les valeurs représentatives de conductivité et de permittivité pour différents types de sol, en fonction de la fréquence. Ces valeurs, souvent qualifiées de valeurs intrinsèques, se rapportent à une structure homogène du sous-sol.

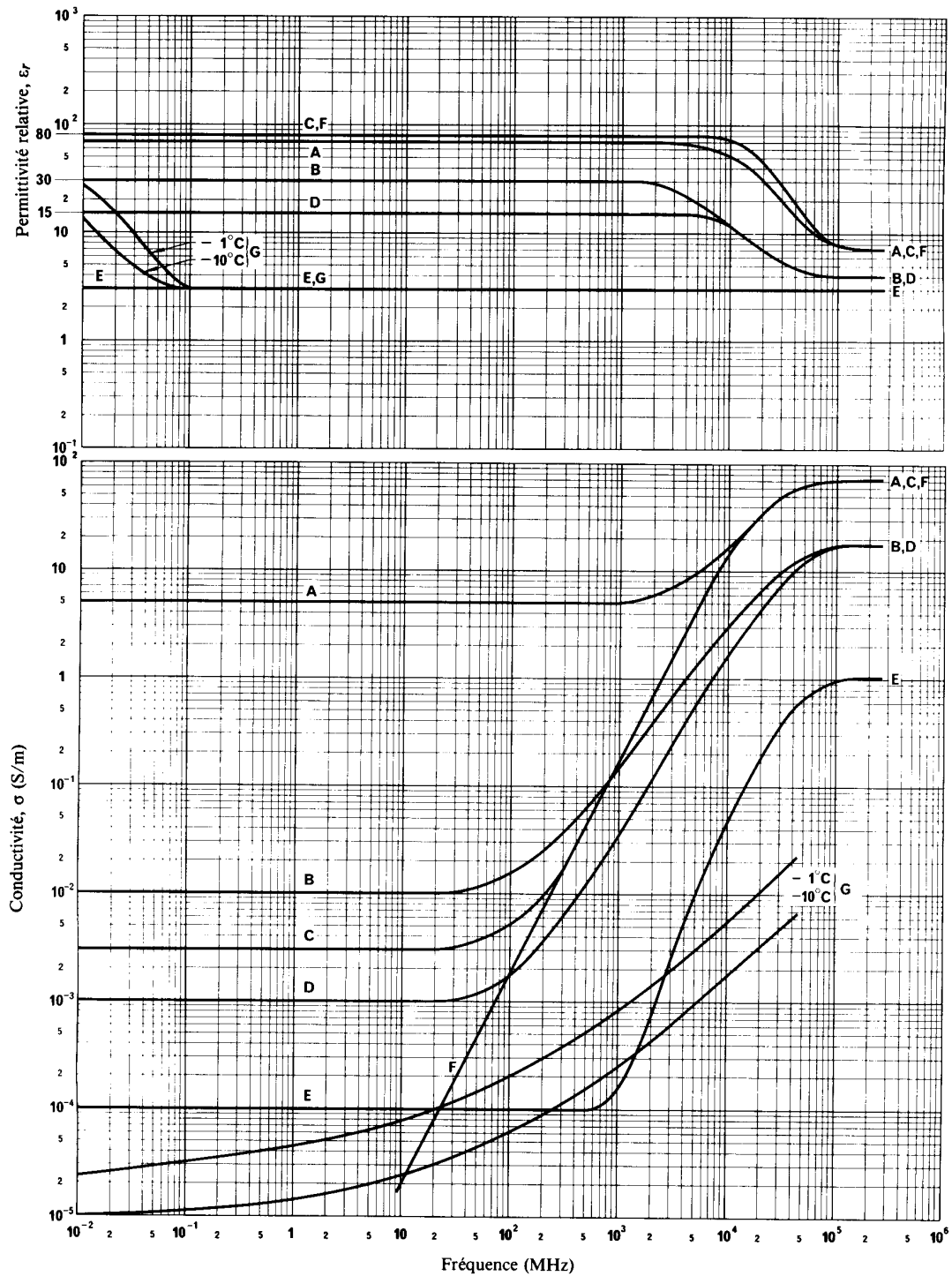
Toutefois, la structure du sous-sol est rarement homogène; elle se compose plutôt de deux ou de plusieurs couches d'épaisseurs différentes, ayant des conductivités et des permittivités différentes. C'est un fait dont il faut tenir compte, ce que l'on peut faire en introduisant la notion de paramètres équivalents. Cette notion permet d'appliquer les courbes de propagation de l'onde de sol pour une terre lisse et homogène de la Recommandation UIT-R P.368, en remplaçant le sous-sol hétérogène 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.

Les valeurs de la permittivité relative (constante diélectrique) et de la conductivité données par la Fig. 1 pour divers types de sol indiquent la gamme approximative de valeurs que l'on peut observer dans diverses conditions; cependant, dans des situations extrêmes, on peut observer des valeurs se situant en dehors de cette gamme. Dans les zones fertiles très humides, on relève des valeurs de conductivité beaucoup plus fortes, alors que, dans les régions montagneuses ou arctiques, la conductivité peut descendre à  $10^{-5}$  S/m aux fréquences inférieures à 100 MHz. Quand le sol est recouvert de neige, on peut trouver des valeurs de permittivité plus basses que celles qu'indique la courbe E de la Fig. 1. La conductivité des lacs et des rivières augmente avec la teneur de l'eau en impuretés.

---

\* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

FIGURE 1

Permittivité relative,  $\epsilon_r$ , et conductivité,  $\sigma$ , en fonction de la fréquence

- A: eau de mer (salinité moyenne),  $20^\circ\text{C}$
- B: sol humide
- C: eau douce,  $20^\circ\text{C}$
- D: sol moyennement sec
- E: sol très sec
- F: eau pure,  $20^\circ\text{C}$
- G: glace (eau douce)

### 3. Pénétration et étalement des ondes

3.1 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,  $\delta$ , 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 Fig. 2 indique la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence pour différents types de sol et d'eau.

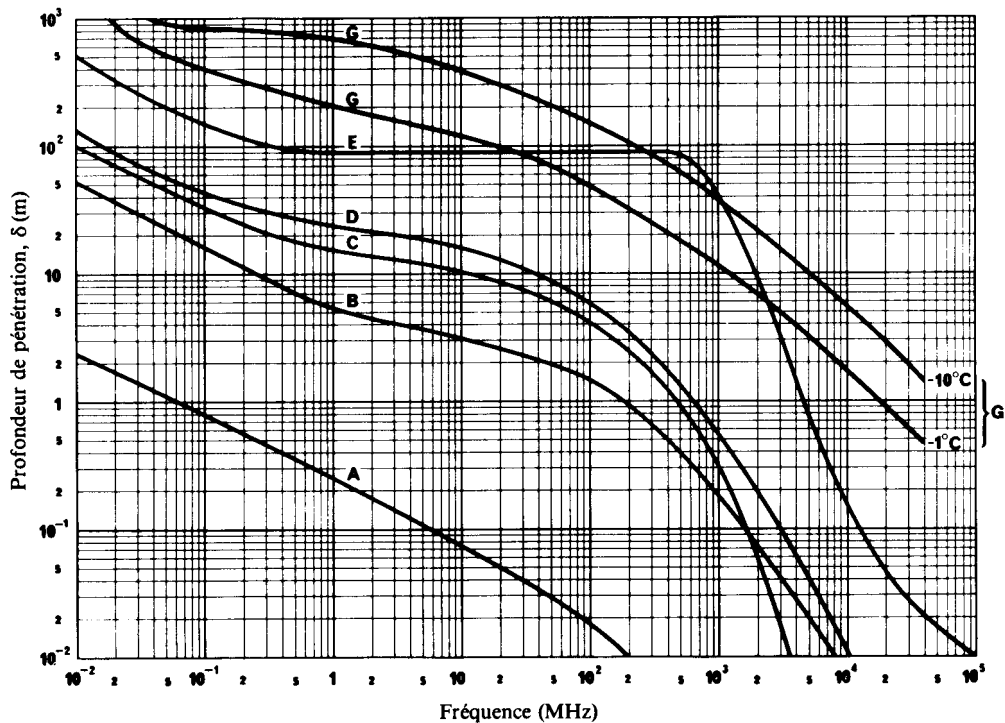
3.2 Si la profondeur de pénétration est inférieure à l'épaisseur de la couche, les couches sous-jacentes ont peu d'influence. Si au contraire la profondeur de pénétration est très supérieure à l'épaisseur de la couche superficielle, la propagation dépend des constantes du sol des couches inférieures.

Aux fréquences basses, sauf pour l'eau de mer, il y a lieu, comme le montre la Fig. 2, de tenir compte des couches d'une profondeur de 100 m, sinon davantage. Cela est d'une importance particulière lorsque les couches supérieures ont la conductivité la plus faible et que l'énergie peut donc pénétrer plus facilement aux niveaux inférieurs. De tels cas se présentent, par exemple, pour les lacs et zones océaniques recouverts de glace.

3.3 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.

FIGURE 2

Profondeur de pénétration  $\delta$  en fonction de la fréquence



- |               |                        |
|---------------|------------------------|
| A: eau de mer | D: sol moyennement sec |
| B: sol humide | E: sol très sec        |
| C: eau douce  | G: glace (eau douce)   |

## 4. Mer

### 4.1 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:

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

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,  $\epsilon_r$  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.

### 4.2 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. La gamme de valeurs de ces caractéristiques électriques et des profondeurs de pénétration est représentée à la Fig. 3 pour les fréquences comprises entre 0,1 et 30 MHz. Au-dessus de 30 MHz, les caractéristiques électriques de la glace d'eau de mer se rapprochent asymptotiquement de celles de la glace d'eau douce.

## 5. 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.

### 5.1 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.

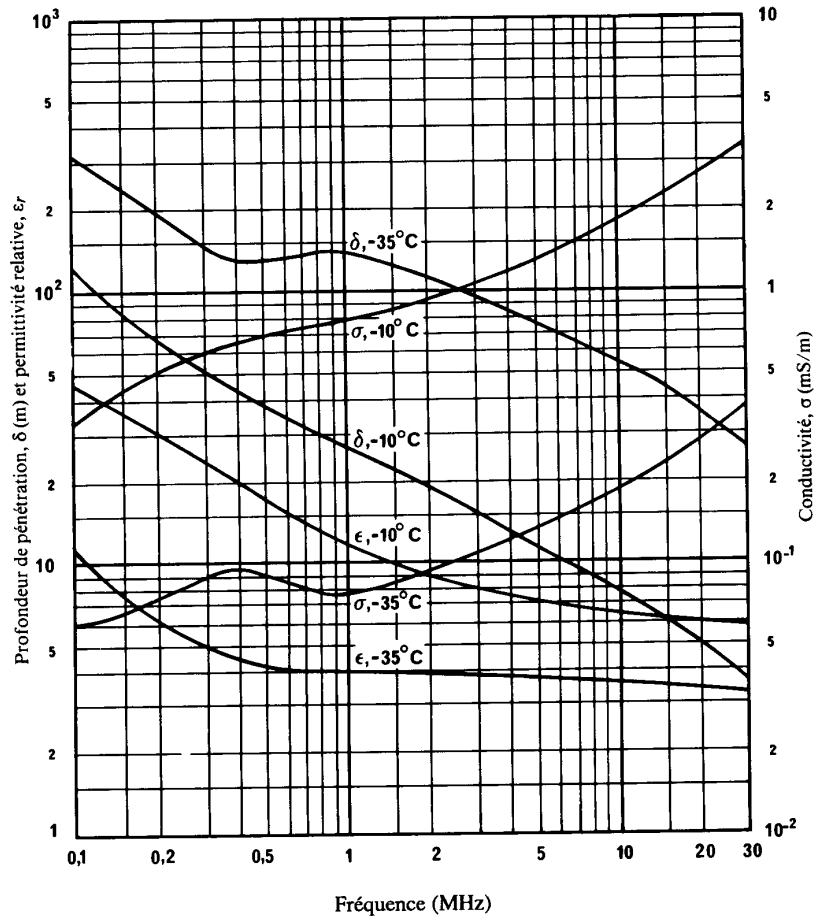
### 5.2 Teneur en humidité

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.

FIGURE 3

Valeur de la profondeur de pénétration  $\delta$ , de la permittivité relative  $\epsilon_r$   
et de la conductivité  $\sigma$  de la glace d'eau de mer



D03-sc

### 5.3 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.

### 5.4 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.

### 5.5 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.