

International Telecommunication Union

ITU-R
Radiocommunication Sector of ITU

Recommandation UIT-R P.527-4
(06/2017)

Caractéristiques électriques du sol

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2018

© UIT 2018

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R P.527-4

Caractéristiques électriques du sol

(1978-1982-1992-2017)

Champ d'application

La présente Recommandation décrit des méthodes servant à modéliser les caractéristiques électriques du sol, y compris de l'eau pure, de l'eau de mer, de la glace, de la terre et de la couverture végétale, pour des fréquences inférieures à 1 000 GHz, de manière systématique à partir de l'évaluation de la permittivité relative complexe. Dans tous les cas, la conductivité peut être calculée en fonction de la fréquence et de la température à partir de ces évaluations. Les informations antérieures sur les caractéristiques électriques au-dessous de 30 MHz en termes de permittivité et de conductivité sont reprises en Appendice en relation avec les Recommandations UIT-R P.368 et UIT-R P.832. La nouvelle méthode de modélisation est totalement compatible avec ces informations antérieures.

Mots-clés

Permittivité complexe, conductivité, profondeur de pénétration, surface de la Terre, eau, végétation, sol, glace

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les caractéristiques électriques peuvent être représentées par trois paramètres: la perméabilité magnétique μ , la permittivité électrique ϵ et la conductivité électrique σ ;
- b) que la perméabilité du sol, μ , peut normalement être considérée comme étant égale à la perméabilité dans le vide;
- c) que les propriétés électriques du sol peuvent être représentées par la permittivité complexe ou, de manière équivalente, par la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité complexe;
- d) que l'on a besoin de connaître la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence;
- e) que l'on a besoin de connaître les caractéristiques électriques du sol pour plusieurs raisons lors de la modélisation de la propagation, notamment pour déterminer l'intensité du signal de l'onde de sol, la réflexion par le sol au niveau d'un terminal de Terre, les brouillages entre stations aéronautiques et/ou spatioportées dus aux réflexions ou à la diffusion par le sol, et pour les applications de la science de la Terre;
- f) que la Recommandation UIT-R P.368 contient les courbes de propagation de l'onde de sol entre 1 MHz et 30 MHz pour différents types de sol caractérisés par la permittivité et la conductivité électrique;
- g) que la Recommandation UIT-R P.832 contient un atlas mondial de la conductivité électrique du sol pour les fréquences inférieures à 1 MHz,

recommande

que les informations figurant dans l'Annexe 1 soient utilisées pour modéliser les caractéristiques électriques du sol.

Annexe 1

1 Introduction

La présente Annexe fournit des méthodes de prévision qui permettent de prévoir les caractéristiques électriques des sols suivants pour les fréquences inférieures à 1 000 GHz:

- Eau.
- Eau de mer (c'est-à-dire salée).
- Glace sèche et glace humide.
- Sol sec et sol humide (mélange de sable, d'argile et de limon).
- Végétation (au-dessus et au-dessous du point de congélation).

2 Permittivité complexe

Les caractéristiques du sol peuvent s'exprimer en fonction de trois paramètres:

- la perméabilité magnétique, μ ;
- la permittivité électrique, ε ; et
- la conductivité électrique¹, σ .

La perméabilité magnétique est une mesure de la faculté d'un matériau à créer en son sein un champ magnétique en réponse à un champ magnétique qui lui est appliqué; elle est égale à la densité du flux magnétique B divisée par le champ magnétique H . La permittivité électrique est une mesure de la faculté d'un matériau à s'opposer à un champ électrique; elle est égale à la densité du flux électrique D divisée par l'intensité du champ électrique E . La conductivité électrique est une mesure de la faculté d'un matériau à conduire un courant électrique; elle est égale au rapport de la densité de courant dans le matériau au champ électrique qui produit le flux de courant.

Etant donné une onde plane incidente $\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - k \cdot r)}$, où ω est la fréquence radiale, t le temps, μ la perméabilité magnétique, ε la permittivité électrique et σ la conductivité électrique, le vecteur nombre d'onde de propagation \vec{k} a une norme k donnée par

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1a)$$

La permittivité, la perméabilité et la conductivité du vide sont égales à:

- Permittivité du vide $\varepsilon_0 = 8,854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ (F/m)
- Perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (N/A²)
- Conductivité du vide $\sigma_0 = 0,0$ (S/m)

Il est pratique de définir la permittivité relative, ε_r , et la perméabilité relative, μ_r , par rapport à leur valeur dans le vide:

- Permittivité relative $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
- Perméabilité relative $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

où ε et μ sont les permittivité et perméabilité correspondantes du matériau. Dans la présente Recommandation, on suppose que $\mu = \mu_0$, et que, par conséquent, $\mu_r = 1$.

¹ Ce paramètre est appelé «conductivité électrique» pour le différencier d'autres types de conductivité comme la conductivité thermique et la conductivité hydraulique. Dans la suite, il est appelé «conductivité».

Comme le montre l'équation (1a), le nombre d'onde dépend à la fois de σ et de ϵ , et non de l'un ou de l'autre séparément. De même, les formules d'autres paramètres physiques qui décrivent divers mécanismes de propagation de l'onde radioélectrique comme la section transversale de diffusion, les coefficients de réflexion et les angles de réfraction dépendent de valeurs de cette combinaison. Par ailleurs, la racine carrée de cette combinaison est équivalente à la formule de l'indice de réfraction utilisée pour caractériser la troposphère et l'ionosphère. L'indice de réfraction est en outre utilisé pour caractériser différents matériaux dans les bandes d'ondes millimétriques et dans les bandes des fréquences optiques. Par conséquent, pour simplifier les formules décrivant divers mécanismes de propagation et pour normaliser les terminologies des caractéristiques électriques dans différentes bandes de fréquences, la combinaison $\epsilon - \frac{j\sigma}{\omega}$ est définie comme étant la permittivité complexe et utilisée pour décrire les caractéristiques électriques des substances.

La permittivité fait référence à ϵ , tandis que la permittivité relative fait référence à ϵ_r , et la permittivité relative complexe, définie comme étant $\epsilon'_r - j\epsilon''_r$, fait référence à :

$$\epsilon'_r - j\epsilon''_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (1b)$$

où ϵ peut être un nombre complexe.

Dans l'équation (1b), ϵ'_r est la partie réelle de la permittivité complexe, et ϵ''_r est la partie imaginaire de la permittivité complexe. La partie réelle de la permittivité relative complexe, ϵ'_r , est associée à l'énergie emmagasinée lorsque la substance est exposée à un champ électromagnétique. La partie imaginaire de la permittivité relative complexe, ϵ''_r , influe sur l'absorption de l'énergie et est appelée «facteur d'affaiblissement». Le signe moins de l'équation (1b) est associé à un champ électromagnétique dont la dépendance au temps s'exprime comme $e^{2j\pi ft}$ (f est la fréquence en Hz, et t le temps en secondes). Si la dépendance au temps s'exprime comme $e^{-2j\pi ft}$, le signe moins (-) de l'équation (1b) est remplacé par un signe (+).

Aux fréquences inférieures à 1 000 GHz, la dissipation dans le sol est attribuée soit au mouvement de translation des charges (courant de conduction) soit au mouvement de vibration des charges (vibration des dipôles), et la partie imaginaire de la permittivité relative complexe, ϵ''_r , peut se décomposer en deux termes :

$$\epsilon''_r = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_0} \quad (2)$$

où ϵ''_d représente la dissipation due au courant de déplacement associé à la vibration des dipôles, et $\frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_0}$ représente la dissipation due au courant de conduction.

Le courant de conduction représente le mouvement de translation d'ensemble des charges libres. C'est le seul courant de fréquence nulle (ou courant continu). Le courant de conduction est supérieur au courant de déplacement aux fréquences inférieures à la fréquence de transition, f_t , et le courant de déplacement est supérieur au courant de conduction aux fréquences supérieures à la fréquence de transition, f_t . La fréquence de transition, f_t , définie comme étant la fréquence à laquelle les courants de conduction et de déplacement sont égaux, est égale à :

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon''_d} \quad (3)$$

Dans le cas des substances diélectriques non conductrices (sans pertes), $\sigma = 0$, et donc $\epsilon''_r = \epsilon''_d$. Pour certaines de ces substances, comme le sol sec et la végétation sèche, $\epsilon''_d = 0$, et donc $\epsilon''_r = 0$ quelle que soit la fréquence, ce qui correspond au cas examiné au § 2.1.2.3 de la Recommandation UIT-R P.2040. En revanche, pour certaines autres substances non conductrices, comme l'eau pure et la neige sèche, ϵ''_d et ϵ''_r sont égaux à zéro uniquement lorsque la fréquence est nulle. Par conséquent, le § 2.1.2.3 de la Recommandation UIT-R P.2040 ne peut s'appliquer à ces substances.

Dans le cas des substances diélectriques conductrices (avec pertes), comme l'eau de mer et le sol humide, la conductivité électrique σ possède des valeurs finies non nulles. Par conséquent, lorsque la fréquence tend vers zéro, la partie imaginaire de la permittivité relative complexe de ces substances tend vers ∞ , comme le montre l'équation (3). Dans ce cas, il est plus commode d'utiliser, au lieu de la partie imaginaire de la permittivité relative complexe, la conductivité σ , qui d'après l'équation (2), peut s'écrire, après avoir mis $\varepsilon''_d = 0$, comme suit:

$$\sigma = 2\pi\varepsilon_0 f \varepsilon''_r = 0,05563 f_{\text{GHz}} \varepsilon''_r \quad (3a)$$

où f_{GHz} est la fréquence en GHz. En généralisant la formule ci-dessus aux autres fréquences, comme au moyen de l'équation (12) de la Recommandation UIT-R P.2040, on obtient la somme de deux termes, l'un donnant la conductivité électrique et l'autre exprimant la dissipation d'énergie associée au courant de déplacement.

La présente Recommandation fournit des méthodes de prévision des parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe, ε'_r et ε''_r ; et les figures associées montrent des exemples de variation des parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe avec la fréquence dans différentes conditions environnementales.

2.1 Sol en couches

Les modèles figurant au § 5 s'appliquent à un sous-sol homogène. Or, le sous-sol est rarement homogène: il est composé de multiples couches d'épaisseurs différentes et de caractéristiques électriques variées, dont il faut tenir compte en introduisant le concept de paramètres équivalents, qui permet de représenter le sol homogène. Les paramètres équivalents peuvent être utilisés avec les courbes de propagation de l'onde de sol pour une Terre lisse et homogène figurant dans la Recommandation UIT-R P.368.

3 Profondeur de pénétration

La capacité des couches inférieures à influencer sur les caractéristiques électriques équivalentes du sol dépend de la profondeur de pénétration de l'énergie radioélectrique, δ , qui est définie comme étant la profondeur à laquelle l'amplitude du champ du rayonnement électromagnétique à l'intérieur d'un matériau devient inférieure à 1/e (environ 37%) de sa valeur d'origine à la surface (ou plus exactement, juste au-dessous de la surface). La profondeur de pénétration, δ , dans un médium homogène de permittivité relative complexe ε_r ($\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r$) est donnée par la formule:

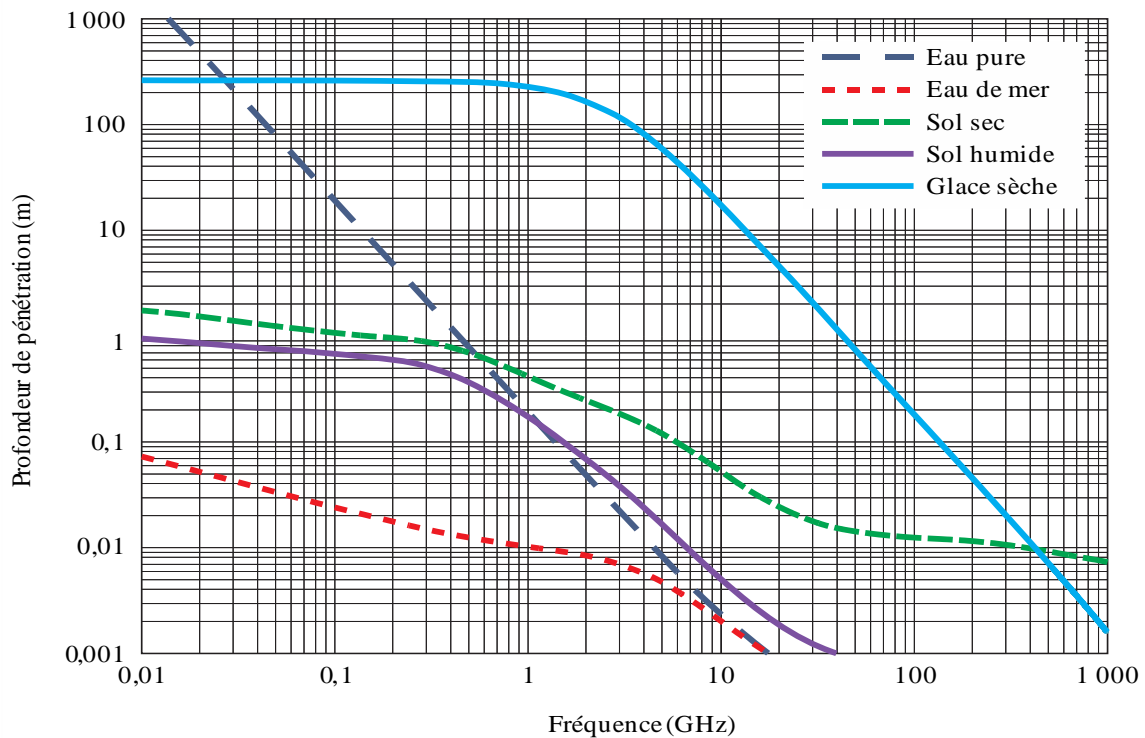
$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\varepsilon'_r)^2 + (\varepsilon''_r)^2} - \varepsilon'_r}} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

où λ est la longueur d'onde en mètres. Il est à noter que lorsque la partie imaginaire de la permittivité relative complexe dans l'équation (4) tend vers zéro, la profondeur de pénétration tend vers l'infini.

La Figure 1 illustre des valeurs types de la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence pour différents types de composants du sol, notamment l'eau pure, l'eau de mer, le sol sec, le sol humide et la glace sèche. Les profondeurs de pénétration pour l'eau pure et l'eau de mer sont calculées à 20 °C, et la salinité de l'eau de mer est égale à 35 g/kg. Pour les profondeurs de pénétration dans le sol sec et le sol humide, on suppose que les teneurs en eau volumétriques sont égales respectivement à 0,07 et 0,5. Les autres paramètres relatifs au sol sont les mêmes que ceux de la Fig. 7. La profondeur de pénétration de la glace sèche est calculée à 0 °C.

FIGURE 1

Profondeur de pénétration de différents types de sol en fonction de la fréquence



P.0527-01

4 Facteurs influant sur les caractéristiques électriques équivalentes du sol

Les valeurs équivalentes des caractéristiques électriques du sol sont déterminées par la nature du sol, sa teneur en humidité, sa température, sa structure géologique générale et la fréquence du rayonnement électromagnétique incident.

4.1 Nature du sol

De nombreuses mesures ont permis d'établir que la valeur des caractéristiques électriques du sol varie avec la nature de ce dernier; 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 du loam est normalement de l'ordre de 10^{-2} S/m; or, on a pu montrer que, pour le loam séché, la conductivité peut descendre jusqu'à 10^{-4} S/m, c'est-à-dire à une valeur du même ordre que celle du granit.

4.2 Teneur en humidité

La teneur du sol en humidité est le paramètre qui influe le plus sur la permittivité et la conductivité du sol. Des mesures effectuées en laboratoire ont montré que, si l'on fait croître la teneur en humidité à partir d'une valeur faible, la permittivité et la conductivité du sol augmentent et deviennent maximales pour des teneurs en humidité voisines de celles qu'on rencontre normalement dans ces types de sol. A des profondeurs d'un mètre ou plus, l'humidité du sol en un lieu donné est habituellement constante. 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.

Un même sol peut présenter des variations de teneur type en 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.

4.3 Température

Des mesures de laboratoire portant sur les caractéristiques électriques du sol ont montré que, aux basses fréquences, la conductivité augmente de 3% environ par degré Celsius, tandis que la permittivité est à peu près constante, quelle que soit la température. Au point de congélation, on observe généralement une substantielle diminution de la valeur de la conductivité comme de la permittivité.

4.4 Variations saisonnières

Les effets des variations saisonnières sur les caractéristiques électriques du sol sont essentiellement dus à des variations de la teneur en eau et de la température de la couche supérieure du sol.

5 Méthodes de prévision de la permittivité relative complexe

Les modèles décrits dans les sous-paragraphes qui suivent fournissent des méthodes de prévision de la permittivité relative complexe des sols suivants:

- Eau pure.
- Eau de mer (c'est-à-dire salée).
- Glace.
- Sol sec (mélange de sable, d'argile et de limon).
- Sol humide (sol sec plus eau).
- Végétation (au-dessus et au-dessous du point de congélation).

Dans cette partie du document, les indices de la permittivité relative complexe et donc les indices de ses parties réelle et imaginaire servent à désigner la permittivité relative correspondant à des cas particuliers; par exemple, l'indice «*ep*» pour l'eau pure, l'indice «*es*» pour l'eau salée, etc.

5.1 Eau

On trouve dans ce sous-paragraphes les méthodes de prévision de la permittivité relative complexe de l'eau pure, de l'eau salée et de la glace.

5.1.1 Eau pure

La permittivité relative complexe de l'eau pure, ε_{ep} , est fonction de la fréquence, f_{GHz} (GHz), et de la température, T (°C):

$$\varepsilon_{ep} = \varepsilon'_{ep} - j \varepsilon''_{ep} \quad (5)$$

$$\varepsilon'_{ep} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \varepsilon_\infty \quad (6)$$

$$\varepsilon''_{ep} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \quad (7)$$

où:

$$\varepsilon_s = 77,66 + 103,3\theta \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_s \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\infty} = 3,52 - 7,52\Theta \quad (10)$$

$$\Theta = \frac{300}{T+273,15} - 1 \quad (11)$$

et f_1 et f_2 sont les fréquences de relaxation de Debye:

$$f_1 = 20,20 - 146,4 \Theta + 316\Theta^2 \quad (\text{GHz}) \quad (12)$$

$$f_2 = 39,8 f_1 \quad (\text{GHz}) \quad (13)$$

5.1.2 Eau de mer

La permittivité relative complexe de l'eau de mer (salée), ε_{es} , est fonction de la fréquence, f_{GHz} (GHz), de la température, T (°C), et de la salinité, S (g/kg ou ‰)².

$$\varepsilon_{es} = \varepsilon'_{es} - j \varepsilon''_{es} \quad (14)$$

$$\varepsilon'_{es} = \frac{\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \varepsilon_{\infty s} \quad (15)$$

$$\varepsilon''_{es} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{1s})(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{2s})(\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{es}}{f_{\text{GHz}}} \quad (16)$$

où

$$\varepsilon_{ss} = \varepsilon_s \exp(-3,56417 \times 10^{-3}S + 4,74868 \times 10^{-6}S^2 + 1,15574 \times 10^{-5}TS) \quad (17)$$

$$f_{1s} = f_1 (1 + S(2,39357 \times 10^{-3} - 3,13530 \times 10^{-5}T + 2,52477 \times 10^{-7}T^2)) \quad (\text{GHz}) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{1s} = \varepsilon_1 \exp(-6,28908 \times 10^{-3}S + 1,76032 \times 10^{-4}S^2 - 9,22144 \times 10^{-5}TS) \quad (19)$$

$$f_{2s} = f_2 (1 + S(-1,99723 \times 10^{-2} + 1,81176 \times 10^{-4}T)) \quad (\text{GHz}) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_{\infty} (1 + S(-2,04265 \times 10^{-3} + 1,57883 \times 10^{-4}T)) \quad (21)$$

Les valeurs de ε_s , ε_1 , ε_{∞} , f_1 et f_2 sont calculées à partir des équations (8), (9), (10), (12) et (13). Par ailleurs, σ_{es} est donné par la formule

$$\sigma_{es} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \quad (\text{S/m}) \quad (22)$$

$$\sigma_{35} = 2,903602 + 8,607 \times 10^{-2} T + 4,738817 \times 10^{-4} T^2 - 2,991 \times 10^{-6} T^3 + 4,3047 \times 10^{-9} T^4 \quad (23)$$

$$R_{15} = S \frac{(37,5109 + 5,45216S + 1,4409 \times 10^{-2} S^2)}{(1004,75 + 182,283 S + S^2)} \quad (24)$$

$$R_{T15} = 1 + \frac{\alpha_0(T-15)}{(\alpha_1 + T)} \quad (25)$$

$$\alpha_0 = \frac{(6,9431 + 3,2841S - 9,9486 \times 10^{-2} S^2)}{(84,850 + 69,024 S + S^2)} \quad (26)$$

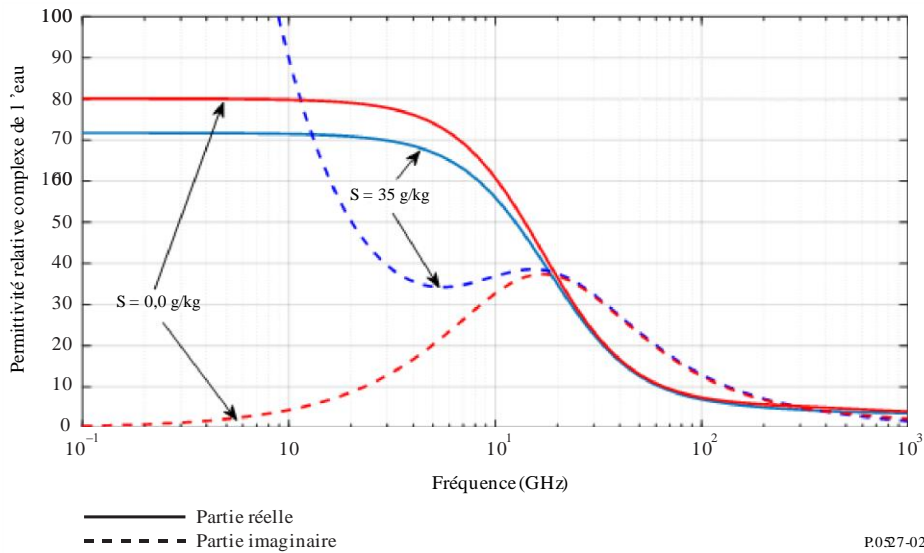
$$\alpha_1 = 49,843 - 0,2276 S + 0,198 \times 10^{-2} S^2 \quad (27)$$

² Le symbole ‰ signifie «millièmes».

La permittivité relative complexe de l'eau pure donnée dans les équations (5) – (7) est un cas particulier de l'équation (14) – (16) en prenant $S = 0$. La permittivité relative complexe de l'eau pure ($S = 0$ g/kg) et la permittivité relative complexe de l'eau salée ($S = 35$ g/kg) en fonction de la fréquence sont représentées à la Fig. 2 pour $T = 20$ °C et à la Fig. 3 pour $T = 0$ °C.

FIGURE 2

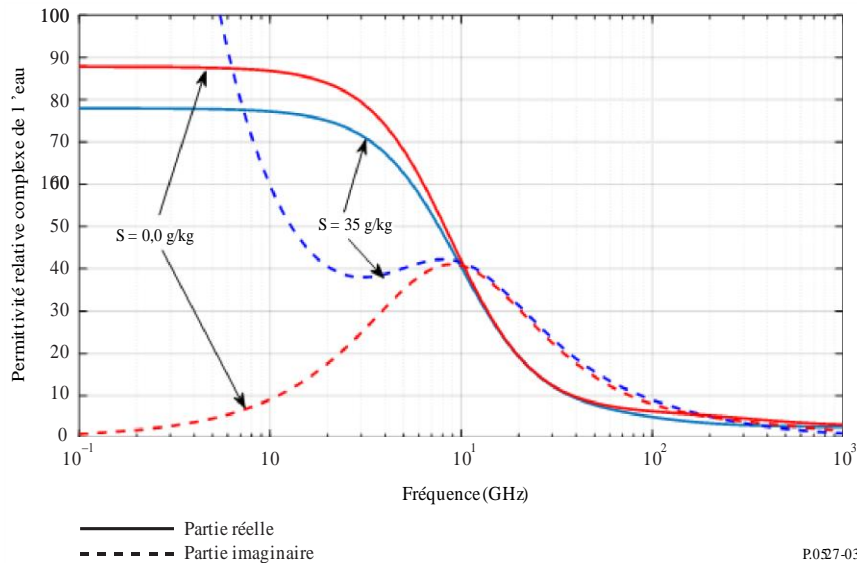
Permittivité relative complexe de l'eau pure et de l'eau salée en fonction de la fréquence
($T = 20$ °C)



P0527-02

FIGURE 3

Permittivité relative complexe de l'eau pure et de l'eau salée en fonction de la fréquence
($T = 0$ °C)



P0527-03

5.1.3 Glace

On trouve dans ce sous-paragraphe les méthodes de prévision de la permittivité relative complexe de la glace sèche et de la glace humide.

5.1.3.1 Glace sèche

La glace sèche est composée d'eau pure gelée (i.e. $T \leq 0$ °C). La permittivité relative complexe de la glace sèche, ε_{glace} , est donnée par:

$$\varepsilon_{glace} = \varepsilon'_{glace} - j \varepsilon''_{glace} \quad (28)$$

La partie réelle de la permittivité relative complexe, ε'_{glace} , est fonction de la température, T (°C), et indépendante de la fréquence:

$$\varepsilon'_{glace} = 3,1884 + 0,00091 T \quad (29)$$

Et la partie imaginaire de la permittivité relative complexe, ε''_{glace} , est fonction de la température T (°C) et de la fréquence, f_{GHz} (GHz):

$$\varepsilon''_{glace} = \frac{A}{f_{GHz}} + B f_{GHz} \quad (30)$$

où

$$A = (0,00504 + 0,0062\Theta)\exp(-22,1\Theta) \quad (31)$$

$$B = \frac{0,0207}{T+273,15} \frac{\exp(-\tau)}{\{\exp(-\tau)-1\}^2} + 1,16 \times 10^{-11} f_{GHz}^2 + \exp(-9,963 + 0,0372T) \quad (32)$$

$$\tau = \frac{335}{T+273,15} \quad (33)$$

$$\Theta = \frac{300}{T+273,15} - 1 \quad (34)$$

Les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe de la glace sèche sont illustrées à la Fig. 4 pour $T = -10$ °C.

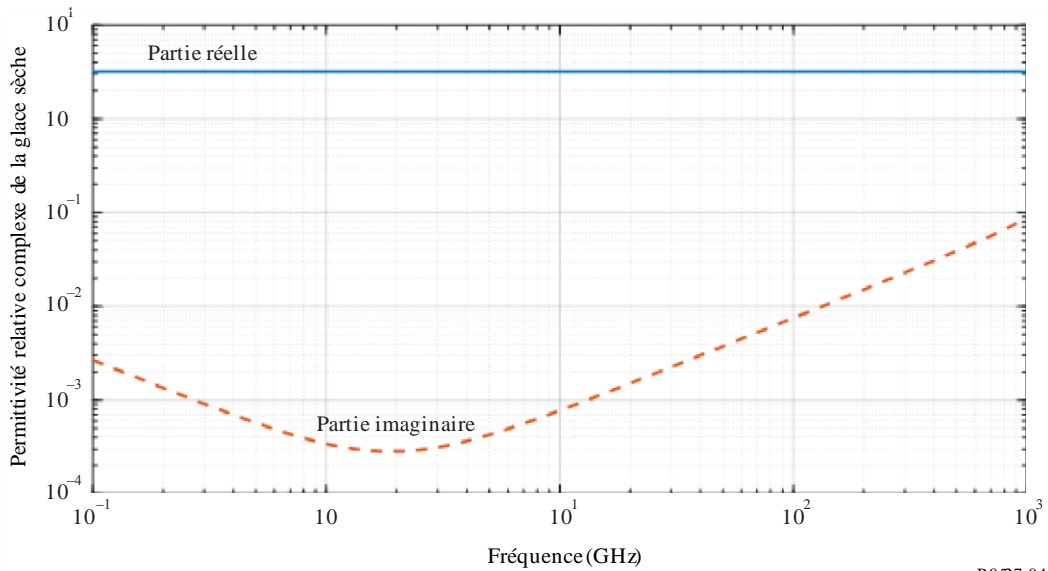
5.1.3.2 Glace humide

Lorsque la glace est humide (à 0 °C), ses grains sont entourés d'eau liquide. En considérant que les grains de glace sont des inclusions sphériques à l'intérieur d'un bain d'eau liquide, la formule de Maxwell Garnett relative aux mélanges diélectriques est appliquée pour exprimer la permittivité relative complexe de la glace humide, $\varepsilon_{glace\ humide}$, comme une combinaison de la permittivité relative complexe de la glace sèche, ε_{glace} , et de la permittivité relative complexe de l'eau pure, ε_{ep}

$$\varepsilon_{glace\ humide} = \left(\frac{(\varepsilon_{glace} + 2\varepsilon_{ep}) + 2(\varepsilon_{glace} - \varepsilon_{ep})(1 - F_{te})}{(\varepsilon_{glace} + 2\varepsilon_{ep}) - (\varepsilon_{glace} - \varepsilon_{ep})(1 - F_{te})} \right) \varepsilon_{ep} \quad (35)$$

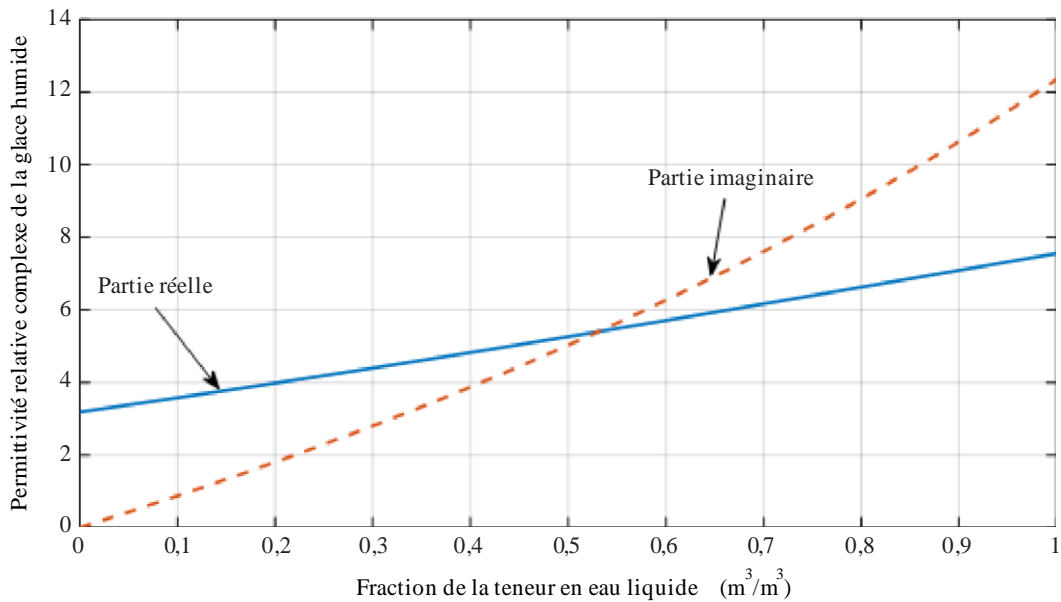
F_{te} est la fraction volumique d'eau liquide (m^3/m^3). L'équation (35) est complexe et peut être séparée en partie réelle et partie imaginaire. Chaque partie est une fonction des parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe de la glace sèche et des parties correspondantes de l'eau. Les parties réelle et imaginaire de la glace sèche à $f_{GHz} = 60$ GHz et $T = 0$ °C sont illustrées à la Fig. 5 en fonction de la teneur en eau liquide.

FIGURE 4
Permittivité relative complexe de la glace sèche en fonction de la fréquence
($T = -10\text{ °C}$)



P0527-04

FIGURE 5
Permittivité relative complexe de la glace humide en fonction de la teneur en eau liquide
($f = 60\text{ GHz}$ et $T = 0\text{ °C}$)



P0527-05

5.2 Sol

La permittivité relative complexe du sol, ϵ_{sol} , est fonction de la fréquence, f_{GHz} (GHz), de la température, T ($^{\circ}\text{C}$), de la composition du sol et de la teneur en eau volumétrique.

La composition du sol est caractérisée par les pourcentages volumiques des constituants suivants du sol sec, qui sont fournis par des études de terrain et des analyses en laboratoire: a) P_{sable} = % de sable, b) P_{argile} = % d'argile, et c) P_{limon} = % de limon ainsi que d) la densité relative (i.e. la masse volumique du sol divisée par la masse volumique de l'eau) du mélange sec des constituants du sol, ρ_r , et e) la teneur en eau volumétrique, m_v , qui est égale au volume d'eau divisé par le volume de sol total pour un échantillon de sol donné.

La densité apparente (i.e. la masse de sol dans un volume donné (g cm^{-3}) de sol), ρ_a , doit aussi être fournie en entrée. Il est difficile de mesurer cette grandeur directement, mais elle peut être calculée à partir des pourcentages des constituants secs. Si l'on ne dispose pas d'une fonction de pseudo-transfert locale, on peut utiliser la fonction de pseudo-transfert empirique suivante:

$$\rho_a = 1,07256 + 0,078886 \ln(P_{sable}) + 0,038753 \ln(P_{argile}) + 0,032732 \ln(P_{limon}) \quad (36)$$

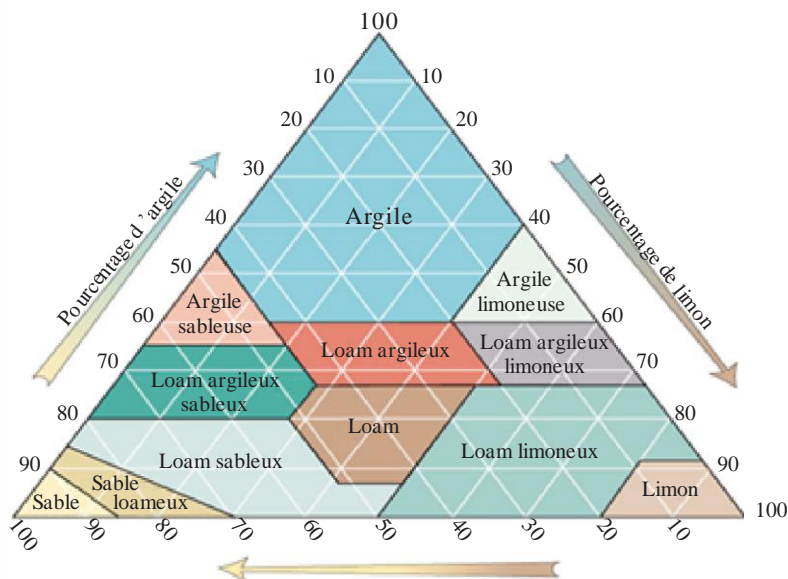
L'équation (36) n'est pas fiable si le pourcentage de l'un quelconque des constituants est inférieur à 1%. Si le pourcentage d'un constituant est inférieurs à 1%, le terme correspondant dans l'équation (36) doit être omis. La somme des pourcentages des constituants des termes inclus doit être égale à 100%.

Le Tableau 1 fournit des valeurs types de pourcentage de constituant, de densité et de densité apparente pour quatre types de sol représentatifs.

TABLEAU 1
Paramètres physiques de divers types de sol

Classe texturale de désignation du sol	1 Loam sableux	2 Loam	3 Loam limoneux	4 Argile limoneuse
% sable	51,52	41,96	30,63	5,02
% argile	13,42	8,53	13,48	47,38
% limon	35,06	49,51	55,89	47,60
ρ_r	2,66	2,70	2,59	2,56
ρ_a (g cm^{-3})	1,6006	1,5781	1,5750	1,4758

FIGURE 6
Triangle de la texture du sol



P.0527-06

La classe texturale de désignation du sol figurant dans la première colonne du Tableau 1 repose sur le triangle de texture du sol illustré à la Fig. 6.

Cette méthode de prévision considère que le sol est un mélange de quatre composants: a) particules de sol composées d'un mélange d'argile, de sable et de limon, b) air, c) eau de rétention (eau liée aux particules de sol par des forces comme la tension superficielle, pour laquelle l'épaisseur de la couche d'eau, ses constantes diélectriques et ses fréquences de relaxation sont inconnues), et d) eau gravitaire (eau qui s'écoule librement dans les creux du sol). La permittivité relative complexe du sol, ϵ_{sol} , de ce mélange de quatre composants est égale à:

$$\epsilon_{sol} = \epsilon'_{sol} - j\epsilon''_{sol} \quad (37)$$

où:

$$\epsilon'_{sol} = \left[1 + \frac{\rho_a}{\rho_r} (\{\epsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\epsilon'_{eg})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha} \quad (38)$$

$$\epsilon''_{sol} = \left[m_v^{\beta''} (\epsilon''_{eg})^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (39)$$

$$\epsilon'_{sm} = (1,01 + 0,44 \rho_r)^2 - 0,062 \quad (40)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,00519 P_{sable} - 0,00152 P_{argile} \quad (41)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,00603 P_{sable} - 0,00166 P_{argile} \quad (42)$$

et

$$\alpha = 0,65 \quad (43)$$

ϵ'_{eg} et ϵ''_{eg} sont les parties réelles et imaginaires de la permittivité relative complexe de l'eau gravitaire:

$$\epsilon'_{eg} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \epsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_r - \rho_a)}{f_{GHz} \rho_r m_v} \quad (44)$$

$$\epsilon''_{eg} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_r - \rho_a)}{f_{GHz} \rho_r m_v} \quad (45)$$

où ϵ_s , ϵ_1 , ϵ_∞ , f_1 et f_2 sont obtenus à partir des équations (8), (9), (10), (12) et (13), et σ'_{eff} et σ''_{eff} sont donnés par les formules suivantes:

$$\sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1,35) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \right) \quad (46)$$

$$\sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \quad (47)$$

et

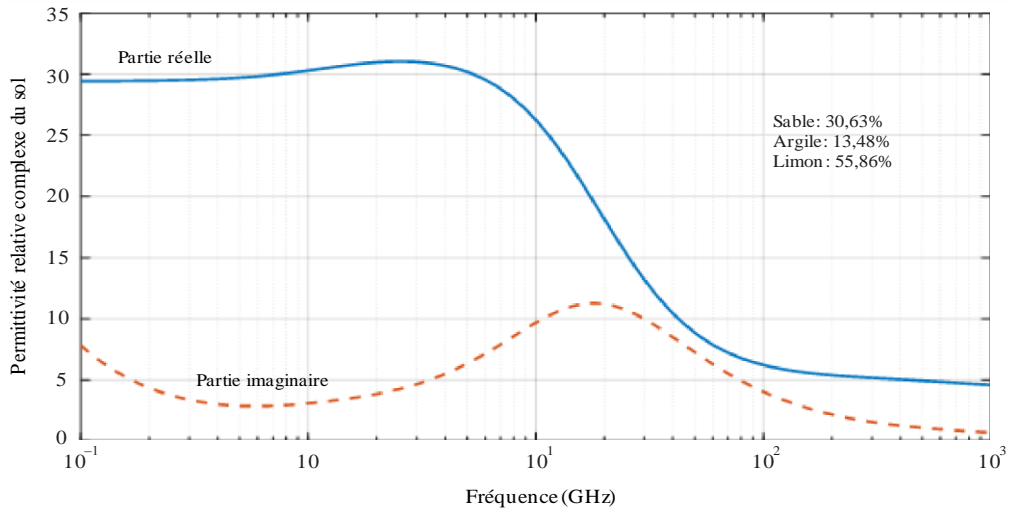
$$\sigma_1 = 0,0467 + 0,2204 \rho_a - 0,004111 P_{sable} - 0,006614 P_{argile} \quad (48)$$

$$\sigma_2 = -1,645 + 1,939 \rho_a - 0,0225622 P_{sable} + 0,01594 P_{argile} \quad (49)$$

La permittivité relative complexe de deux exemples de types de sol est présentée dans les Figs 7, 8 et 9. Dans les Figures 7 et 9, la composition du sol est la même, à l'exception de la teneur en eau volumétrique, et la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité relative complexe sont directement liées à la teneur en eau volumétrique.

FIGURE 7

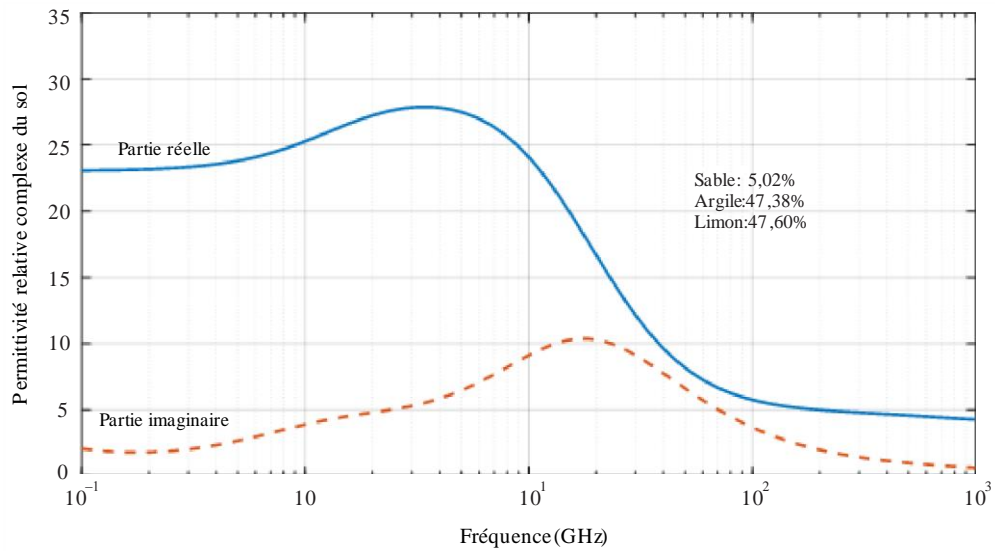
Permittivité relative complexe d'un sol de type «loam limoneux» en fonction de la fréquence
 ($m_v = 0,5$, $T = 23$ °C, $\rho_r = 2,59$, $\rho_a = 1,5750$ g cm⁻³)



P.0527-07

FIGURE 8

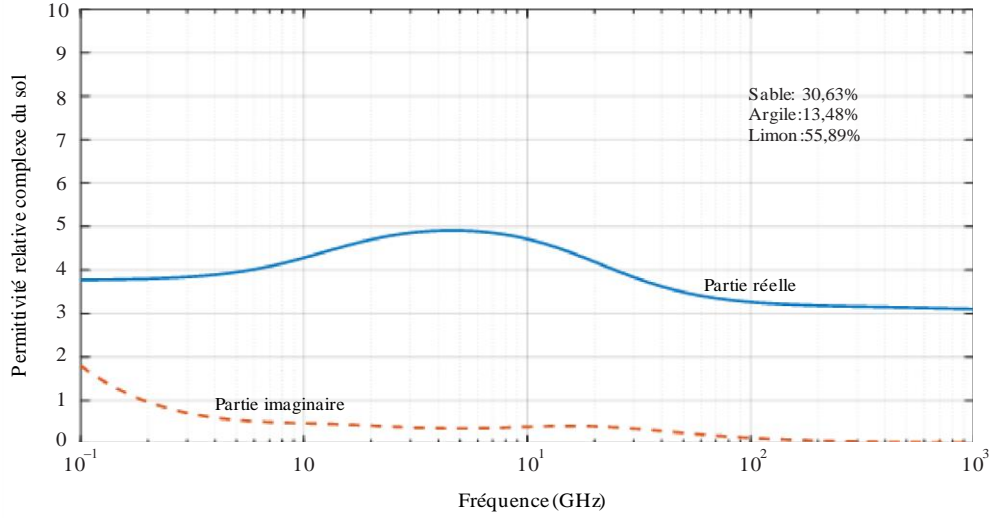
Permittivité relative complexe d'un sol de type «argile limoneuse» en fonction de la fréquence
 ($m_v = 0,5$, $T = 23$ °C, $\rho_r = 2,56$, $\rho_a = 1,4758$ g cm⁻³)



P.0527-08

FIGURE 9

Permittivité relative complexe d'un sol de type «loam limoneux» en fonction de la fréquence
($m_v = 0,07$, $T = 23$ °C, $\rho_r = 2,59$, $\rho_a = 1,5750$ g cm⁻³)



P.0527-09

5.3 Végétation

La permittivité relative complexe de la végétation est fonction de la fréquence f_{GHz} (GHz), de la température T (°C) et de la teneur en eau gravimétrique de la végétation, M_g , qui est définie par:

$$M_g = \frac{M_{vh} - M_{vs}}{M_{vh}} \quad (50)$$

M_{vh} est la masse de la végétation humide, et M_{vs} la masse de la végétation sèche. M_g est compris entre 0,0 et 0,7.

Dans cette méthode de prévision, on considère que la végétation est un mélange de végétation apparente, d'eau gravitaire salée, d'eau de rétention et de glace (le cas échéant). La permittivité relative complexe de ce mélange est donnée par:

$$\epsilon_v = \epsilon'_v - j \epsilon''_v \quad (51)$$

La partie réelle, ϵ'_v , et la partie imaginaire, ϵ''_v , de la permittivité relative complexe de la végétation sont indiquées au § 5.3.1 pour les températures au-dessus du point de congélation et au § 5.3.2 pour les températures au-dessous de ce point.

5.3.1 Températures au-dessus du point de congélation

Aux températures au-dessus du point de congélation ($T > 0$ °C), les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe de la végétation sont:

$$\epsilon'_v = \epsilon_{vs} + v_{eg} \left[\epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \right] + v_{er} \left[2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)} \right] \quad (52)$$

$$\epsilon''_v = v_{eg} \left[\frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma_{es}}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{er} \left[\frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)} \right] \quad (53)$$

où ϵ_{vs} est la partie réelle de la permittivité relative de la masse végétale, v_{eg} la fraction volumique d'eau gravitaire, et v_{er} la fraction volumique d'eau de rétention, avec:

$$\epsilon_{vs} = 1,7 - 0,74 M_g + 6,16 M_g^2 \quad (54)$$

$$v_{eg} = M_g(0,55 M_g - 0,076) \quad (55)$$

$$v_{er} = 4,64 M_g^2 / (1 + 7,36 M_g^2) \quad (56)$$

σ_{eS} est la conductivité électrique de l'eau salée donnée dans les équations (22) à (27), où la salinité, S , est égale à:

$$S = -28,7 M_g + 34,83 \quad \left(\frac{g}{kg}\right) \quad (57)$$

et ϵ_s , ϵ_1 , ϵ_∞ , f_1 et f_2 sont obtenus à partir des équations (8), (9), (10), (12) et (13) respectivement.

Pour une température de 22 °C et une gamme de fréquences allant jusqu'à 40 GHz, les équations (52) et (53) sont modifiées comme suit:

$$\epsilon'_v = \epsilon_{vs} + v_{eg} \left[4,9 + \frac{75}{1 + (f_{GHz}/18)^2} \right] + v_{er} \left[2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{GHz}/0,36)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{GHz}/0,36)} + (f_{GHz}/0,18)} \right] \quad (58)$$

$$\epsilon''_v = v_{eg} \left[\frac{75(f_{GHz}/18)}{1 + (f_{GHz}/18)^2} + \frac{22,86}{f_{GHz}} \right] + v_{er} \left[\frac{55\sqrt{(f_{GHz}/0,36)}}{1 + 2\sqrt{(f_{GHz}/0,36)} + (f_{GHz}/0,18)} \right] \quad (59)$$

Les équations (58) et (59) sont plus générales que l'équation (16) de la Recommandation UIT-R P.833, car elles prennent en compte l'eau gravitaire et l'eau de rétention et aussi parce qu'elles intègrent la dépendance à la température.

Les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe de la végétation en fonction de la fréquence pour deux valeurs différentes de la teneur en eau gravimétrique sont illustrées dans les Figs 10 et 11, qui montrent que la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité relative complexe de la végétation augmentent lorsque la teneur en eau gravimétrique croît.

FIGURE 10
 Permittivité relative complexe de la végétation en fonction de la fréquence
 ($M_g = 0,68, T = 22 \text{ °C}$)

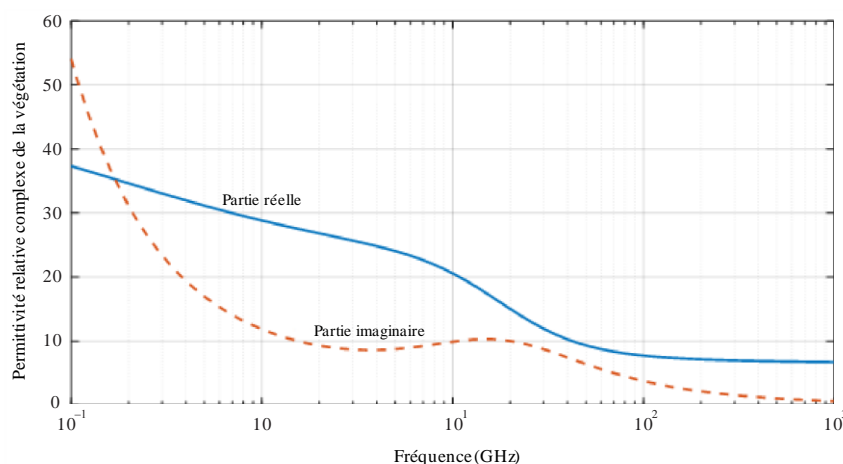
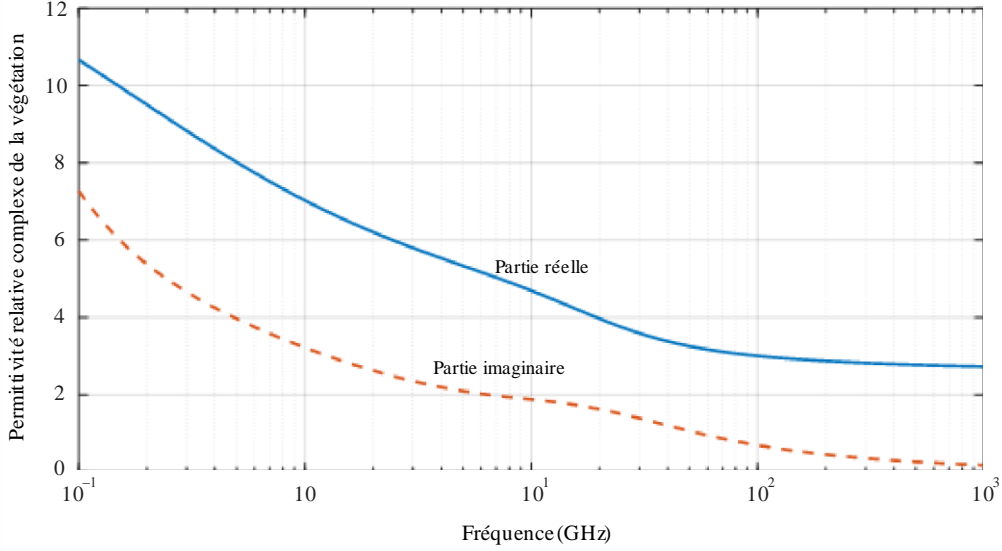


FIGURE 11
Permittivité relative complexe de la végétation en fonction de la fréquence
($M_g = 0,26, T = 22 \text{ °C}$)



P.0527-11

5.3.2 Températures au-dessous du point de congélation

Dans le cas des températures au-dessous du point de congélation ($-20 \text{ °C} \leq T < 0 \text{ °C}$), les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe sont données par:

$$\varepsilon'_V = \varepsilon_{vs} + v_{eg} \left[4,9 + \frac{82,2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{er} [8,092 + 14,2067 X1] + 3,15 v_{glace} \quad (60)$$

$$\varepsilon''_V = v_{eg} \left[\frac{82,2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11,394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14,2067 v_{er} Y1 \quad (61)$$

où:

$$\varepsilon_{vs} = 6,76 - 10,24 M_g + 6,19 M_g^2 \quad (62)$$

$$v_{eg} = (-0,106 + 0,6591 M_g - 0,610 M_g^2) \exp\left((0,06 + 0,6883 M_g + 0,0001 M_g^2) \Delta\right) \quad (63)$$

$$v_{er} = (-0,16 + 1,1876 M_g - 0,387 M_g^2) \exp\left((0,721 - 1,2733 M_g + 0,8139 M_g^2) \Delta\right) \quad (64)$$

$$v_{glace} = A_{glace} \Delta^2 + B_{glace} \Delta + C_{glace} \quad (65)$$

$$A_{glace} = 0,001 - 0,012 M_g + 0,0082 M_g^2 \quad (66)$$

$$B_{glace} = 0,036 - 0,2389 M_g + 0,1435 M_g^2 \quad (67)$$

$$C_{glace} = -0,0538 + 0,4616 M_g - 0,3398 M_g^2 \quad (68)$$

$$X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}} \quad (69)$$

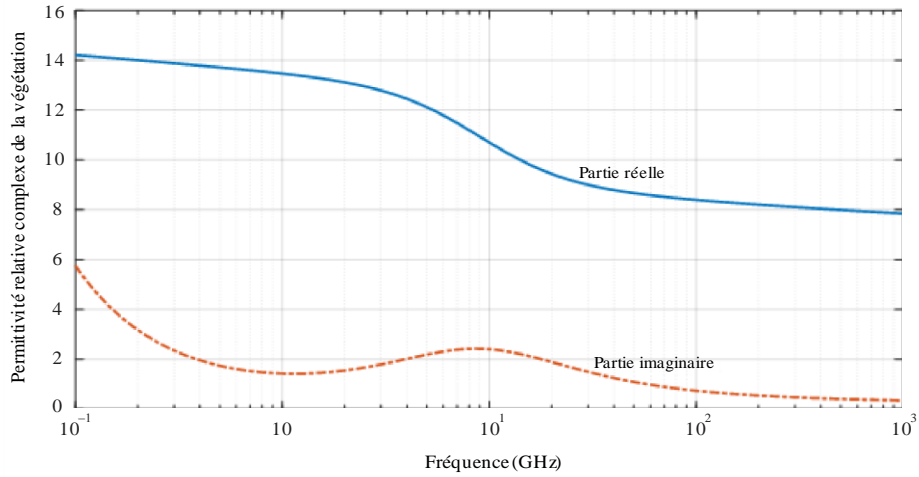
$$Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \sin(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}} \quad (70)$$

$$\Delta = T - T_f \quad (71)$$

Et la température de congélation de la végétation, T_f , est $-6,5 \text{ °C}$.

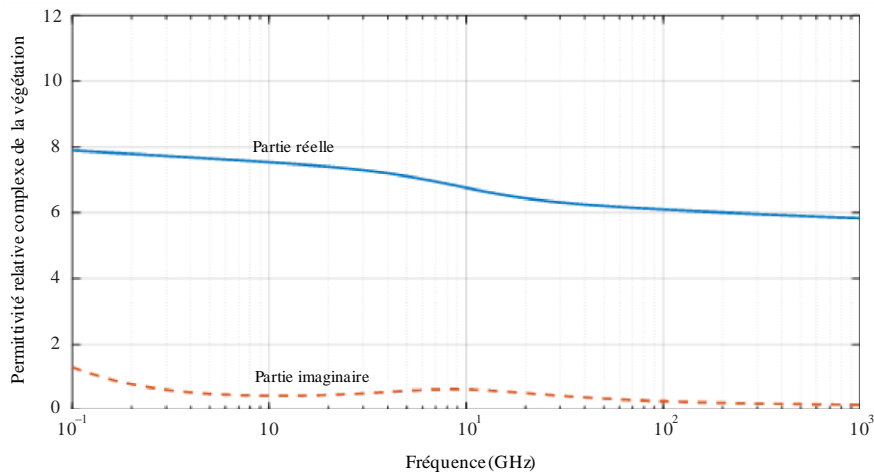
Les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe en fonction de la fréquence et de la température sont illustrées dans les Figs 12 et 13. Ces figures montrent que lorsque la température descend au-dessous du point de congélation, les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe de la végétation diminuent, et la dépendance de ces paramètres à la fréquence décroît. Pour les fréquences supérieures à 20 GHz, la permittivité relative complexe de la végétation devient moins dépendante de la température.

FIGURE 12
Permittivité relative complexe de la végétation en fonction de la fréquence
 ($M_g = 0,68, T = -7 \text{ }^\circ\text{C}$)



P.0527-12

FIGURE 13
Permittivité relative complexe de la végétation en fonction de la fréquence
 ($M_g = 0,68, T = -10 \text{ }^\circ\text{C}$)



P.0527-13

Appendice

à l'Annexe 1

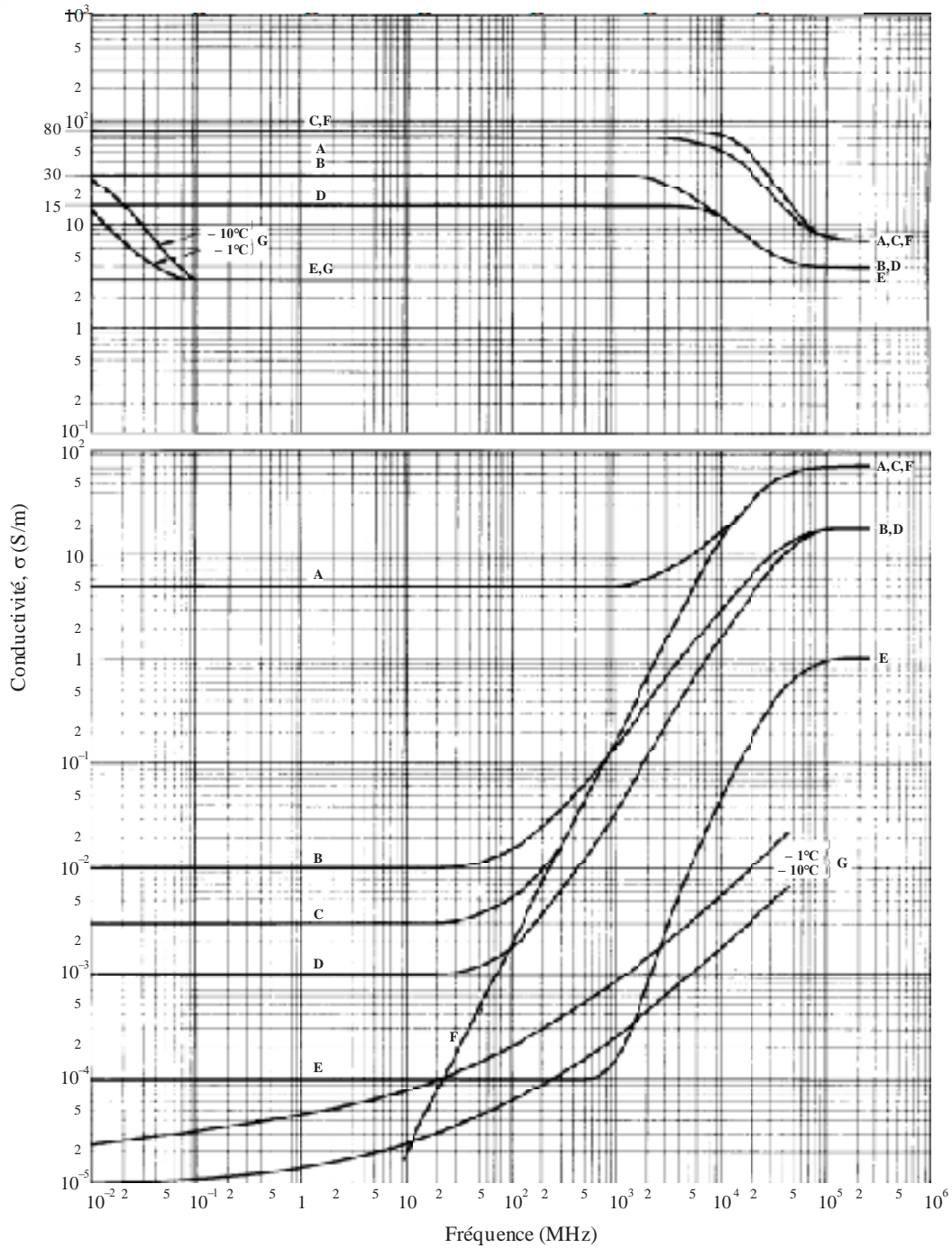
Propriétés électriques exprimées sous la forme de la permittivité et de la conductivité tel qu'utilisé dans les Recommandations UIT-R P.368 et UIT-R P.832

1 Introduction

La Figure 14 ci-dessous est reproduite de la Fig. 1, qui donne les valeurs représentatives de conductivité et de permittivité pour différents types de sol, en fonction de la fréquence. Ces graphiques sont repris de révisions antérieures de la présente Recommandation par souci de commodité pour les utilisateurs des Recommandations UIT-R P.386 et UIT-R P.832.

FIGURE 14

Permittivité relative, ϵ_r , et conductivité, σ , en fonction de la fréquence



- A: eau de mer (salinité moyenne), 20° C
- B: sol humide
- C: eau douce, 20° C
- D: sol moyennement sec
- E: sol très sec
- F: eau pure, 20° C
- G: glace (eau douce)