

RECOMMANDATION UIT-R P.368-7*

**COURBES DE PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL
ENTRE 10 kHz ET 30 MHz**

(1951-1959-1963-1970-1974-1978-1982-1986-1990-1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

qu'il est utile, étant donné la complexité du calcul, de disposer d'un jeu de courbes d'onde de sol pour un certain nombre de valeurs types de fréquences et de caractéristiques du sol,

recommande

1. que l'on adopte les courbes de l'Annexe 1, utilisées dans les conditions spécifiées ci-dessous, pour déterminer le champ de l'onde de sol aux fréquences entre 10 kHz et 30 MHz;
2. que, en règle générale, on n'utilise ces courbes pour déterminer le champ que dans le cas où l'on peut prévoir avec certitude une amplitude négligeable des réflexions ionosphériques;
3. que l'on n'utilise pas ces courbes pour les applications dans lesquelles l'antenne de réception est située à une hauteur considérable au-dessus de la surface de la Terre;

Note 1 – C'est-à-dire que, lorsque $\varepsilon_r \ll 60 \lambda \sigma$, les courbes sont utilisables jusqu'à une hauteur $h = 1,2 \sigma^{1/2} \lambda^{3/2}$. Les courbes de propagation pour des hauteurs de terminal jusqu'à 3 000 m et pour des fréquences jusqu'à 10 GHz figurent dans le Manuel des courbes de propagation des ondes radioélectriques au-dessus de la surface de la Terre, publié séparément par l'UIT;

4. que l'on utilise aussi ces courbes, établies pour des trajets homogènes dans les conditions fixées à l'Annexe 1, pour déterminer le champ sur des trajets mixtes, comme indiqué à l'Annexe 2.

ANNEXE 1

Courbes de propagation et conditions de validité (trajets homogènes)

Les courbes de propagation de la présente Recommandation sont calculées à partir des hypothèses suivantes:

- elles se réfèrent à une terre sphérique et homogène;
- dans la troposphère, l'indice de réfraction décroît exponentiellement avec la hauteur comme indiqué à la Recommandation UIT-R P.453;
- les antennes d'émission et de réception sont toutes deux situées au sol;

* 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.

- l'élément rayonnant est une antenne monopole verticale courte. En supposant que cette antenne verticale soit située à la surface d'une Terre assimilée à un plan parfaitement conducteur, et qu'elle soit excitée de manière à rayonner une puissance de 1 kW, le champ rayonné à 1 km de distance aurait une valeur de 300 mV/m; ceci correspond à une force cymomotrice de 300 V (voir la Recommandation UIT-R P.525);
- les courbes sont tracées pour des distances mesurées autour de la surface courbe de la Terre;
- les courbes donnent la valeur de la composante verticale du champ de rayonnement, c'est-à-dire celle qui peut être effectivement mesurée dans la région du champ lointain de l'antenne.

Note 1 – La courbe en tireté, intitulée «inverse de la distance», à laquelle les courbes sont asymptotiques pour les courtes distances, passe par la valeur de champ de 300 mV/m à une distance de 1 km; pour appliquer les courbes aux autres antennes de référence, voir le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.341.

Note 2 – On a utilisé pour le calcul des courbes le programme informatique GRWAVE qui est brièvement décrit à l'Annexe 3.

Note 3 – L'affaiblissement de propagation correspondant aux mêmes conditions pour lesquelles les courbes ont été calculées peut être obtenu à partir de la valeur du champ E (dB(μ V/m)) grâce à la formule suivante:

$$L_b \equiv A_i = 142,0 + 20 \log f_{\text{MHz}} - E \quad \text{dB}$$

Pour déterminer l'influence du milieu environnant sur l'antenne d'émission et sur l'antenne de réception, voir la Recommandation UIT-R P.341.

Note 4 – Les courbes fournissent la valeur du champ total à la distance r avec une erreur inférieure à 1 dB lorsque kr est supérieur à 10 environ, avec $k = 2\pi/\lambda$. On peut inclure les effets de champ proche (c'est-à-dire l'induction et le champ statique) en augmentant le champ (dB) de:

$$10 \log \left\{ 1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4} \right\}$$

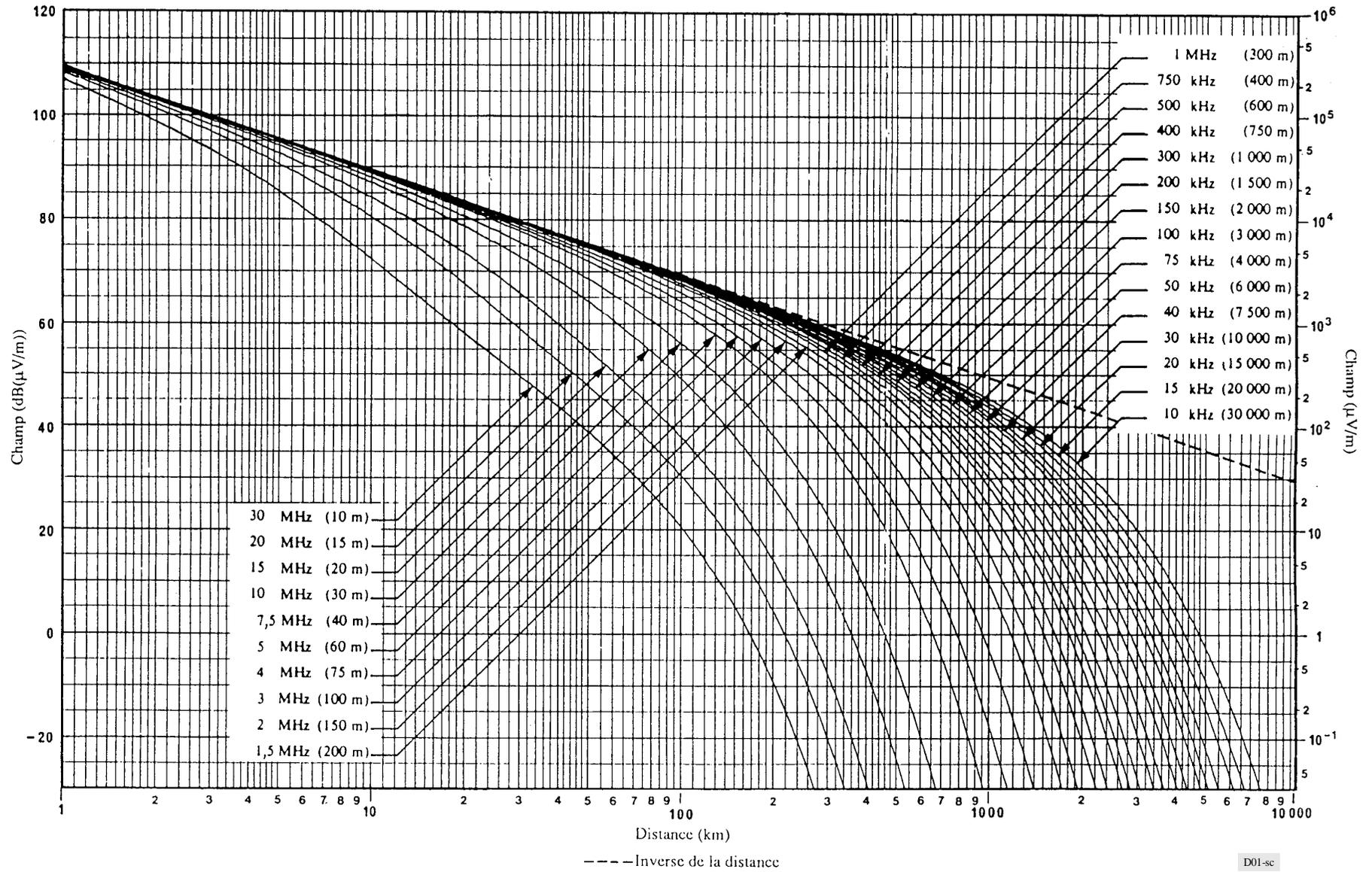
On obtient ainsi le champ total à $\pm 0,1$ dB près pour la mer et un sol humide et à ± 1 dB près pour n'importe quel sol de conductivité supérieure à 10^{-3} S/m.

Note 5 – Si l'emplacement de l'une ou l'autre des antennes est situé plus haut que la hauteur moyenne du terrain le long du trajet entre les antennes, la hauteur équivalente de l'antenne est la hauteur de l'antenne au-dessus de la hauteur moyenne du terrain le long du trajet. Il faut comparer la valeur de la hauteur équivalente de l'antenne avec la valeur calculée de la hauteur limite d'antenne donnée au § 3 de la présente Recommandation pour déterminer si les courbes sont applicables au trajet considéré.

Les Fig. 1 à 11 donnent les courbes de champ en fonction de la distance, avec la fréquence comme paramètre.

FIGURE 1

Courbes de propagation de l'onde de sol. Eau de mer, salinité faible, $\sigma = 1 \text{ S/m}$, $\epsilon = 80$



Rec. UIT-R P.368-7

FIGURE 2

Courbes de propagation de l'onde de sol. Eau de mer, salinité moyenne, $\sigma = 5 \text{ S/m}$, $\epsilon = 70$

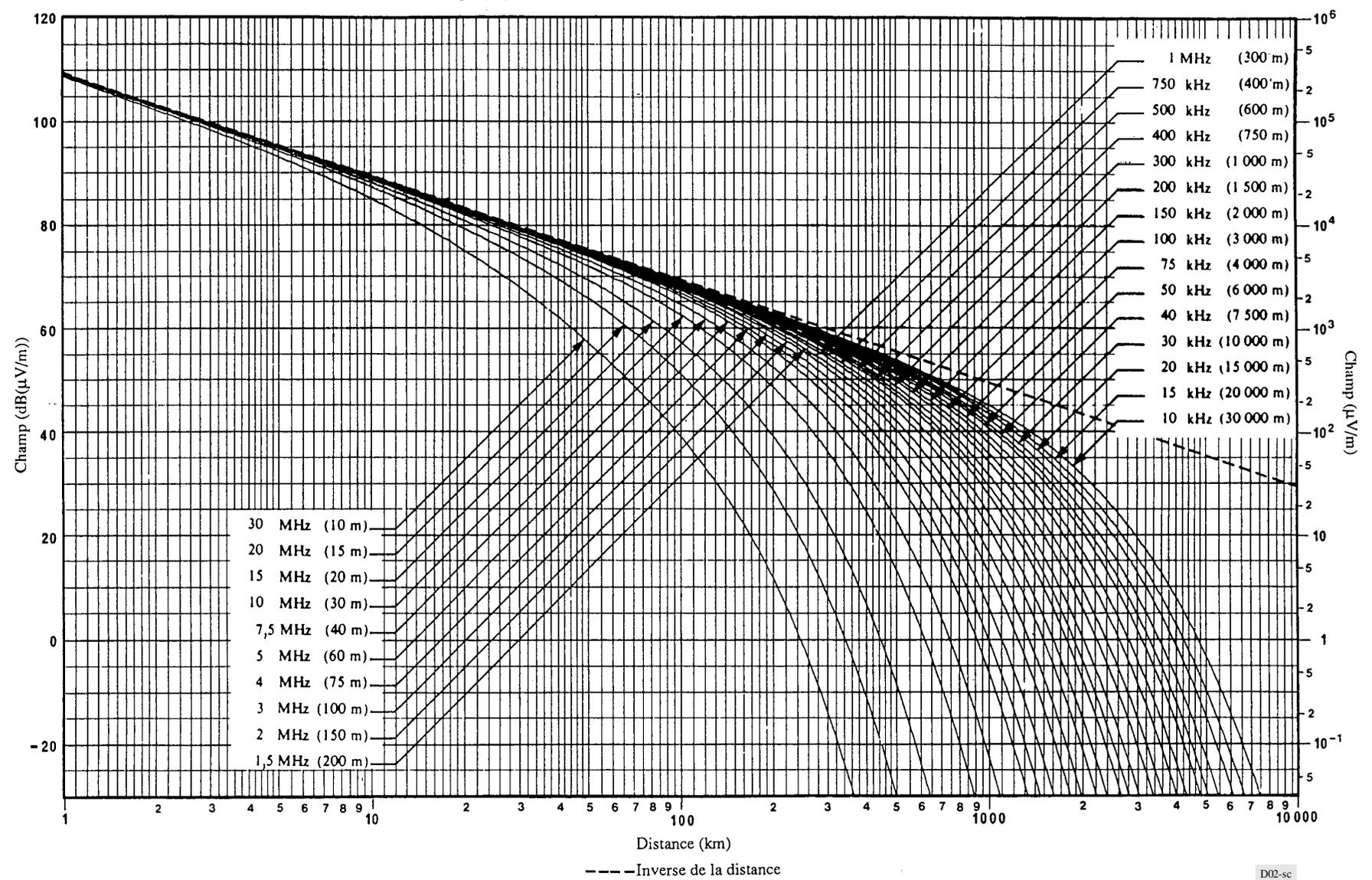
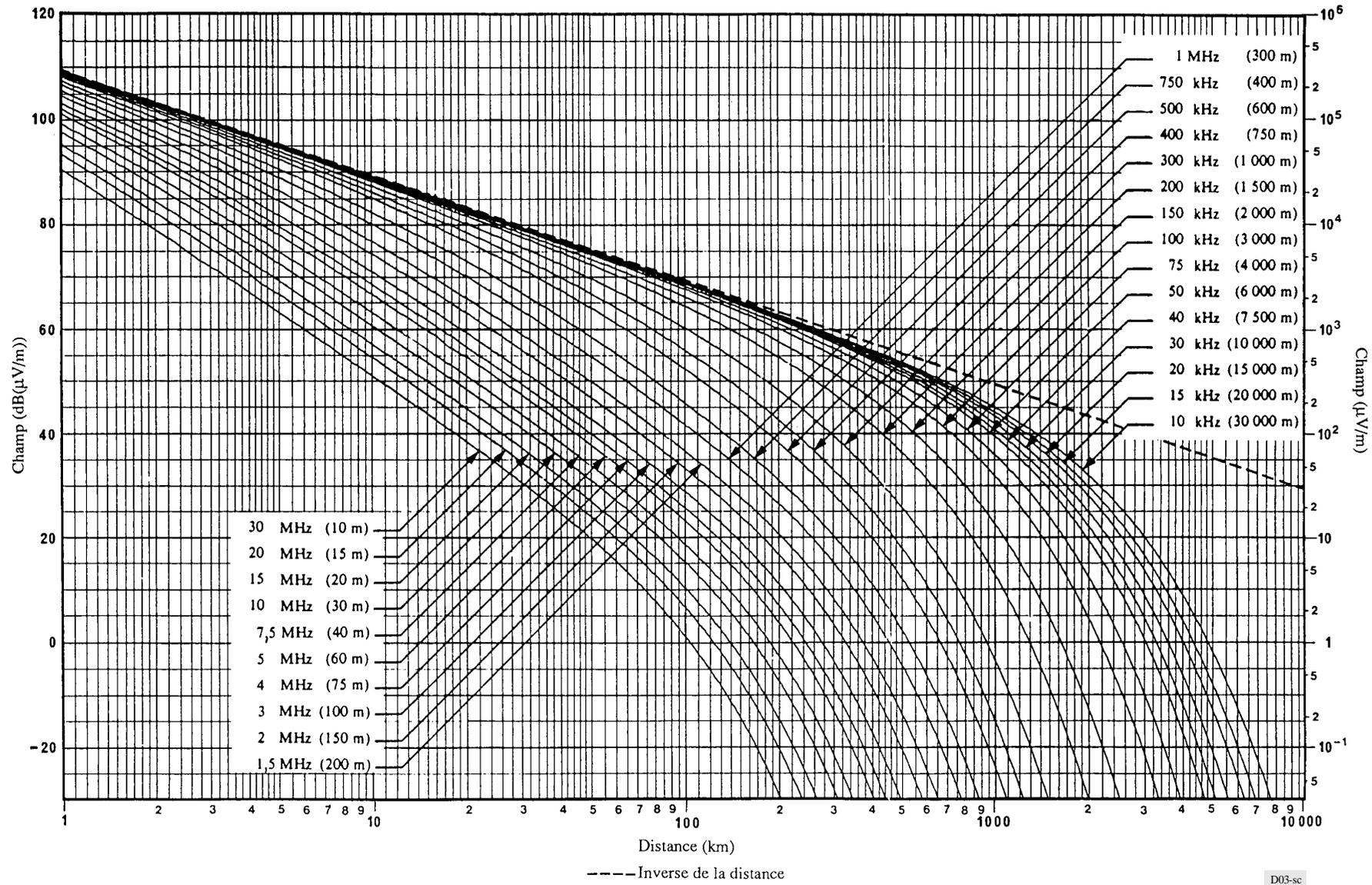


FIGURE 3

Courbes de propagation de l'onde de sol. Eau douce, $\sigma = 3 \times 10^{-3} \text{ S/m}$, $\epsilon = 80$

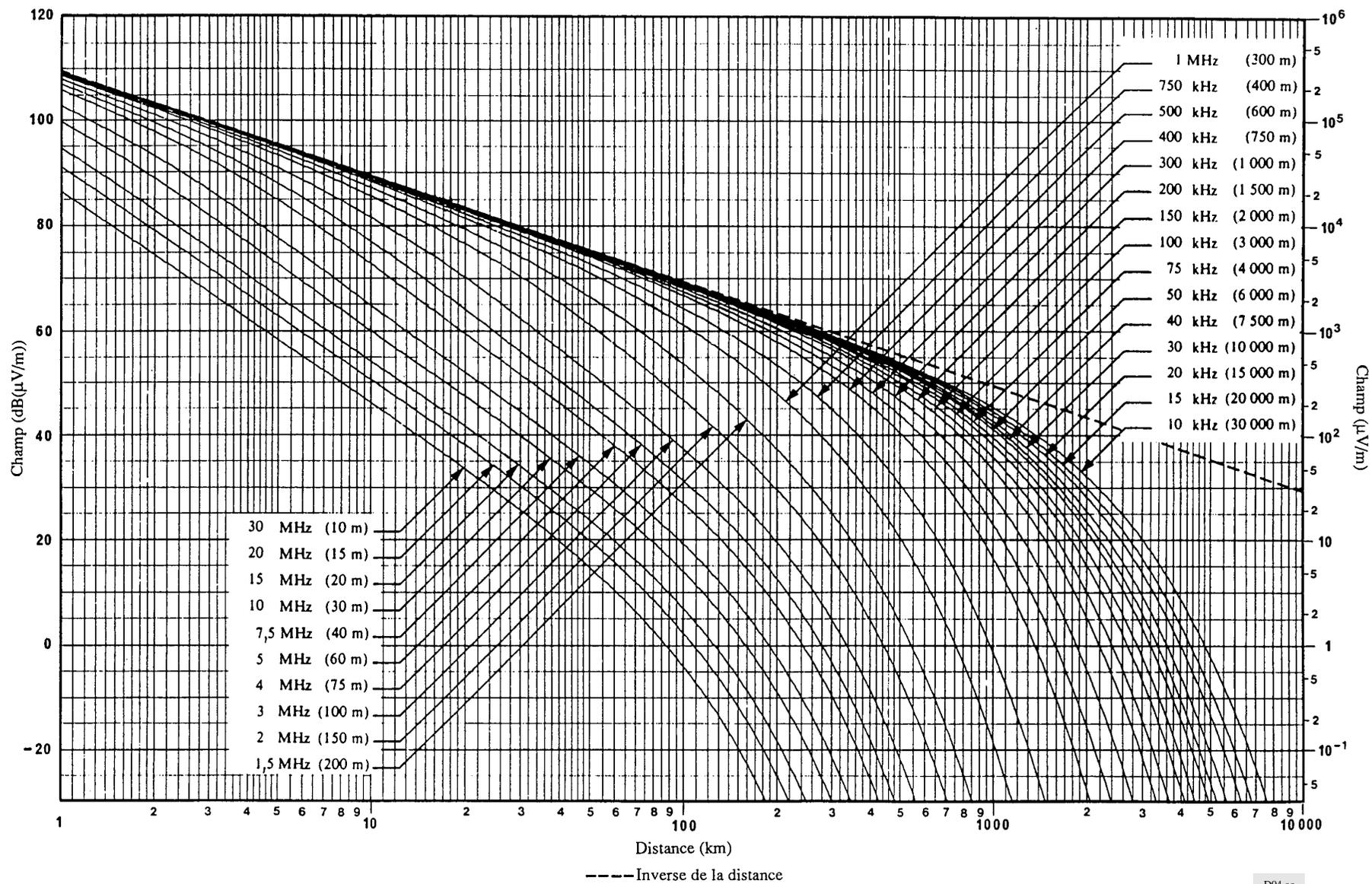


Rec. UIT-R P.368-7

D03-sc

FIGURE 4

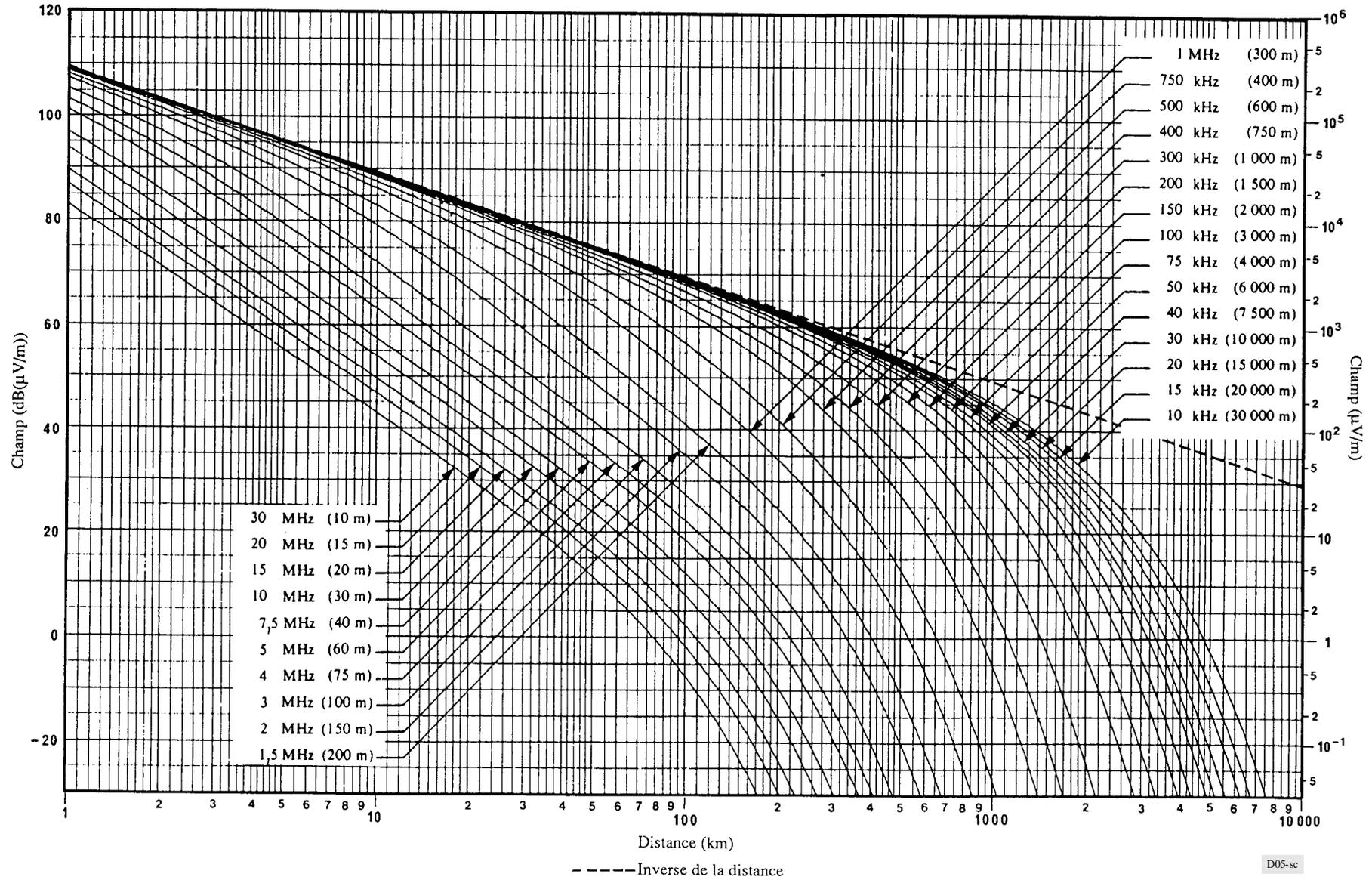
Courbes de propagation de l'onde de sol. Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-2}$ S/m, $\epsilon = 40$



D04-sc

FIGURE 5

Courbes de propagation de l'onde de sol. Sol humide, $\sigma = 10^{-2}$ S/m, $\epsilon = 30$

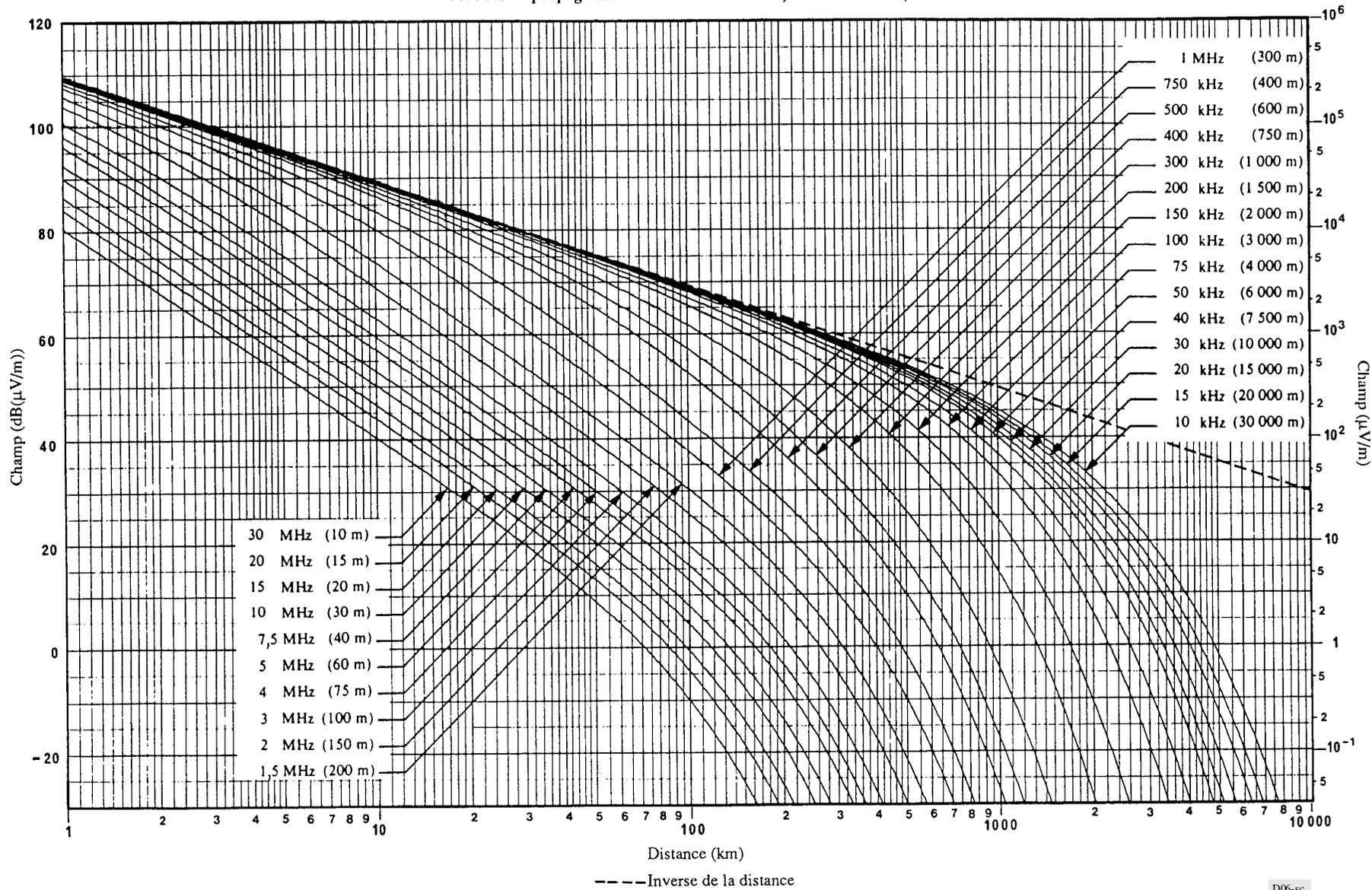


Rec. UIT-R P.368-7

D05-sc

FIGURE 6

Courbes de propagation de l'onde de sol. Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 22$



D06-sc

FIGURE 7

Courbes de propagation de l'onde de sol. Sol moyennement sec, $\sigma = 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 15$

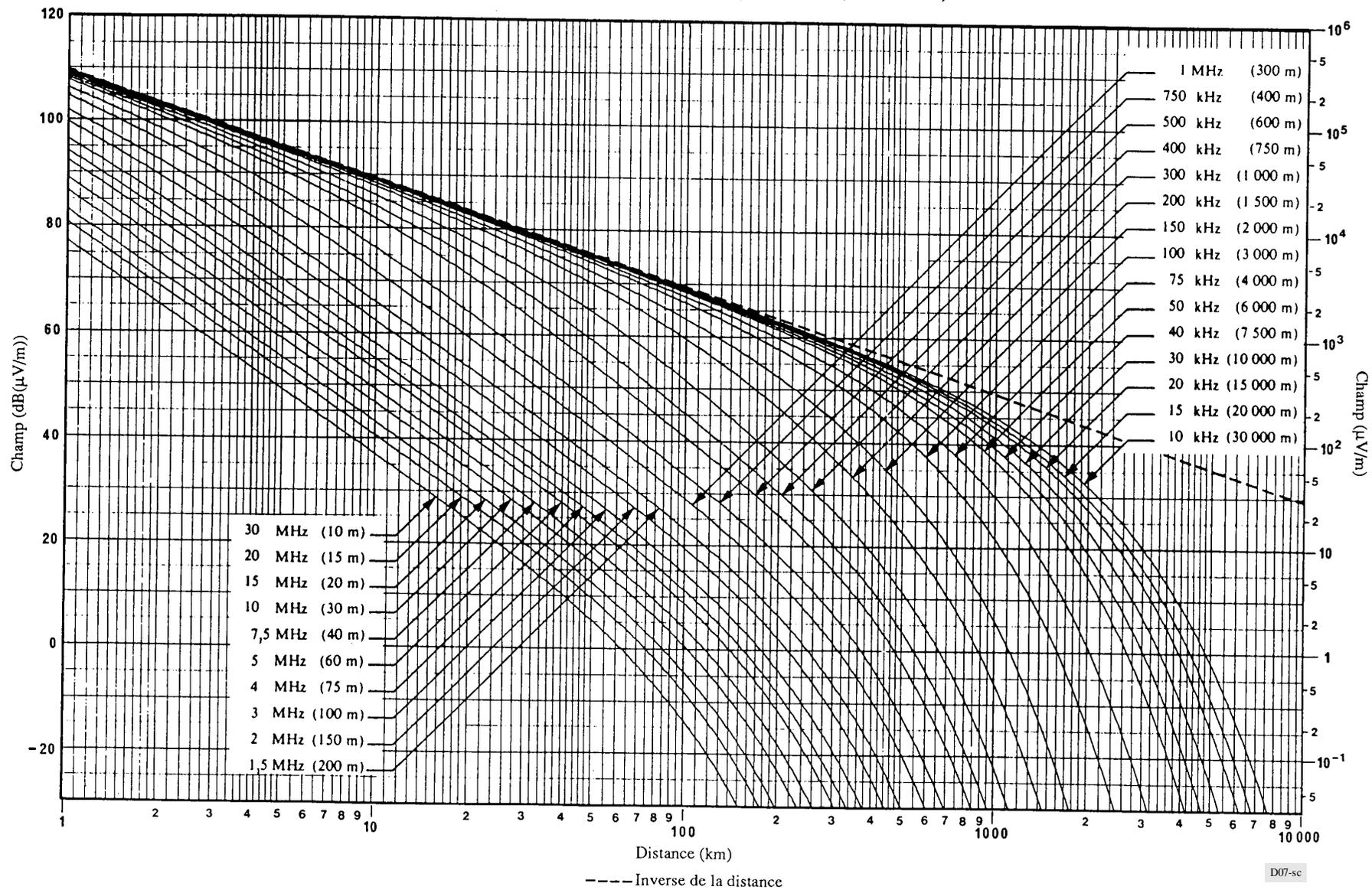


FIGURE 8

Courbes de propagation de l'onde de sol. Sol sec, $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 7$

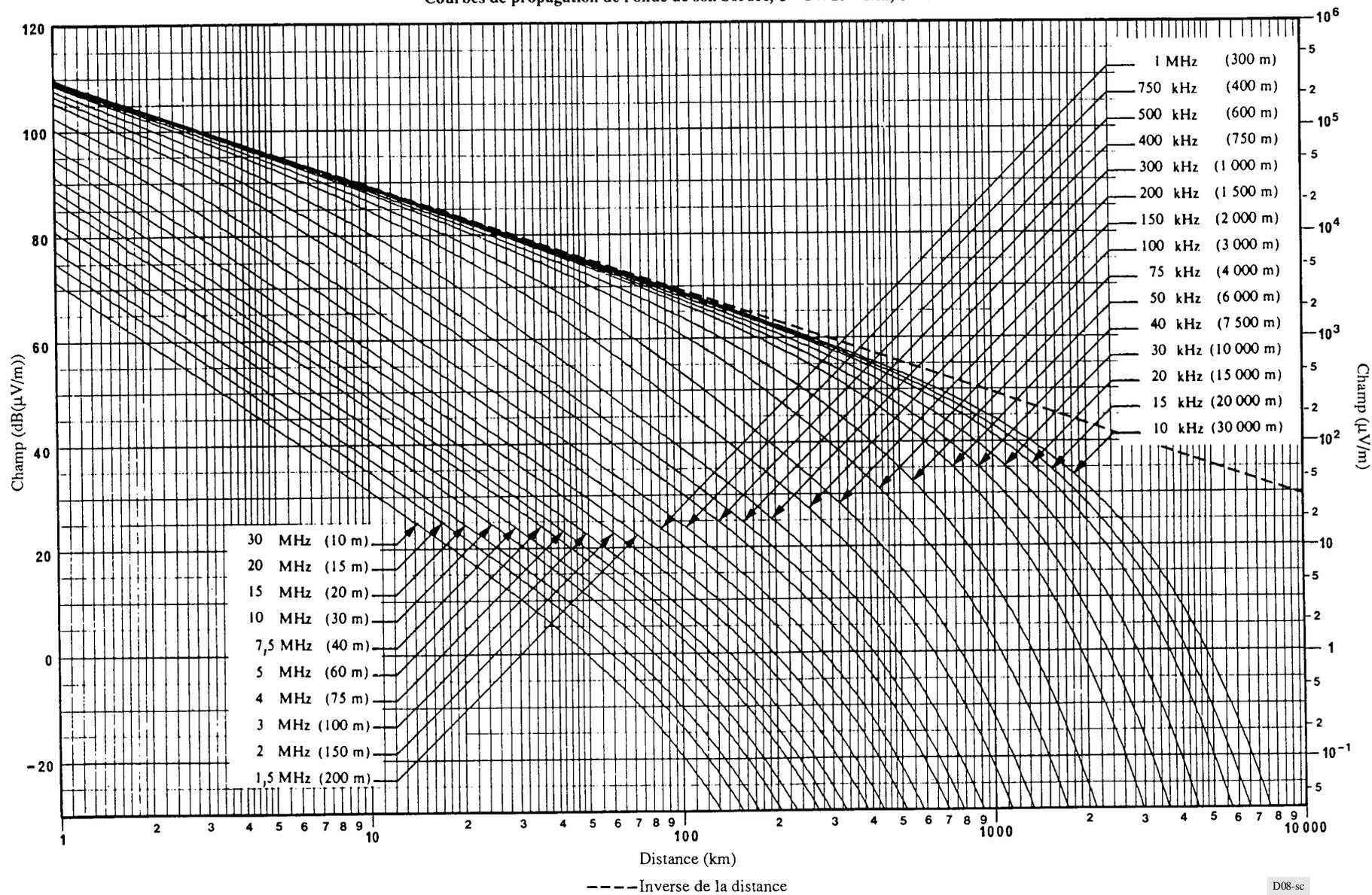
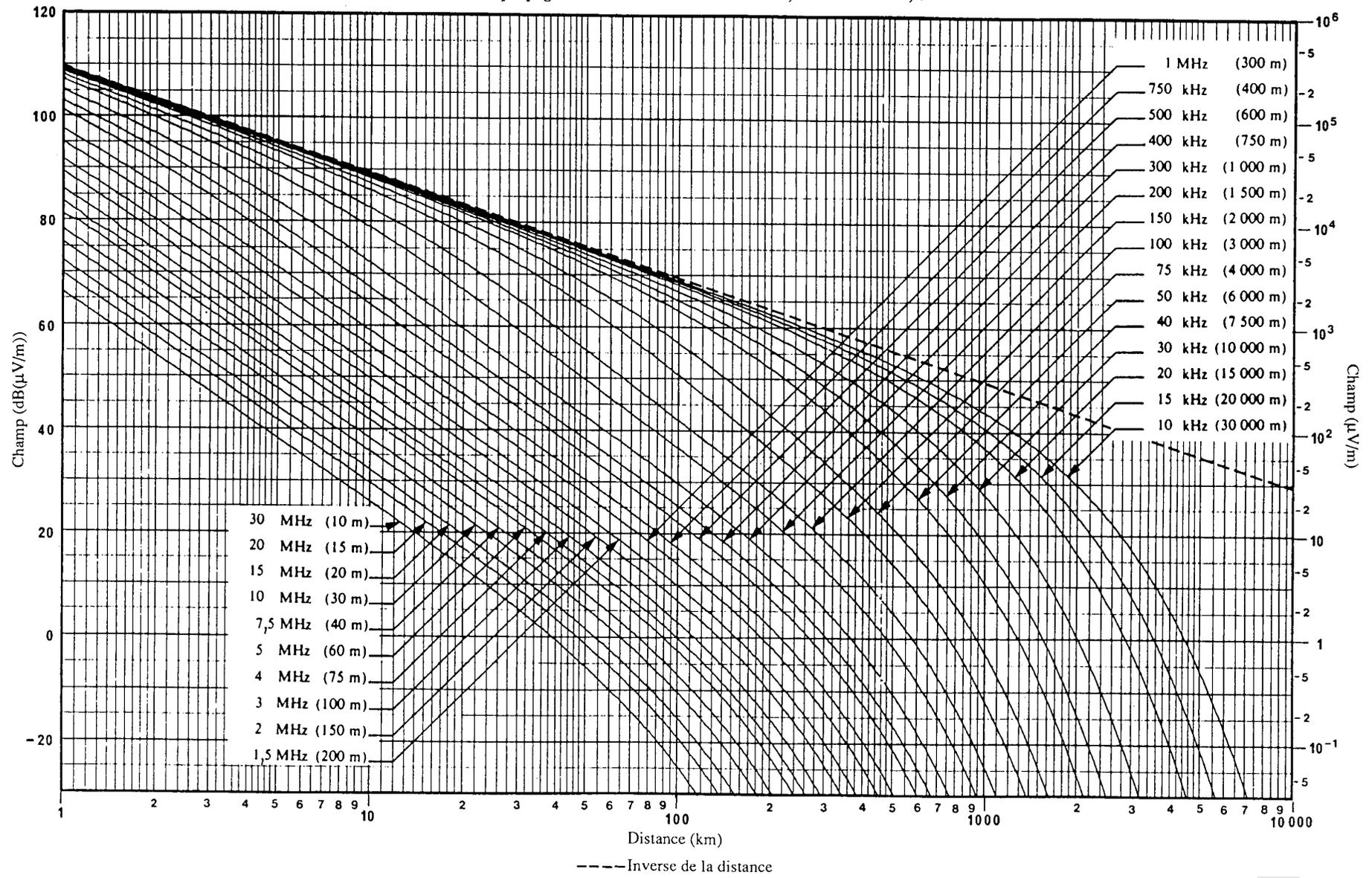


FIGURE 9

Courbes de propagation de l'onde de sol. Sol très sec, $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 3$



Rec. UIT-R P.368-7

FIGURE 10

Courbes de propagation de l'onde de sol. Glace d'eau douce, -1°C , $\sigma = 3 \times 10^{-5} \text{ S/m}$, $\epsilon = 3$

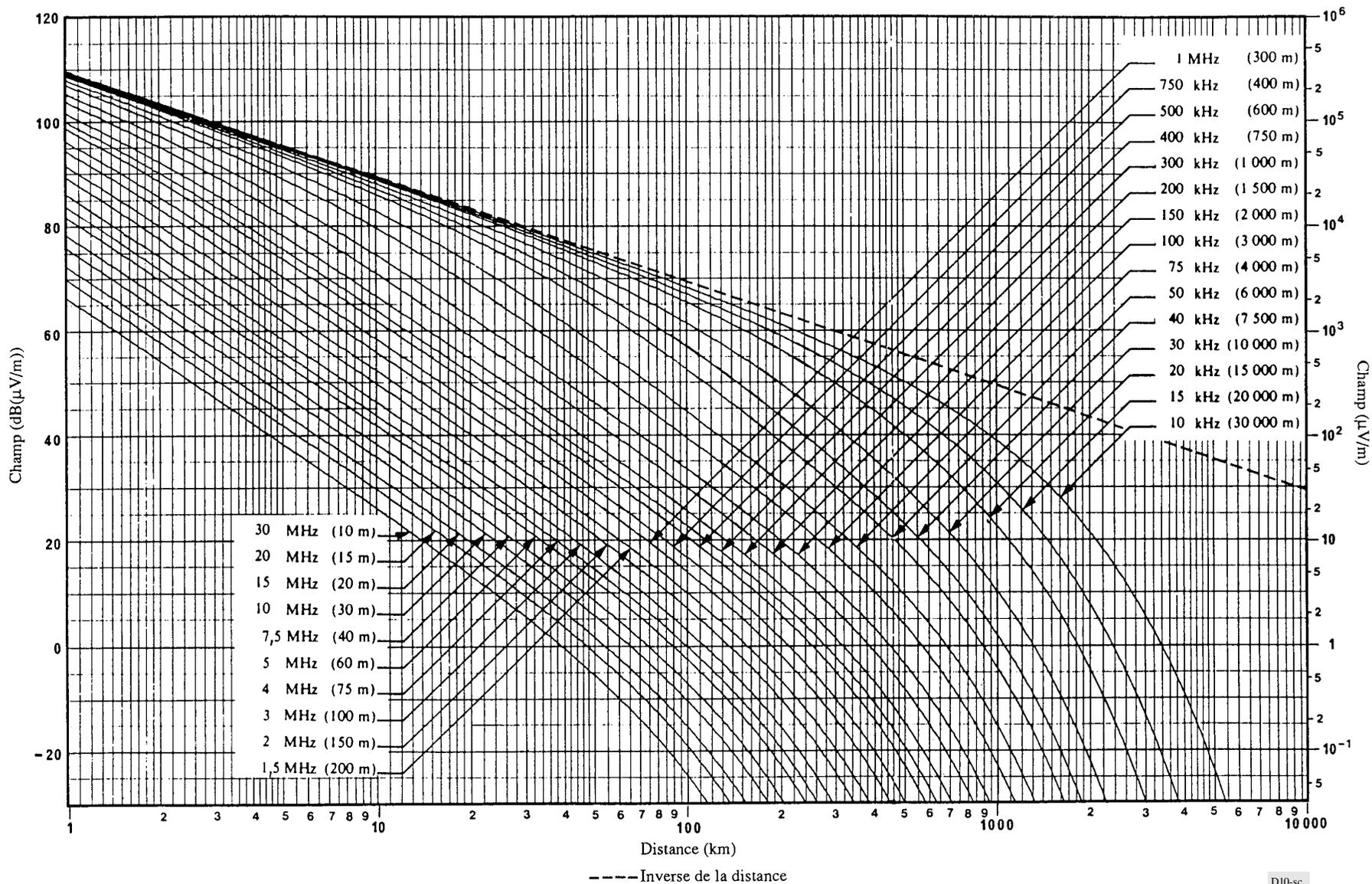
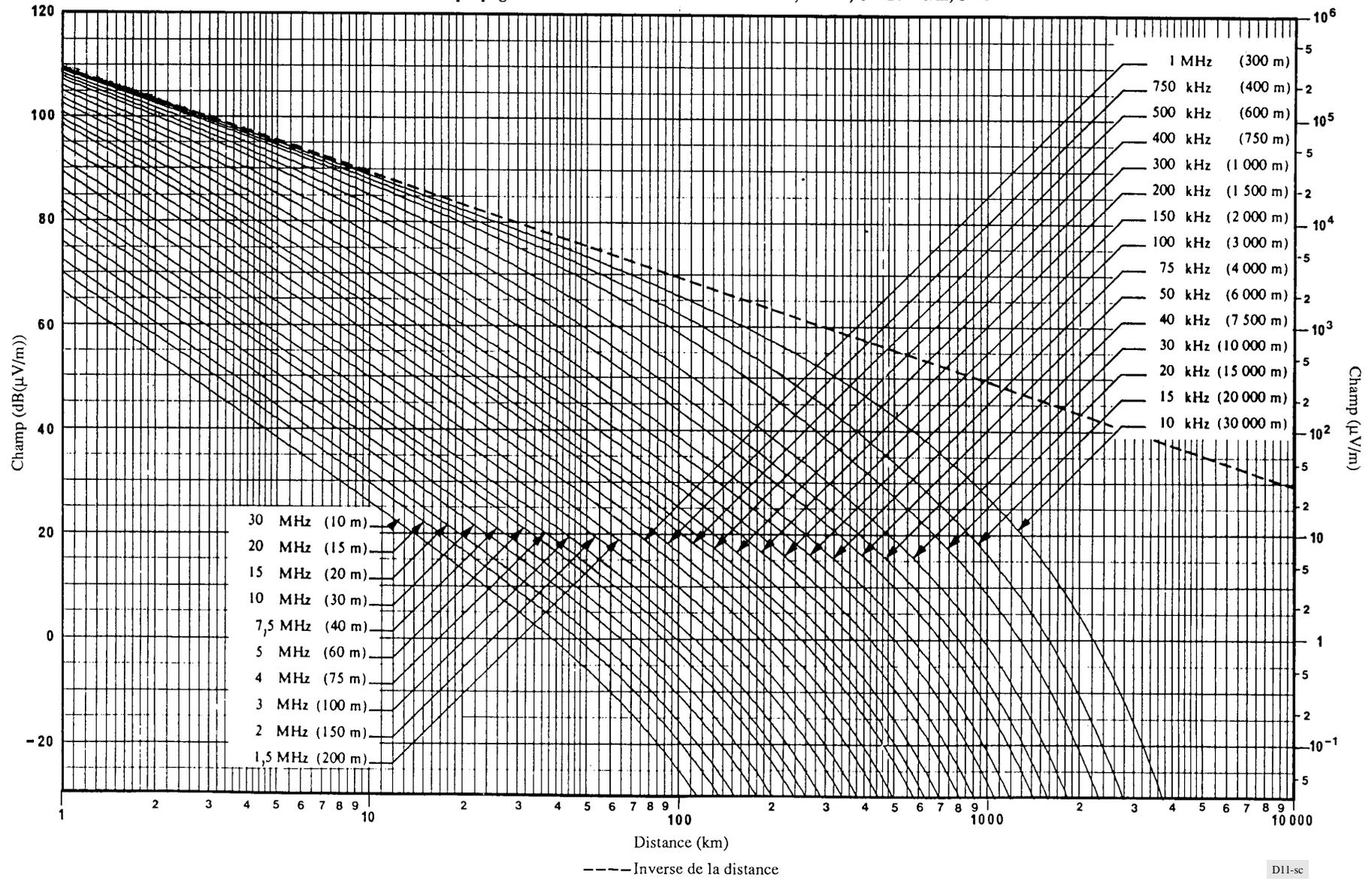


FIGURE 11

Courbes de propagation de l'onde de sol. Glace d'eau douce, -10°C , $\sigma = 10^{-5} \text{ S/m}$, $\epsilon = 3$



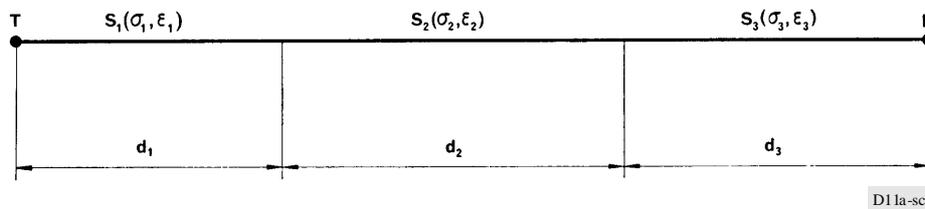
Rec. UIT-R P.368-7

ANNEXE 2

Application aux trajets mixtes (trajets hétérogènes)

1. Les Fig. 14 à 50 de la présente Annexe peuvent être utilisées pour déterminer la propagation sur des trajets mixtes (surface terrestre hétérogène et peu accidentée), de la façon suivante:

Ces trajets peuvent être constitués de sections S_1 , S_2 , S_3 , etc., de longueurs d_1 , d_2 , d_3 , etc., ayant des conductivités et des permittivités respectives σ_1, ϵ_1 ; σ_2, ϵ_2 ; σ_3, ϵ_3 , etc., comme le montre le schéma ci-dessous pour trois sections:



La méthode de Millington, utilisée dans cette Annexe, pour déterminer la propagation sur des trajets mixtes est, parmi les méthodes disponibles, la plus précise et satisfait à la condition de réciprocité. Avec cette méthode, on suppose que des courbes sont disponibles pour les différents types de terrain correspondant aux sections S_1 , S_2 , S_3 , etc., supposées individuellement homogènes, et se rapportant toutes à la même source T définie, par exemple, par une courbe «inverse de la distance». Les valeurs pour toute autre source pourront ensuite être obtenues par l'application d'un coefficient.

On choisit pour une fréquence donnée, la courbe correspondant à la section S_1 et l'on relève le champ $E_1(d_1)$ en dB(μ V/m) à la distance d_1 . La courbe correspondant à la section S_2 permet d'obtenir ensuite les champs $E_2(d_1)$ et $E_2(d_1 + d_2)$ puis on trouve, de façon similaire, à l'aide de la courbe s'appliquant à la section S_3 , les champs $E_3(d_1 + d_2)$ et $E_3(d_1 + d_2 + d_3)$ et ainsi de suite.

Le champ à la réception E_R est alors défini par l'expression:

$$E_R = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) \quad (1)$$

On inverse alors le processus en appelant R l'émetteur et T le récepteur; on obtient ainsi un champ E_T défini par l'expression:

$$E_T = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1) \quad (2)$$

Le champ recherché est donné par $\frac{1}{2}[E_R + E_T]$, la manière d'étendre le calcul à un nombre plus grand de sections étant évidente.

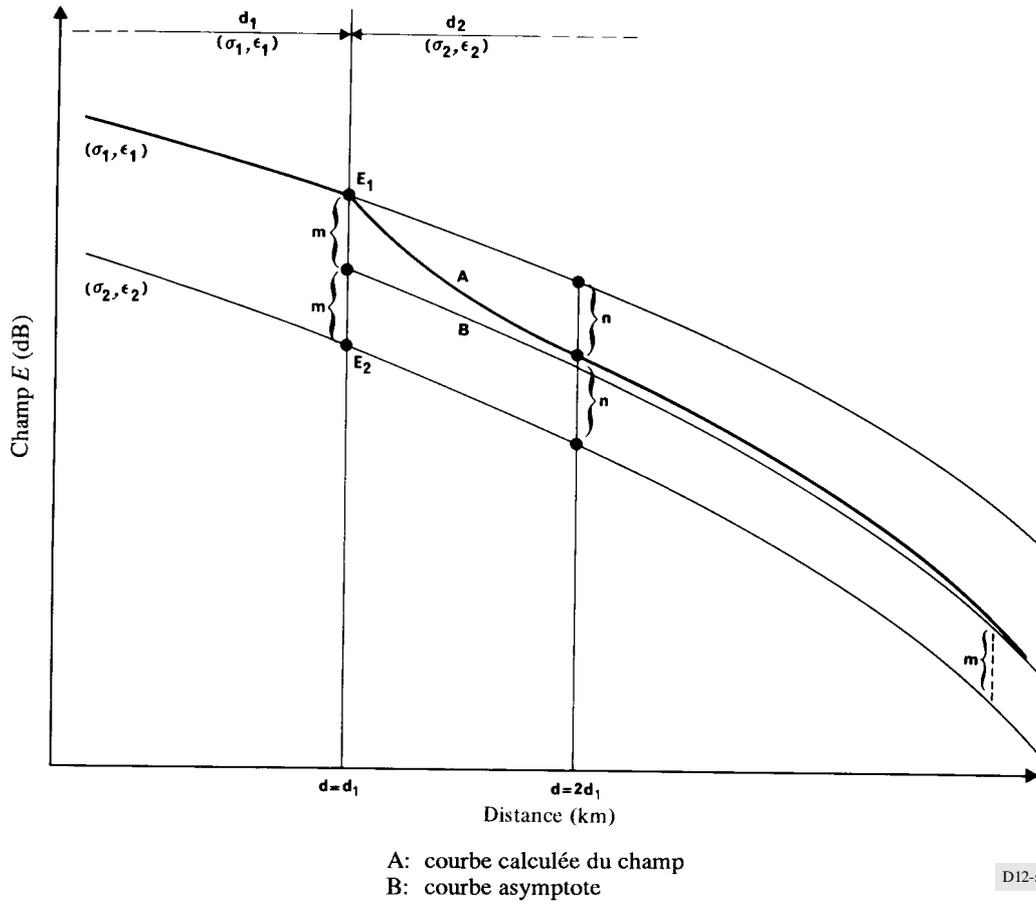
Cette méthode pourrait en principe être étendue aux changements de phase si l'on disposait des courbes correspondantes de la phase en fonction de la distance pour un sol homogène. Ces données seraient nécessaires pour l'application aux systèmes de navigation. Cette méthode est généralement d'un usage facile, surtout quand on dispose d'un ordinateur.

2. Dans les travaux de planification pour lesquels on a besoin de connaître la couverture d'un émetteur donné, il est commode de recourir à un *procédé graphique*, fondé sur la même méthode, et qui permet d'évaluer rapidement la distance à laquelle le champ a une valeur donnée.

On trouvera ci-dessous une brève description de cette méthode graphique.

La Fig. 12 s'applique à un trajet composé de deux sections homogènes de longueurs d_1 et d_2 , et de caractéristiques électriques respectives σ_1, ϵ_1 et σ_2, ϵ_2 . On suppose que, dans cet exemple, le module de la permittivité (constante diélectrique) complexe $|\epsilon'(\sigma_1, \epsilon_1)|$ est supérieur à $|\epsilon'(\sigma_2, \epsilon_2)|$. Aux distances d supérieures à d_1 , la courbe du champ obtenue par la méthode de Millington (§ 1) est située entre les courbes correspondant aux deux jeux de constantes $E(\sigma_1, \epsilon_1)$ et $E(\sigma_2, \epsilon_2)$. A la distance $d = 2 d_1$ (d_1 étant la distance de l'émetteur à la ligne de démarcation entre les deux terrains), la courbe de Millington se situe à mi-chemin entre les deux courbes précitées si le champ est tracé selon une échelle linéaire en dB. De plus, cette courbe possède une asymptote située à m dB de la courbe $E(\sigma_2, \epsilon_2)$, comme le montre la Fig. 12. Ici, m est la demi-différence entre les courbes $E(\sigma_1, \epsilon_1)$ et $E(\sigma_2, \epsilon_2)$ au point $d = d_1$. Il est facile de tracer la courbe qui en résulte en connaissant le point par où elle passe pour $d = 2 d_1$ et son asymptote.

FIGURE 12
 Comparaison des résultats



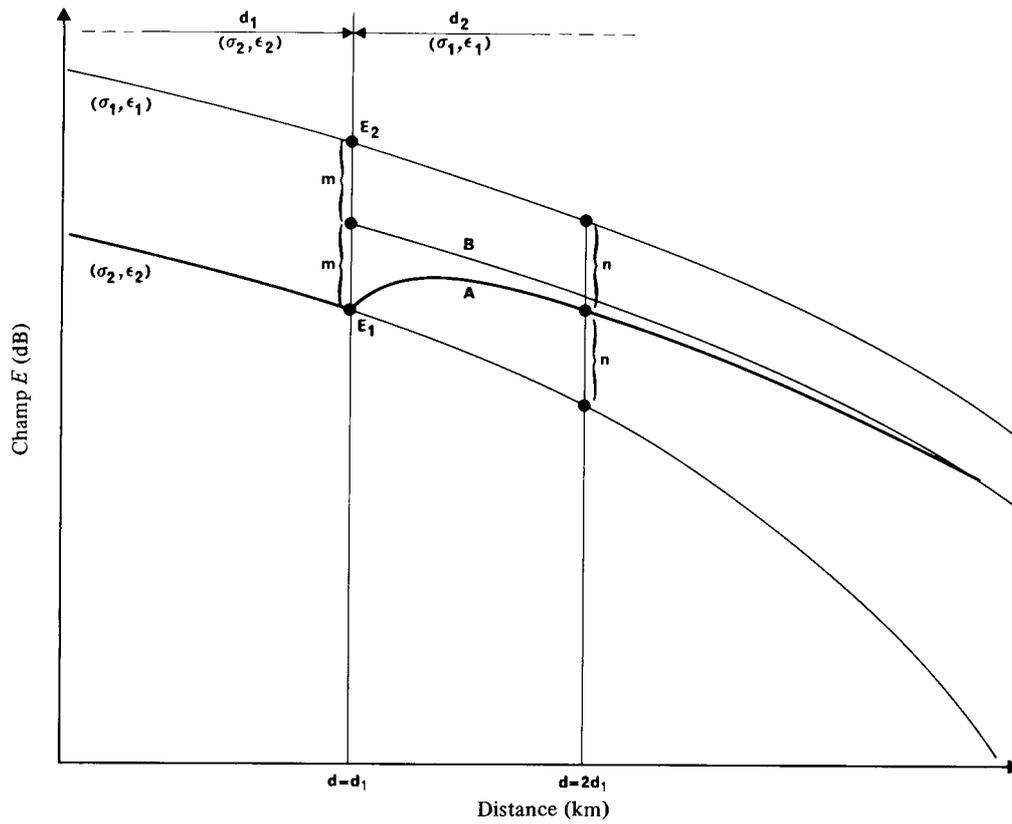
La Fig. 13 représente la courbe de Millington pour un trajet composé de deux sections, dont les caractéristiques électriques sont d'abord σ_2 et ϵ_2 , puis σ_1 et ϵ_1 , le module de la permittivité complexe $|\epsilon'(\sigma_1, \epsilon_1)|$ étant supérieur à $|\epsilon'(\sigma_2, \epsilon_2)|$. On peut appliquer la même procédure, sans oublier que cette fois l'asymptote est parallèle à la courbe $E(\sigma_1, \epsilon_1)$.

Pour les trajets comportant plus de deux sections, chaque changement de section peut être traité séparément comme le premier. La courbe qui en résulte doit être continue, les éléments de courbe de chaque section subissant un déplacement parallèle à la courbe extrapolée à l'extrémité de la section précédente.

La précision de la méthode graphique dépend de la différence de pente des courbes du champ et donc, dans une certaine mesure, de la fréquence. Dans la bande des ondes kilométriques, la différence entre la méthode décrite au § 1 de la présente Annexe et cette méthode approchée est normalement minime, mais, dans la partie supérieure de la bande des ondes hectométriques, la différence ne dépasse pas 3 dB dans la majorité des cas.

Les Fig. 14 à 50 présentent des courbes de champ en fonction de la distance avec les caractéristiques électriques du sol comme paramètre.

FIGURE 13
 Comparaison des résultats



A: courbe calculée du champ
 B: courbe asymptote

D13-sc

FIGURE 14

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

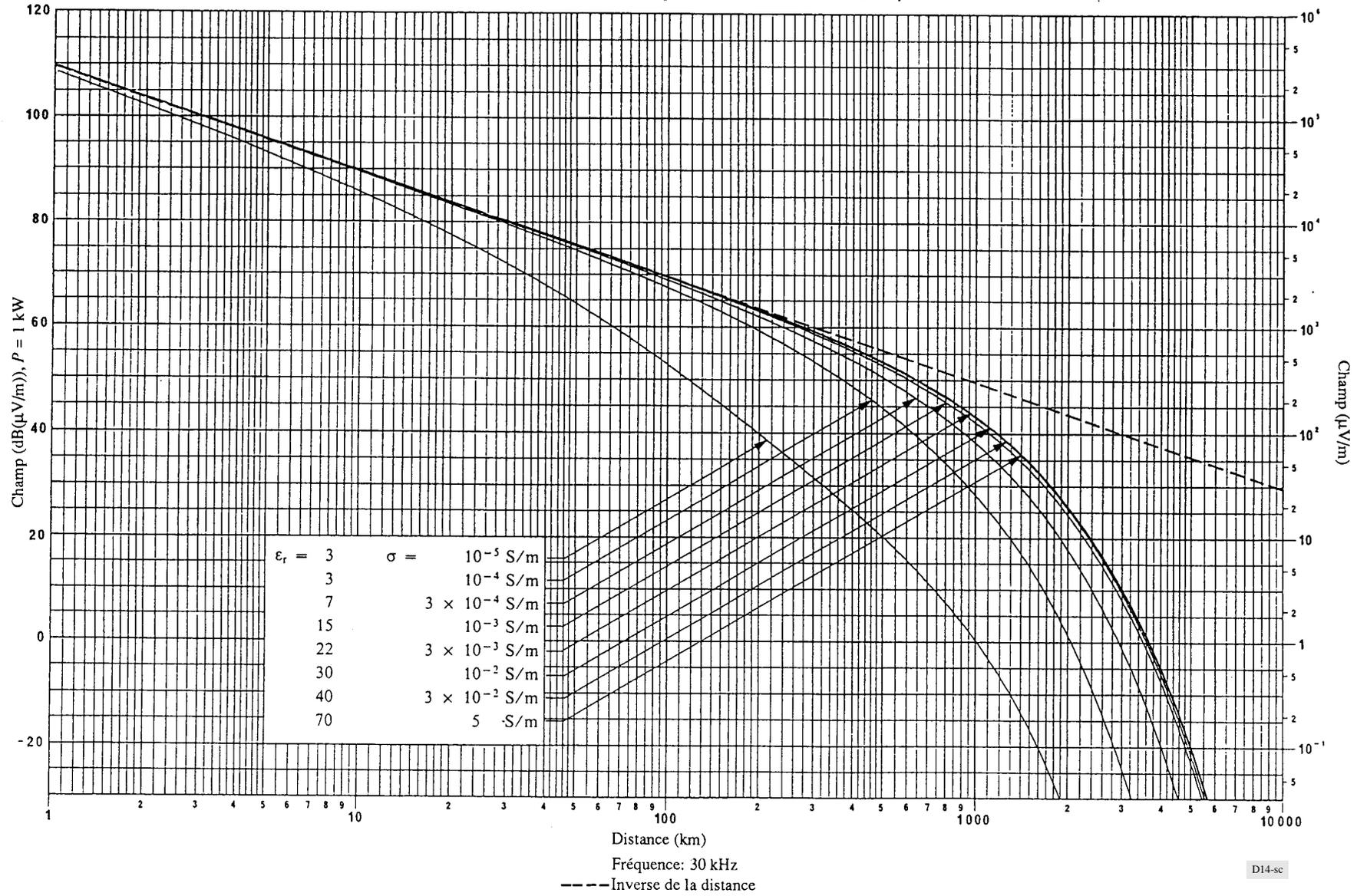


FIGURE 15

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

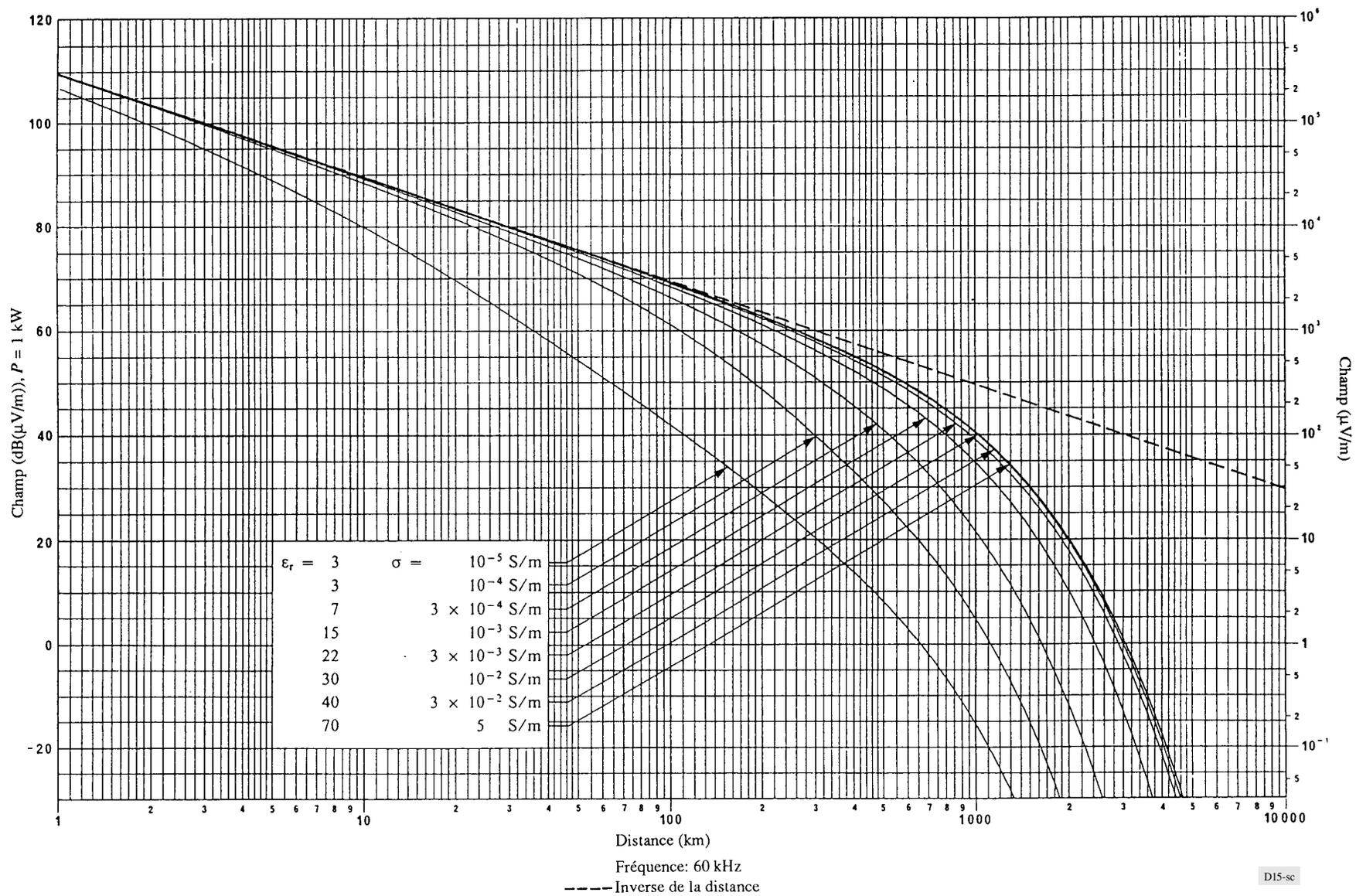
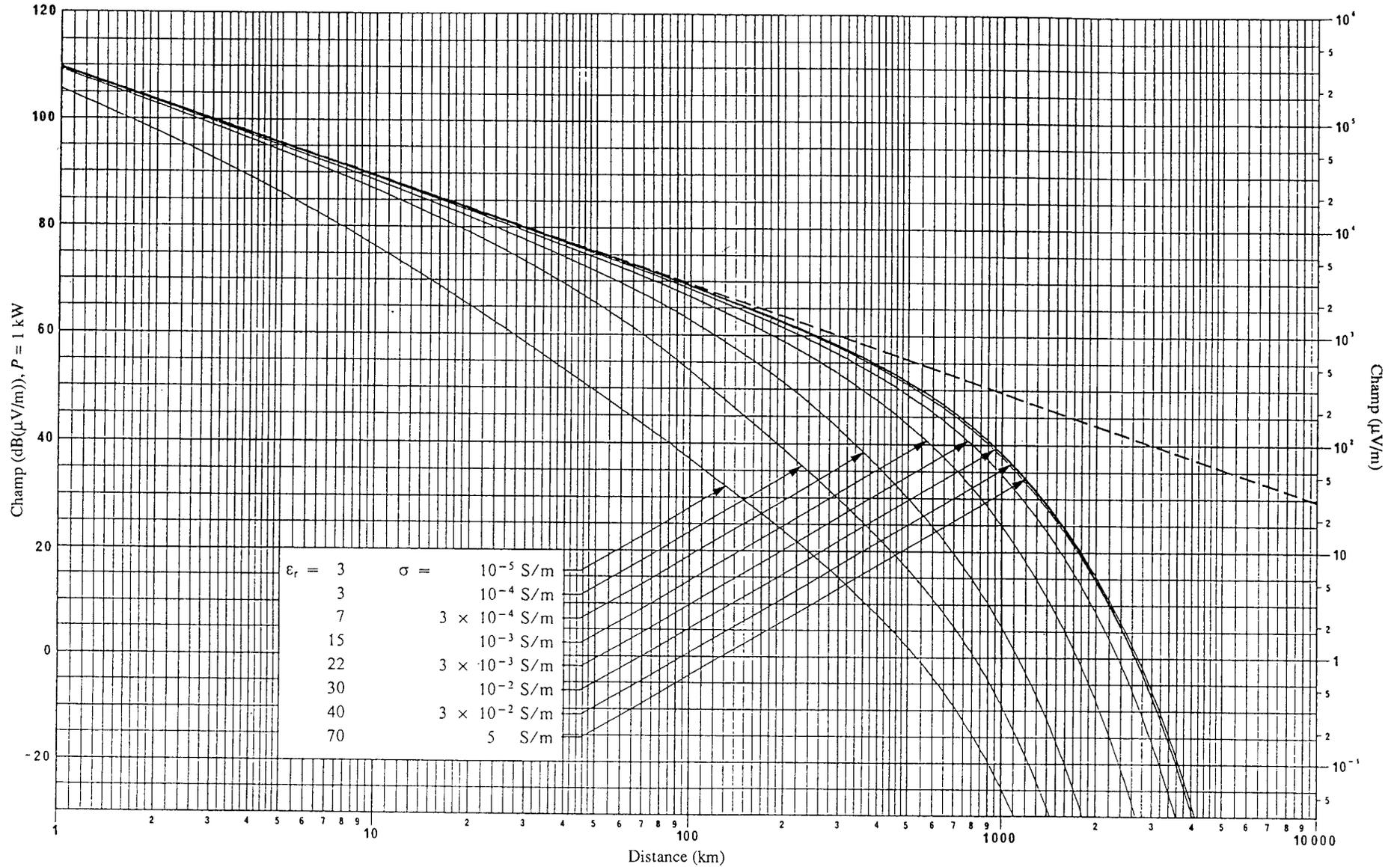


FIGURE 16

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



Fréquence: 90 kHz

..... Inverse de la distance

D16-sc

FIGURE 17

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

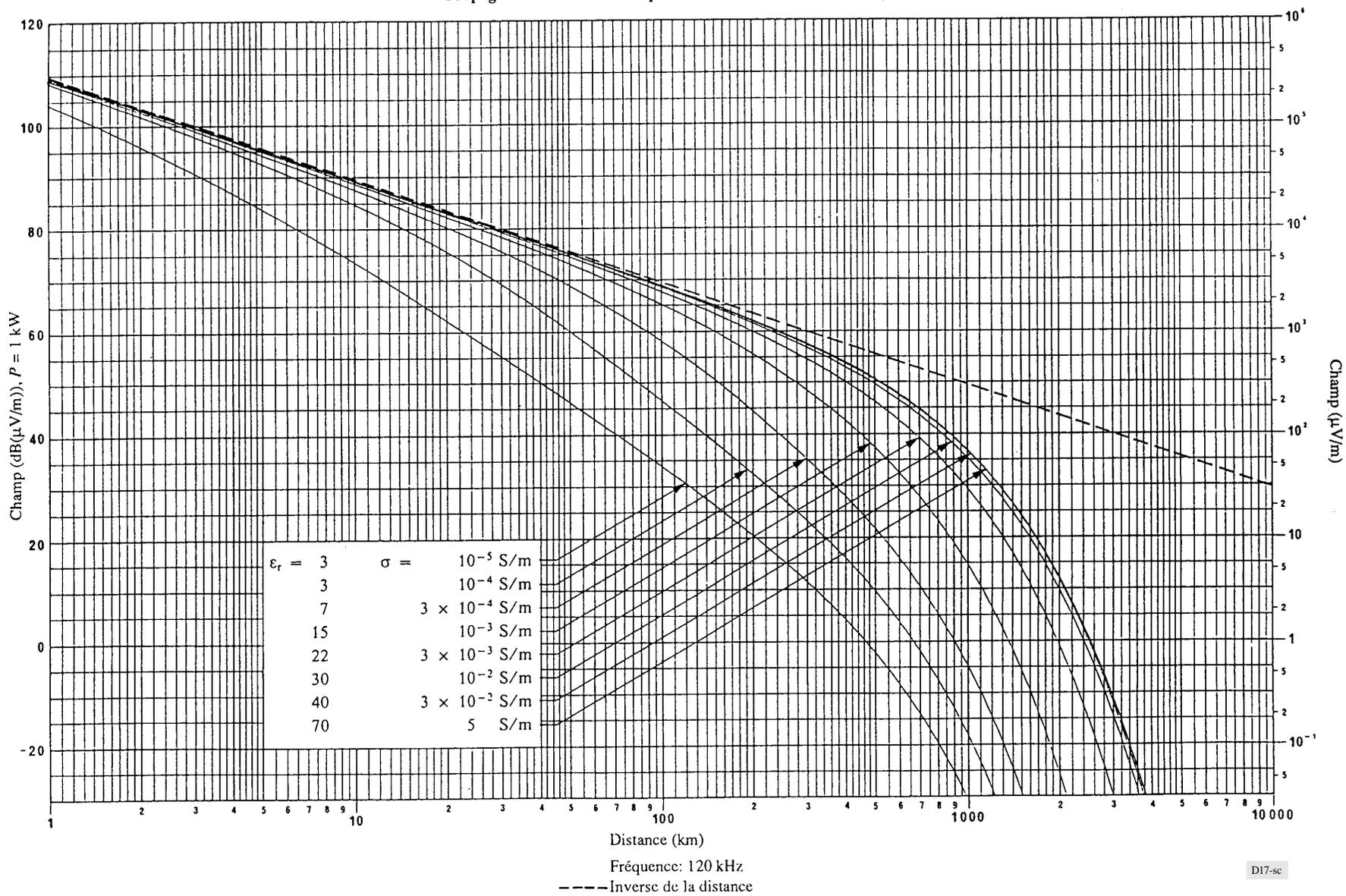
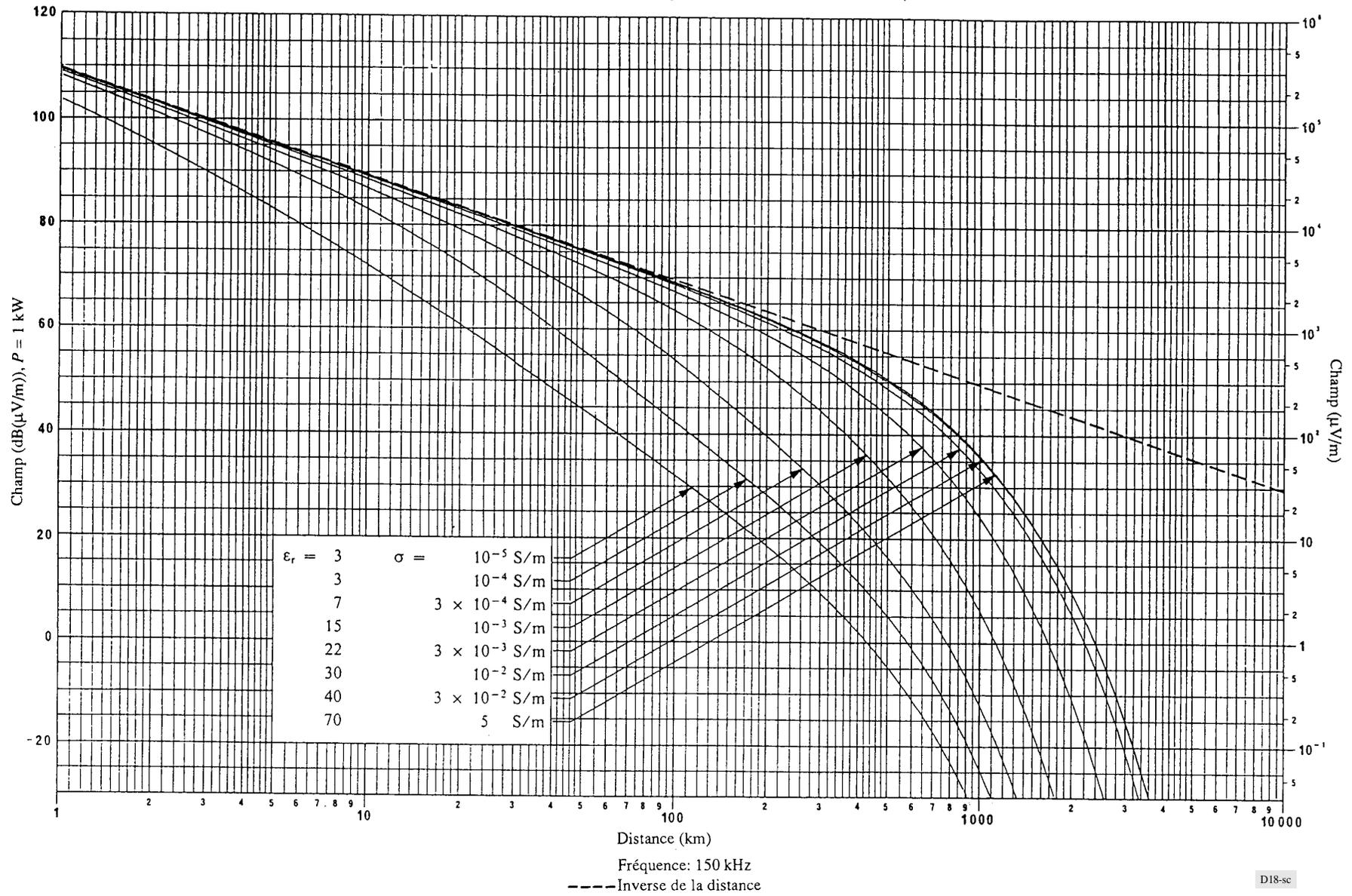


FIGURE 18

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D18-sc

FIGURE 19

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

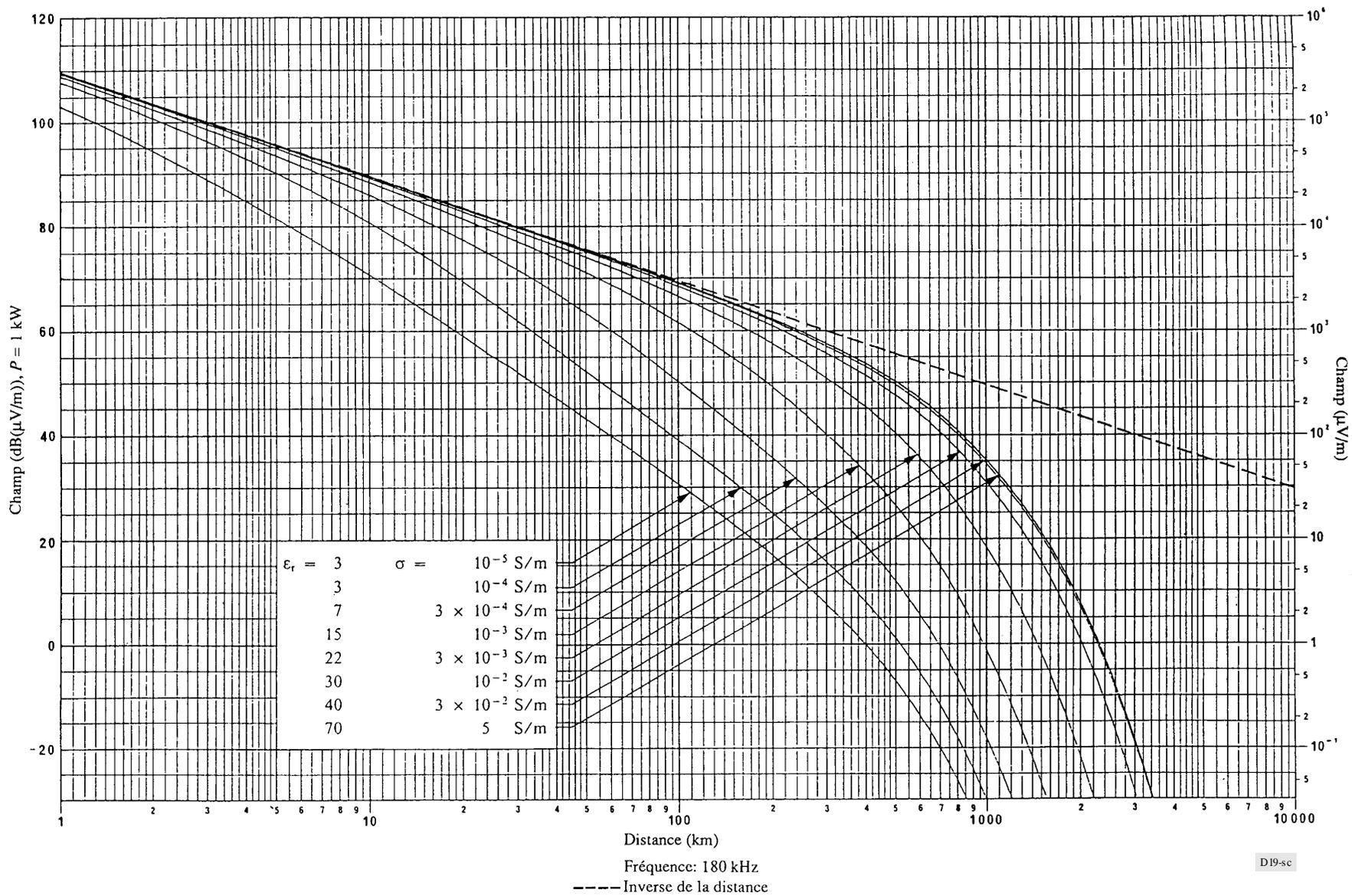


FIGURE 20

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

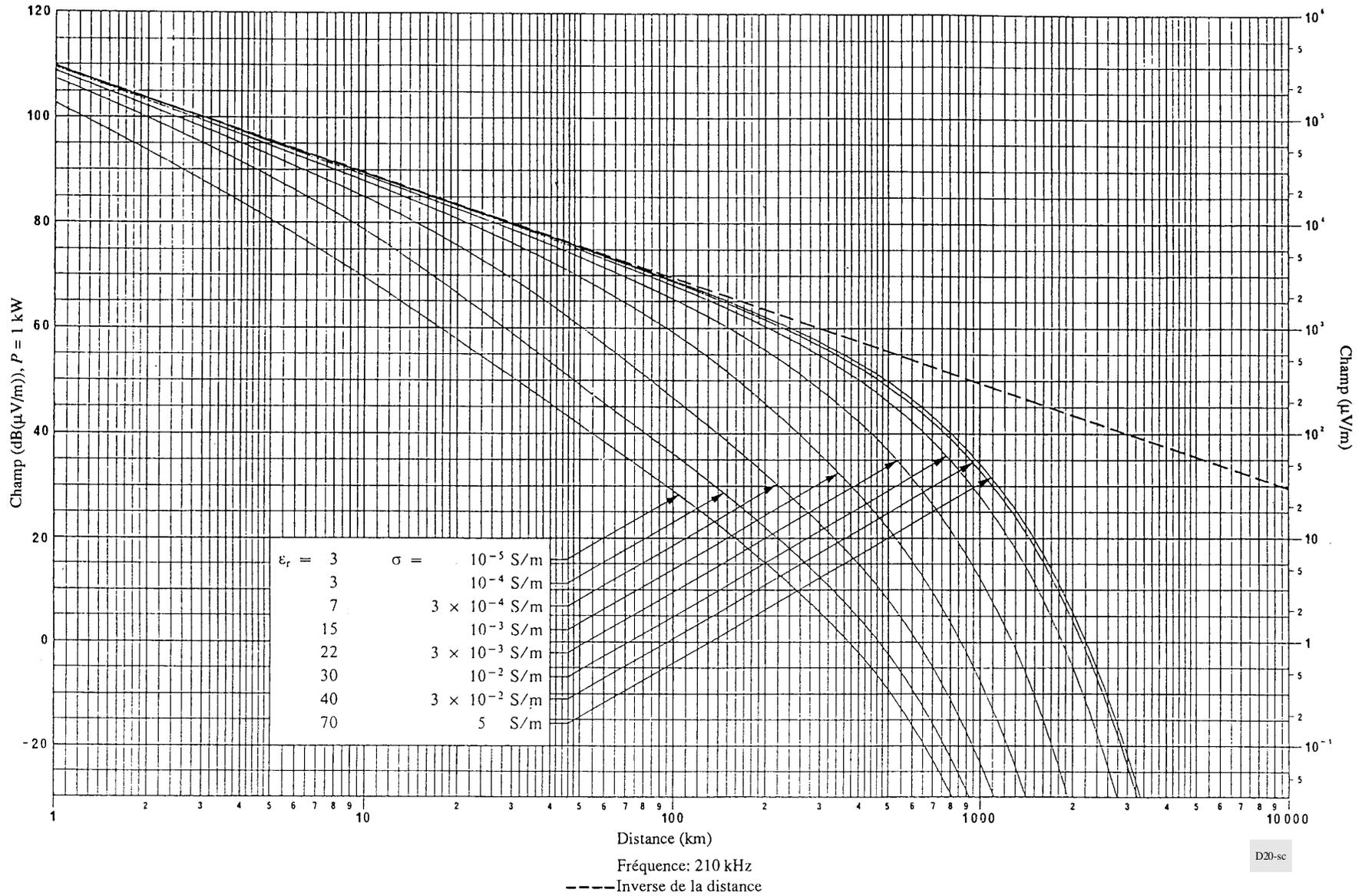


FIGURE 21

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

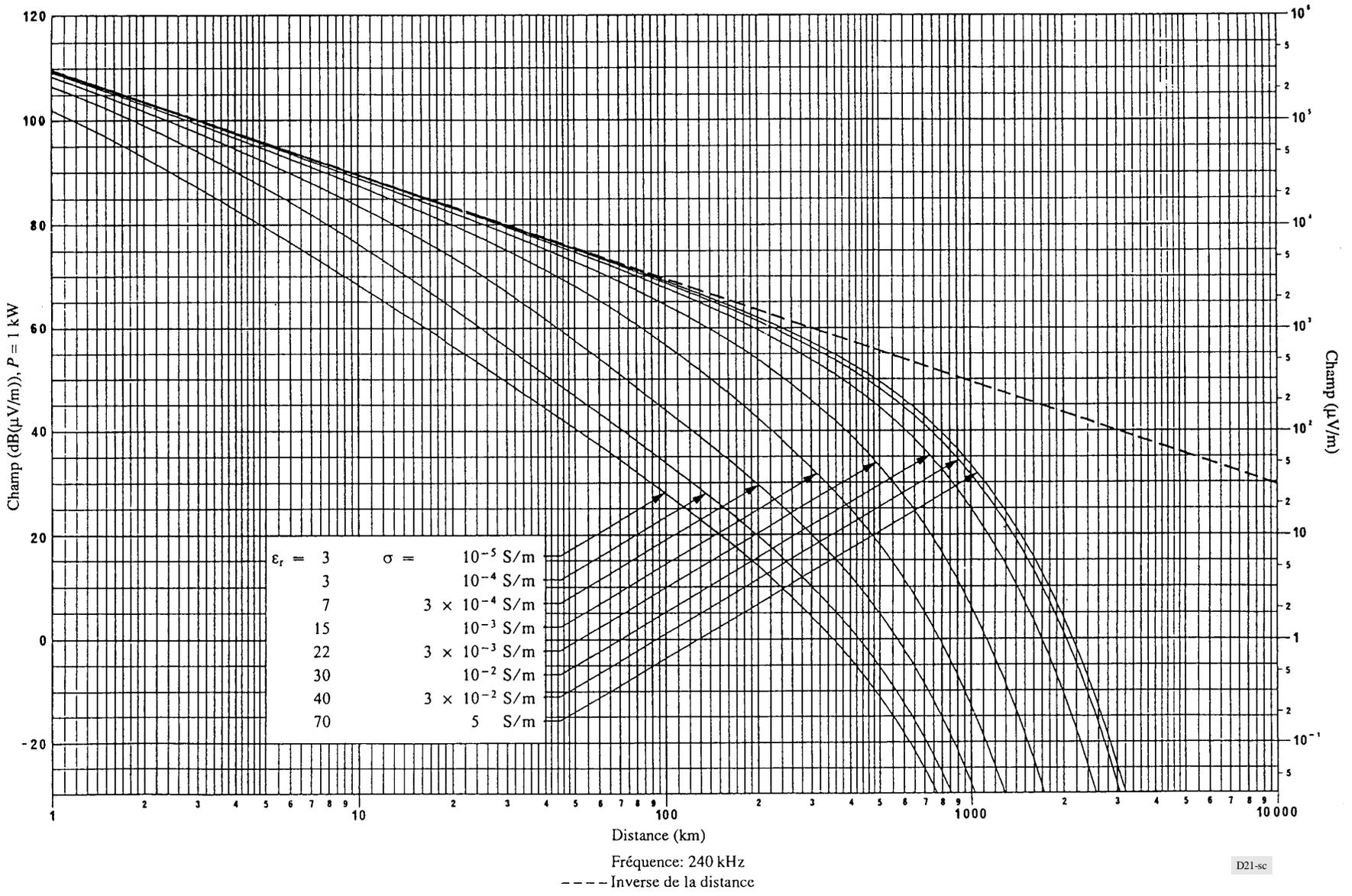


FIGURE 22

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

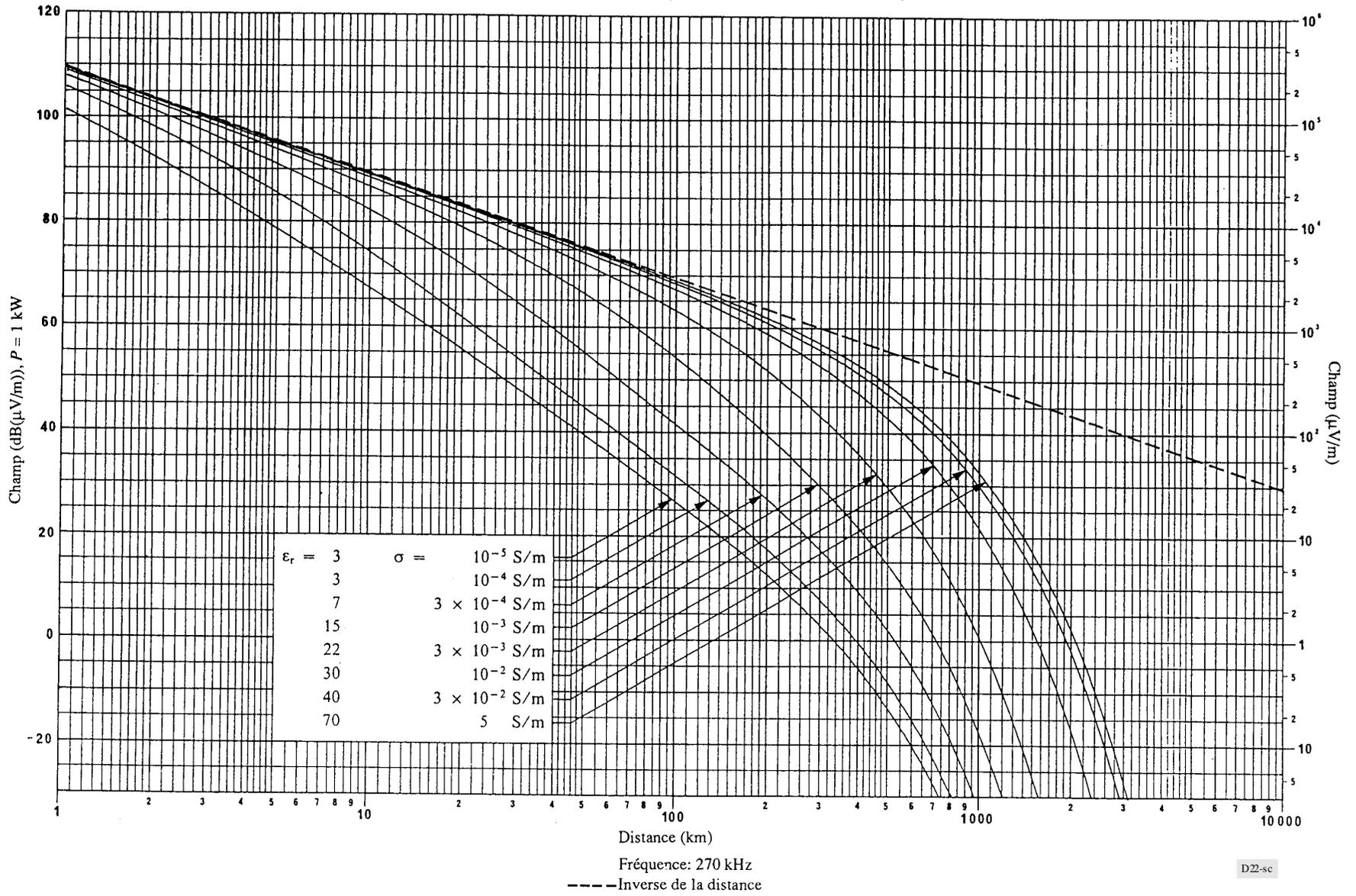
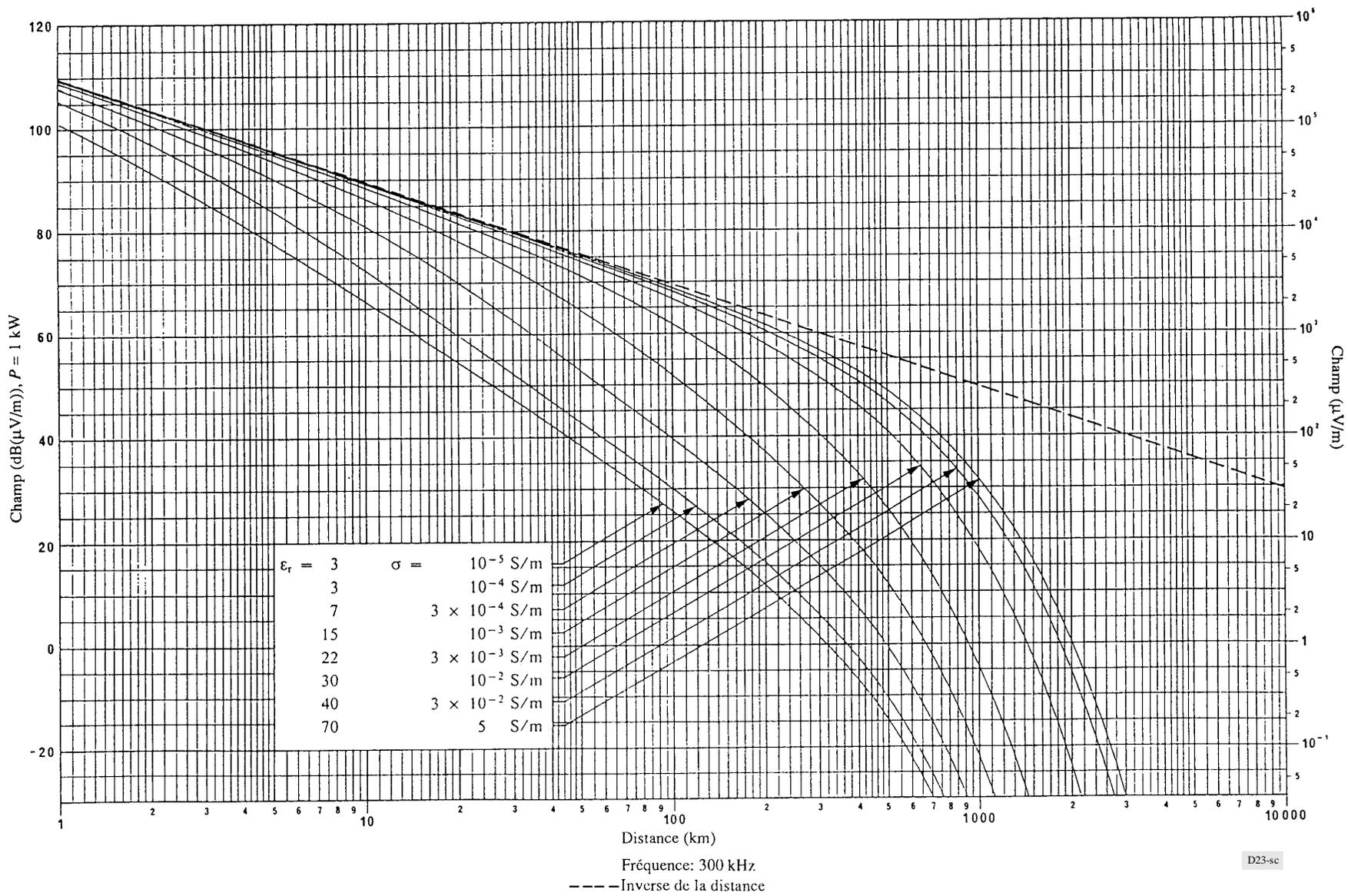


FIGURE 23

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D23-sc

FIGURE 24

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

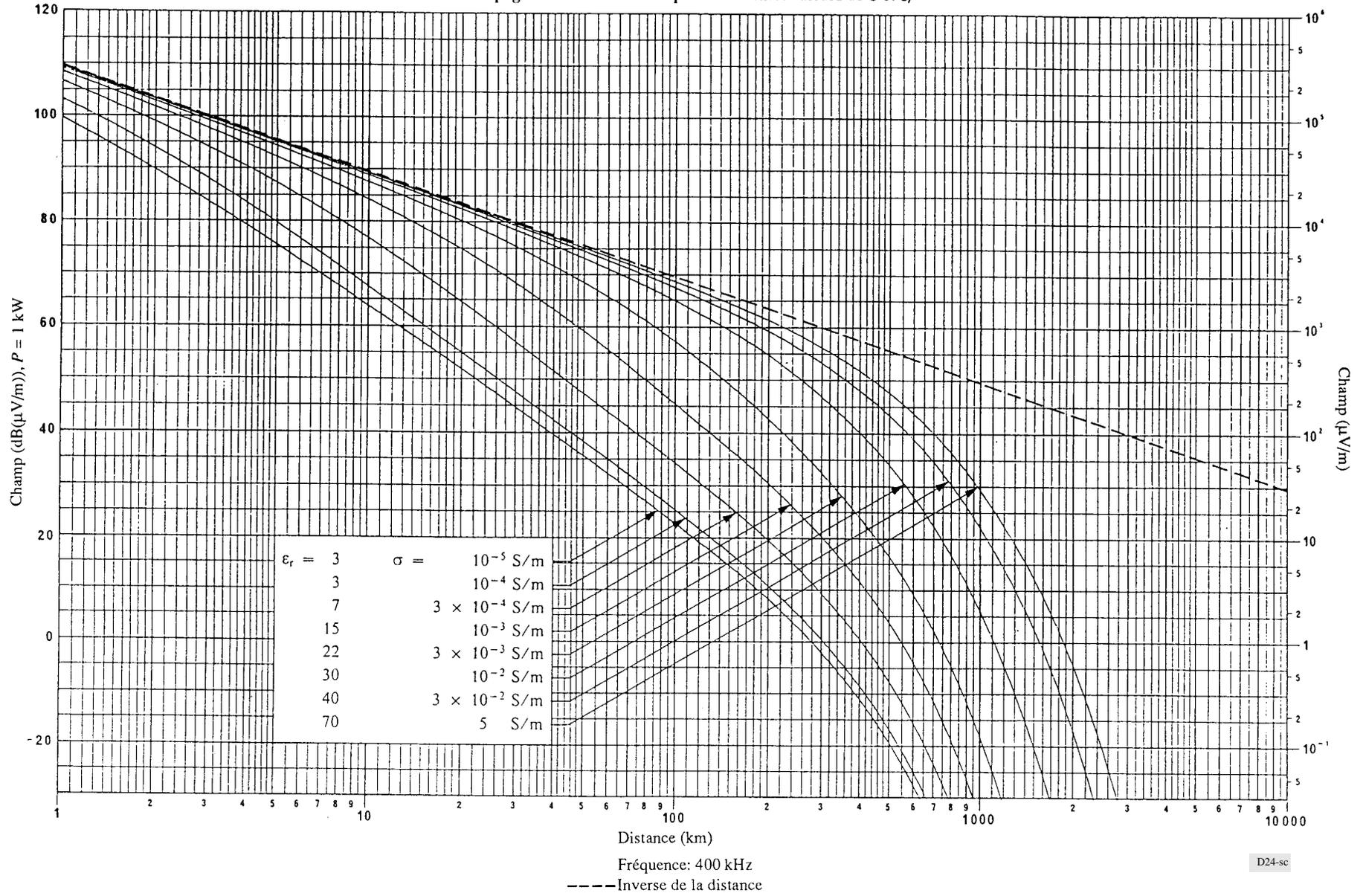


FIGURE 25

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

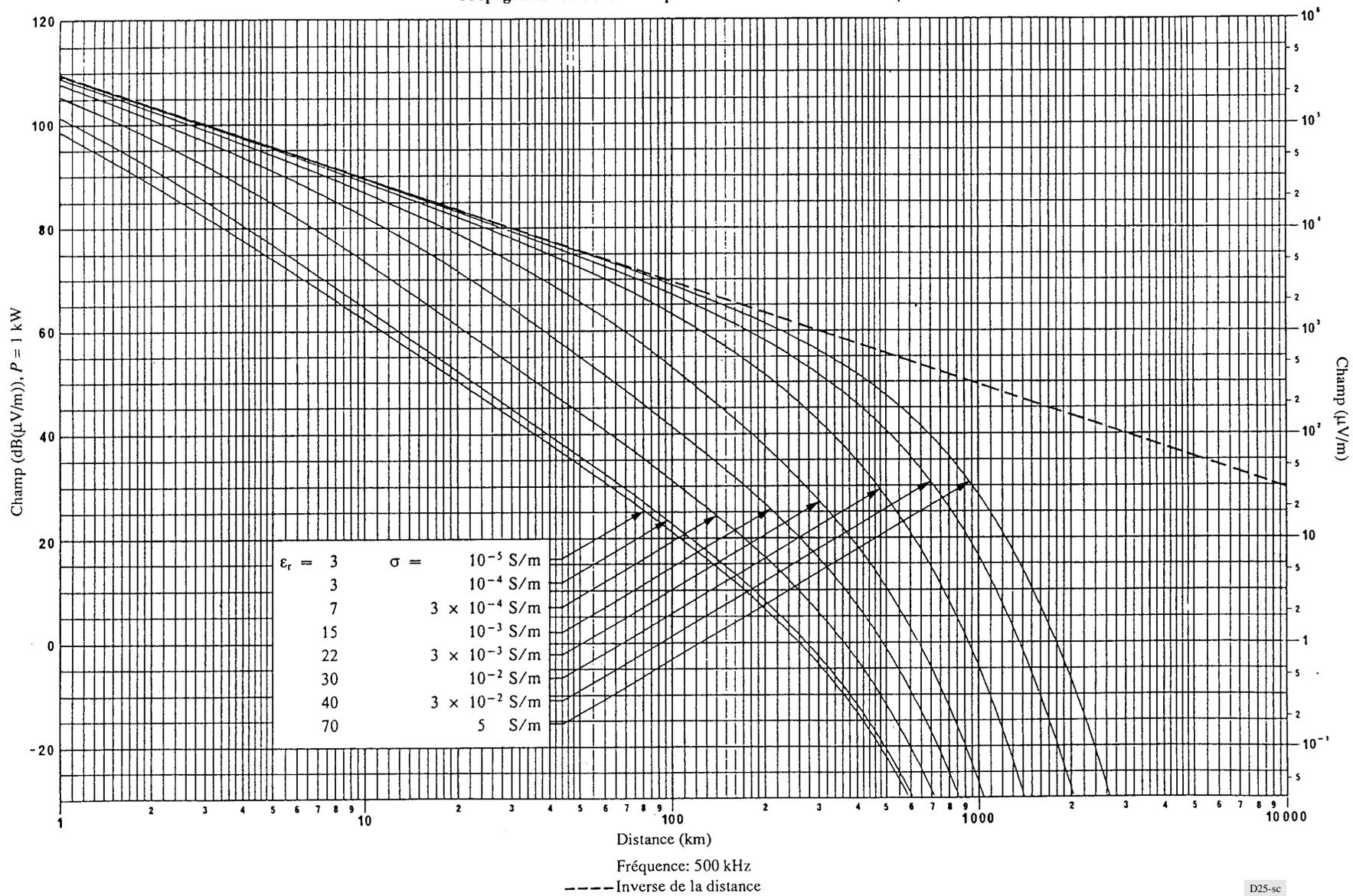
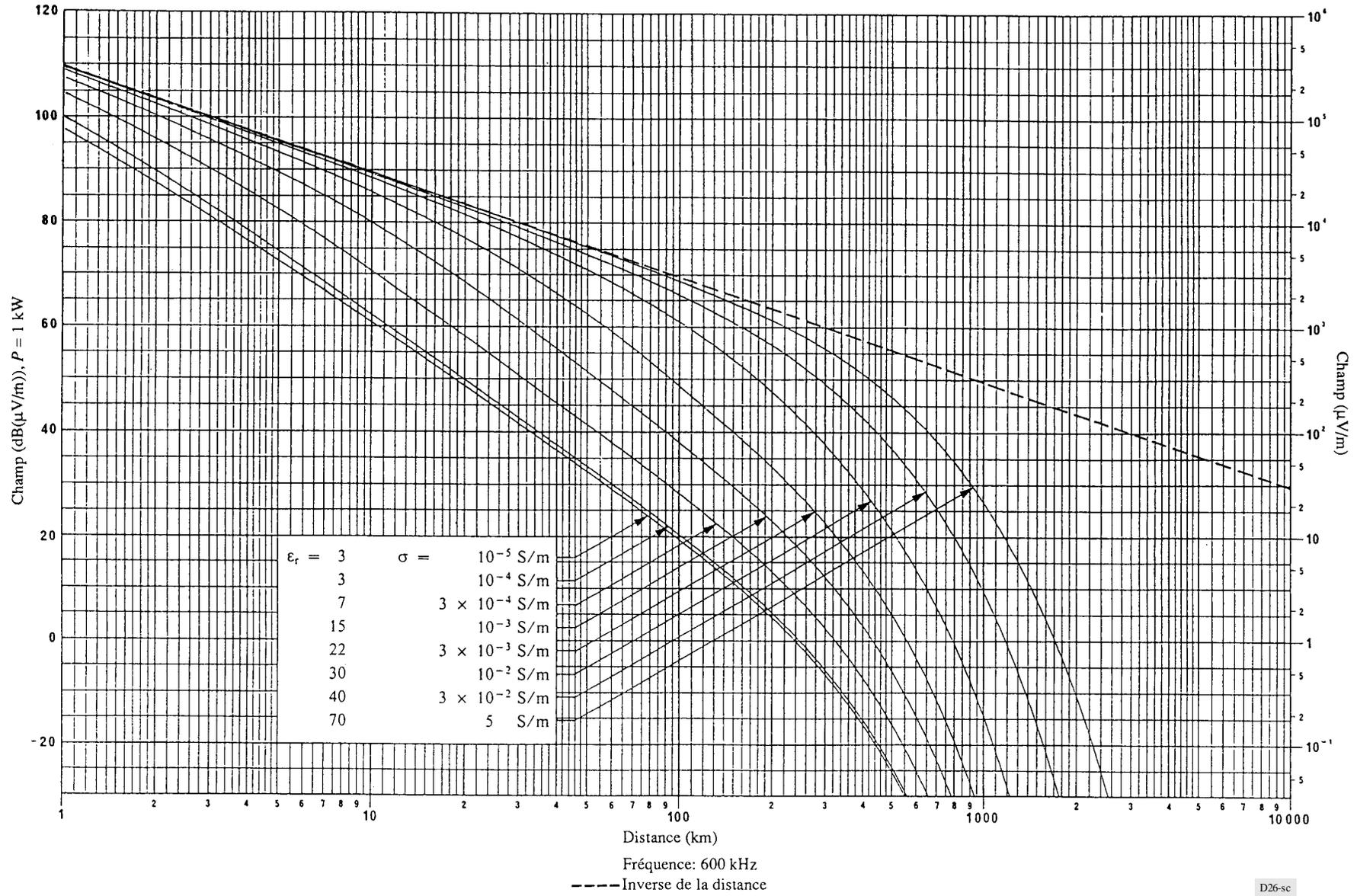


FIGURE 26

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D26-sc

FIGURE 27
 Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

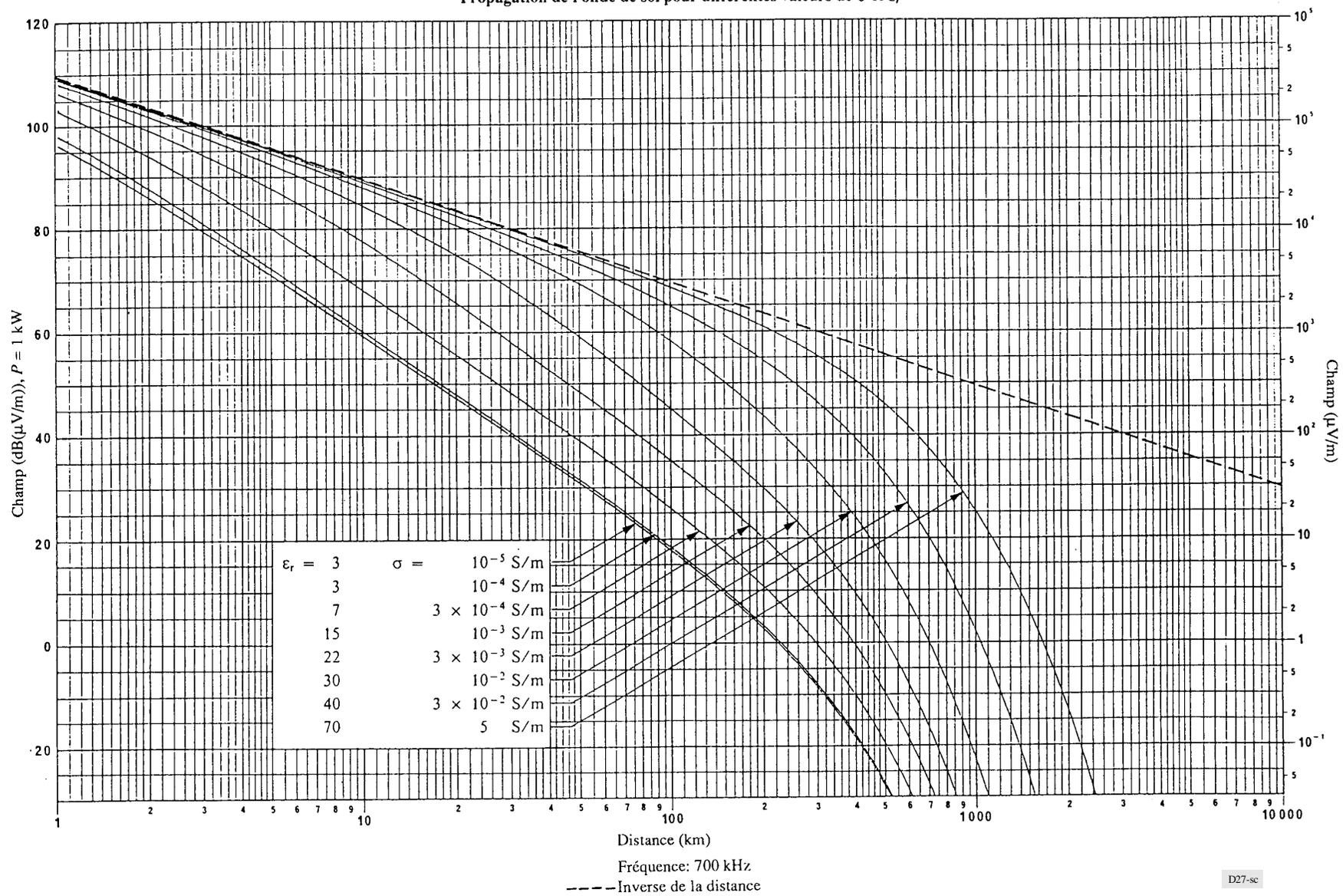
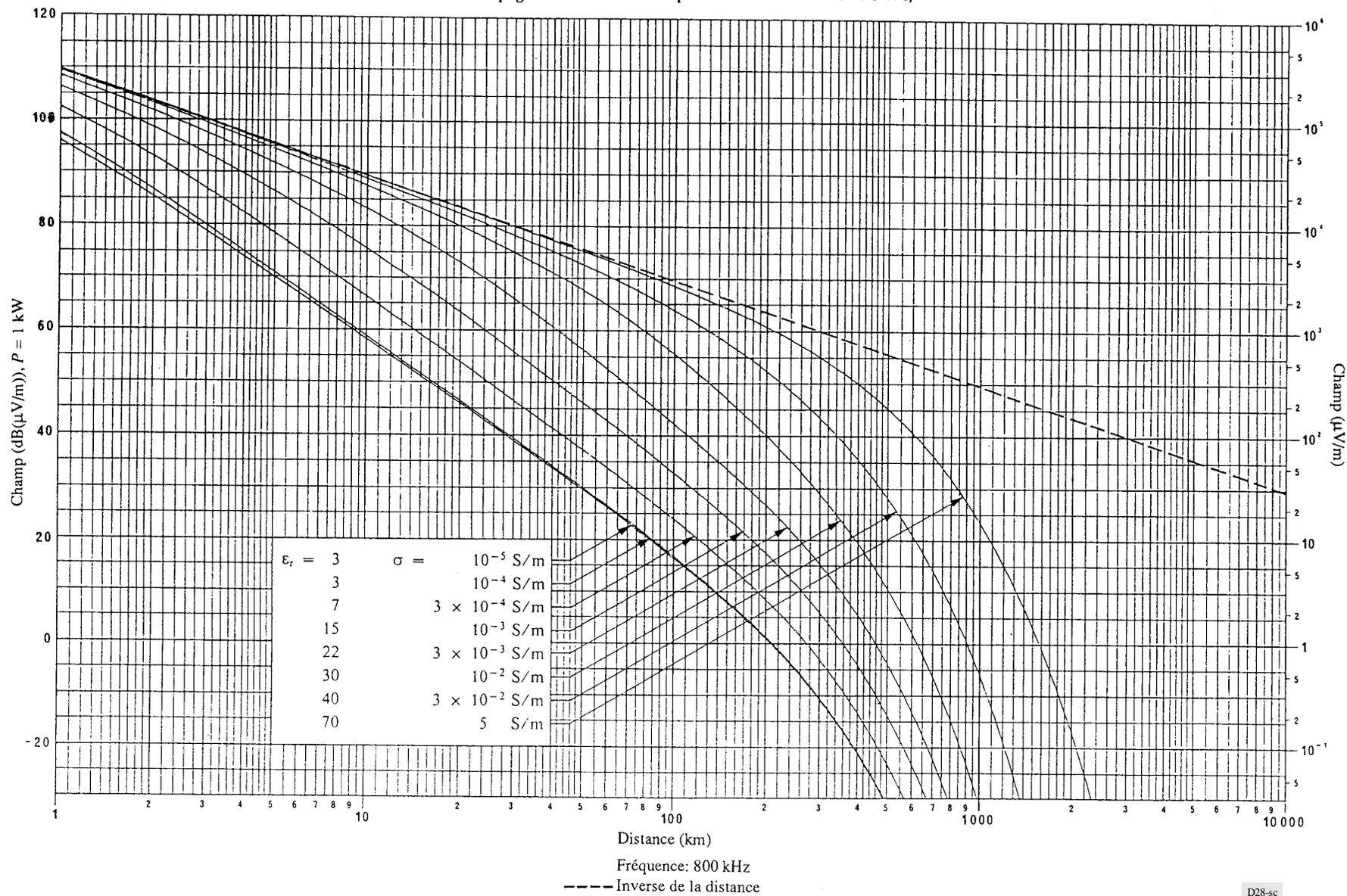


FIGURE 28

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D28-sc

FIGURE 29

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

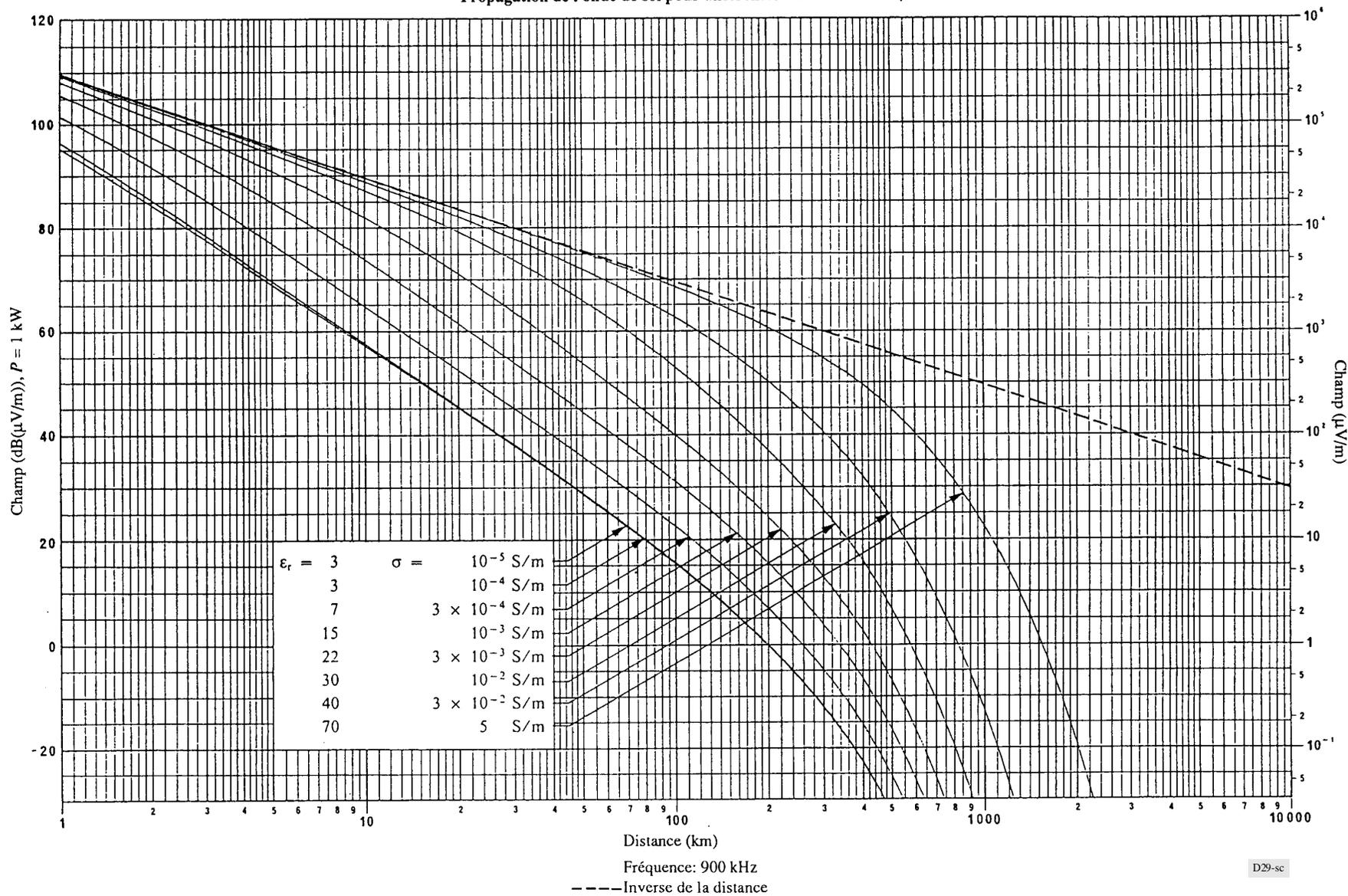
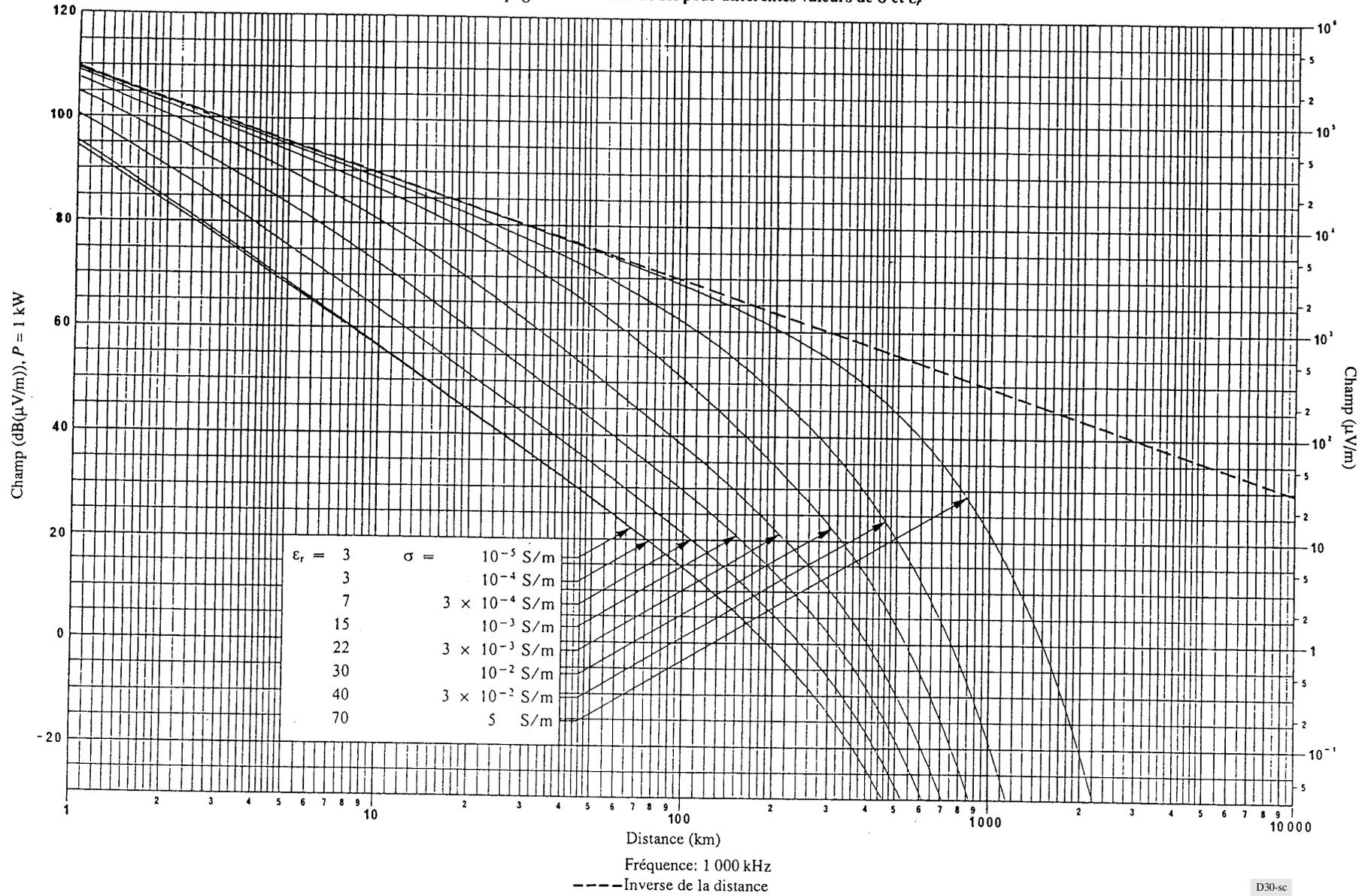


FIGURE 30

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D30-sc

FIGURE 31

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

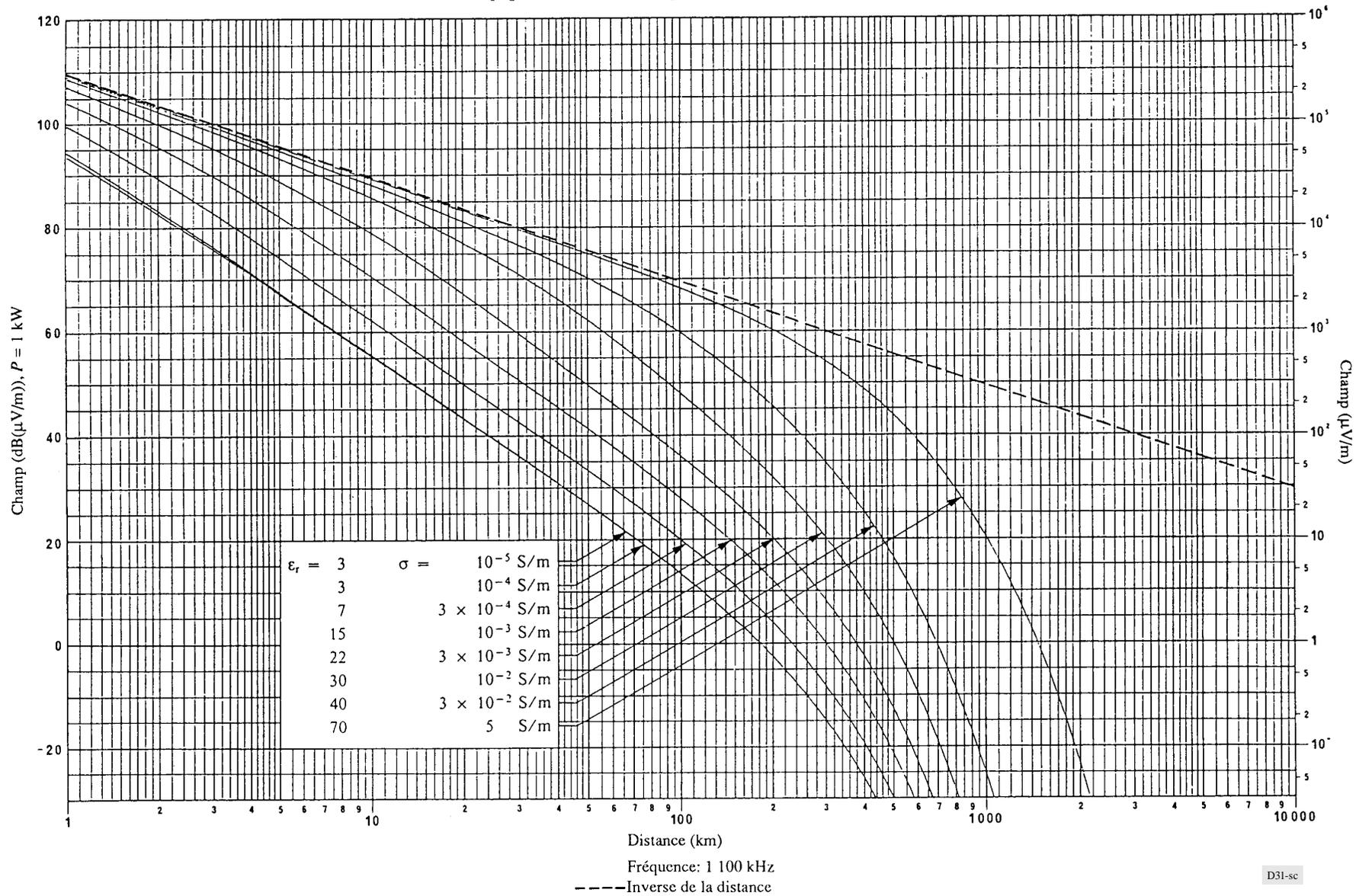
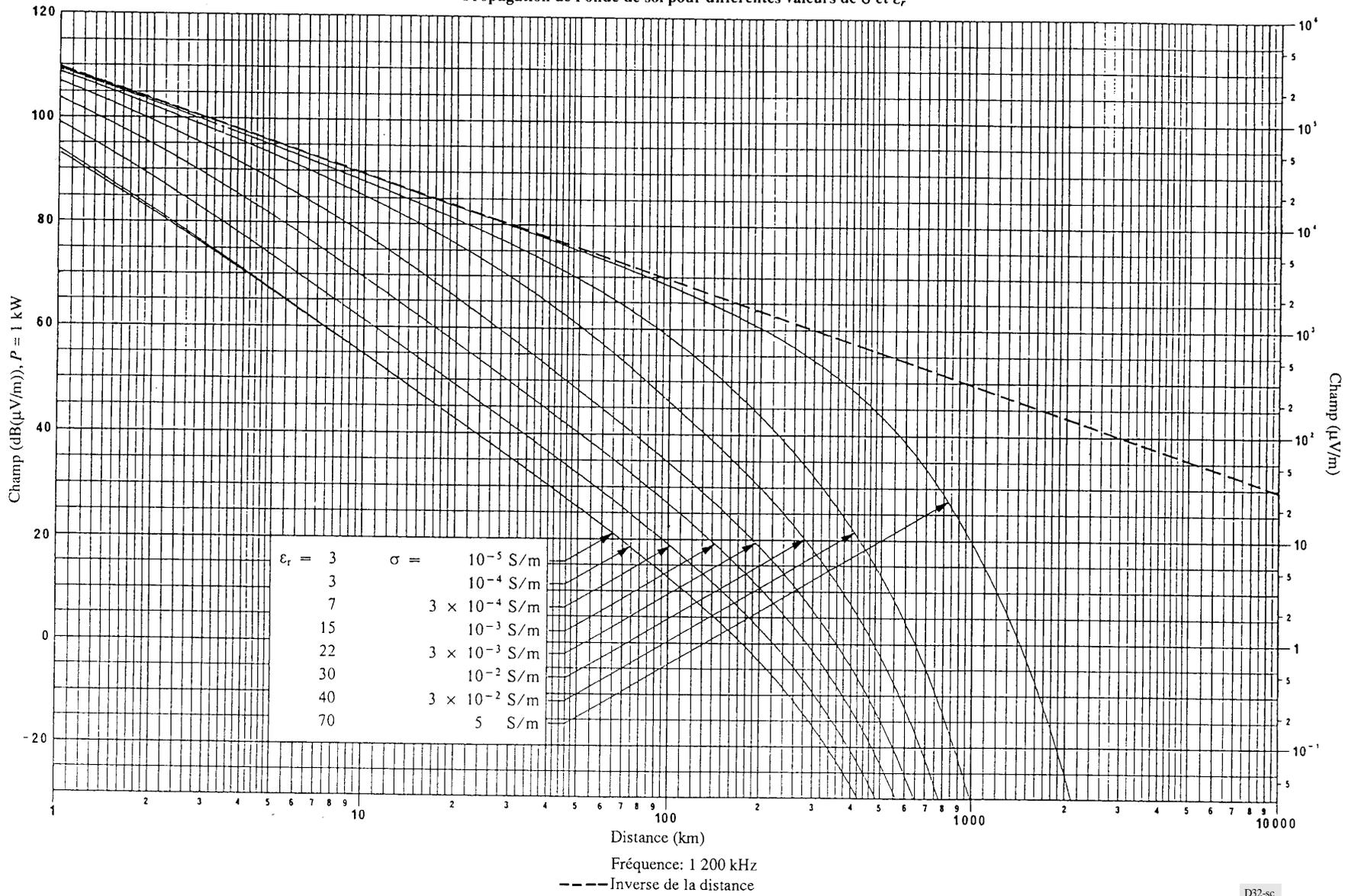


FIGURE 32

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D32-sc

FIGURE 33

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

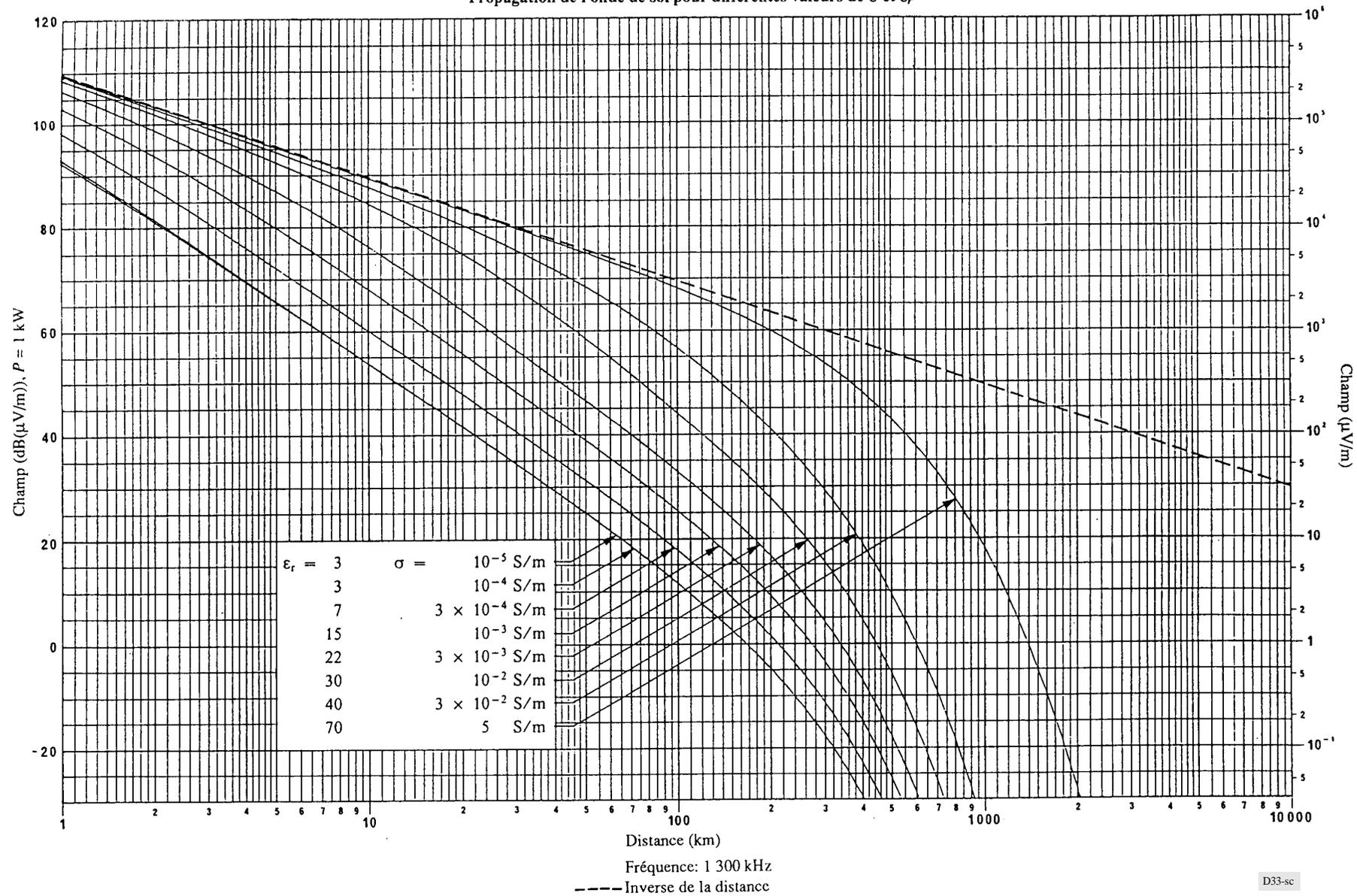


FIGURE 34

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

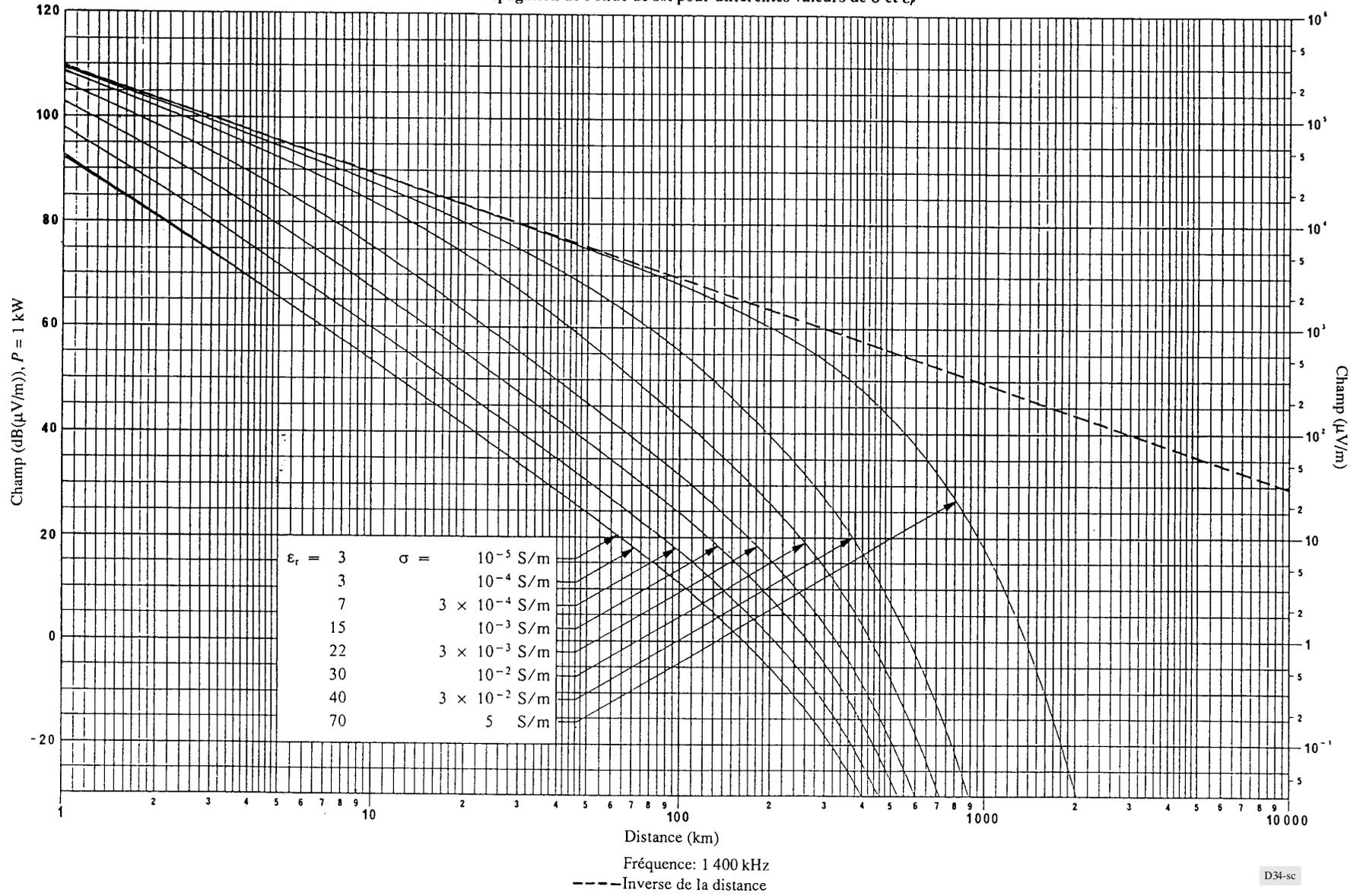
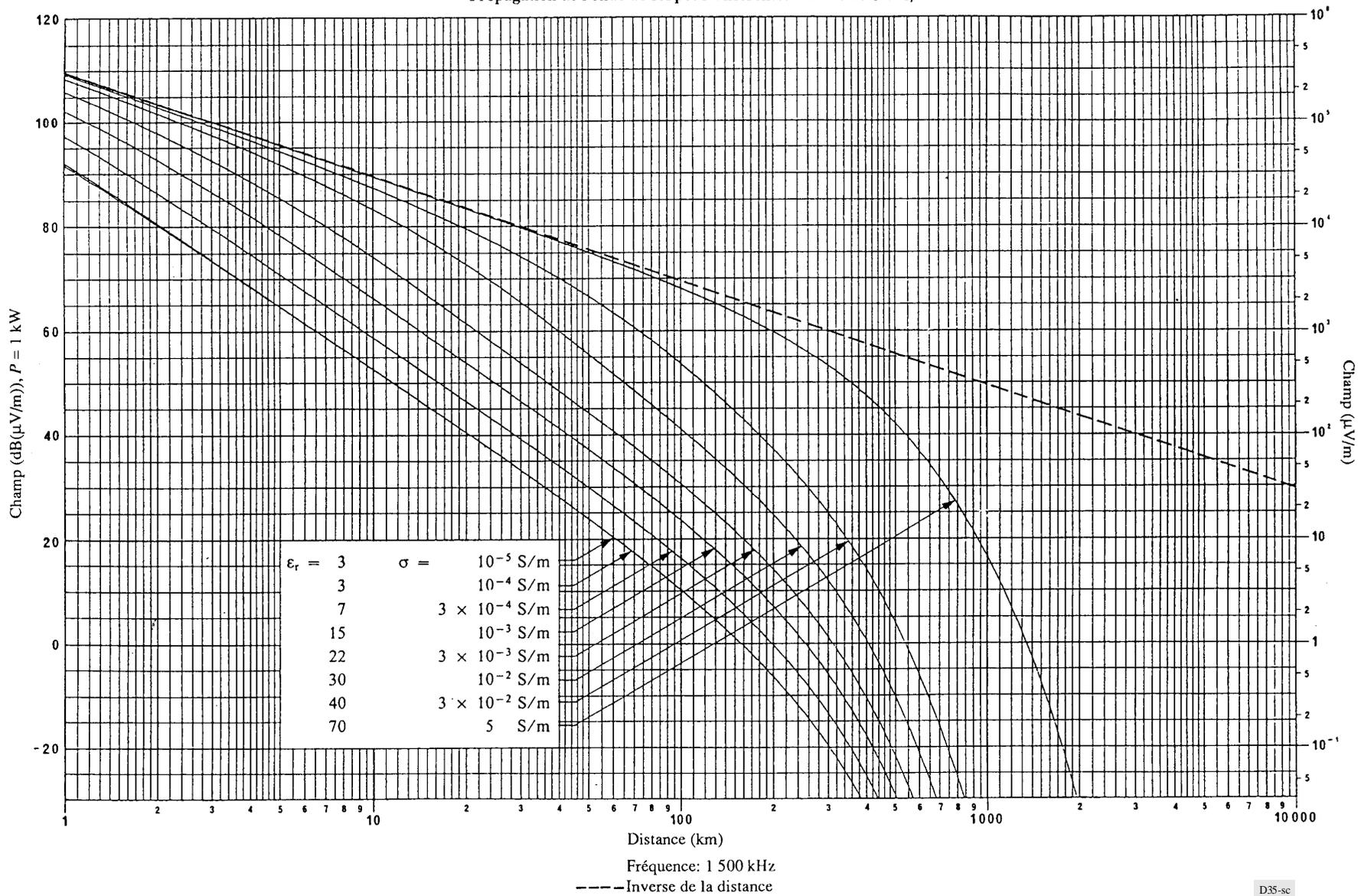


FIGURE 35

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D35-sc

FIGURE 36

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

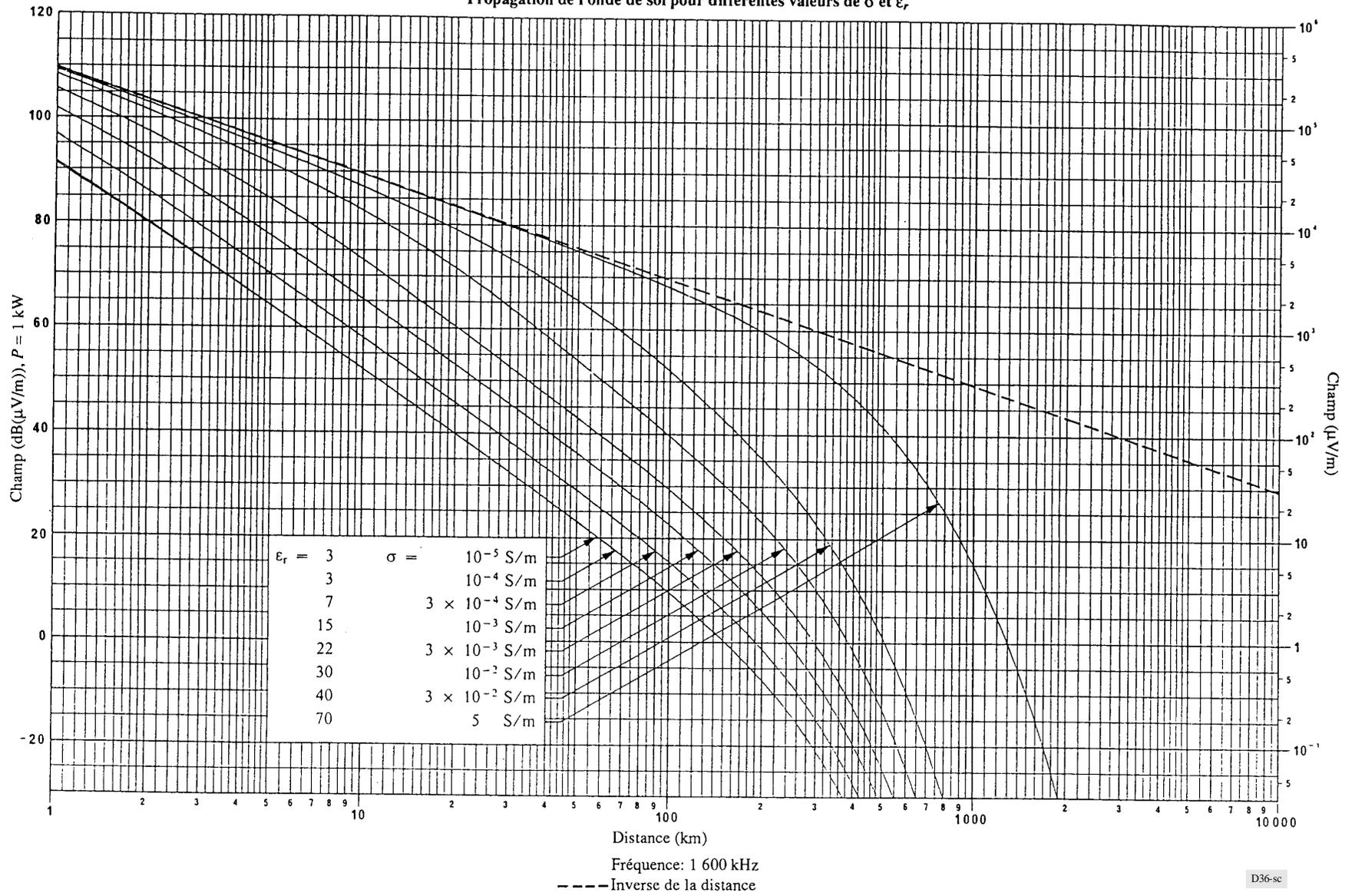


FIGURE 37

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

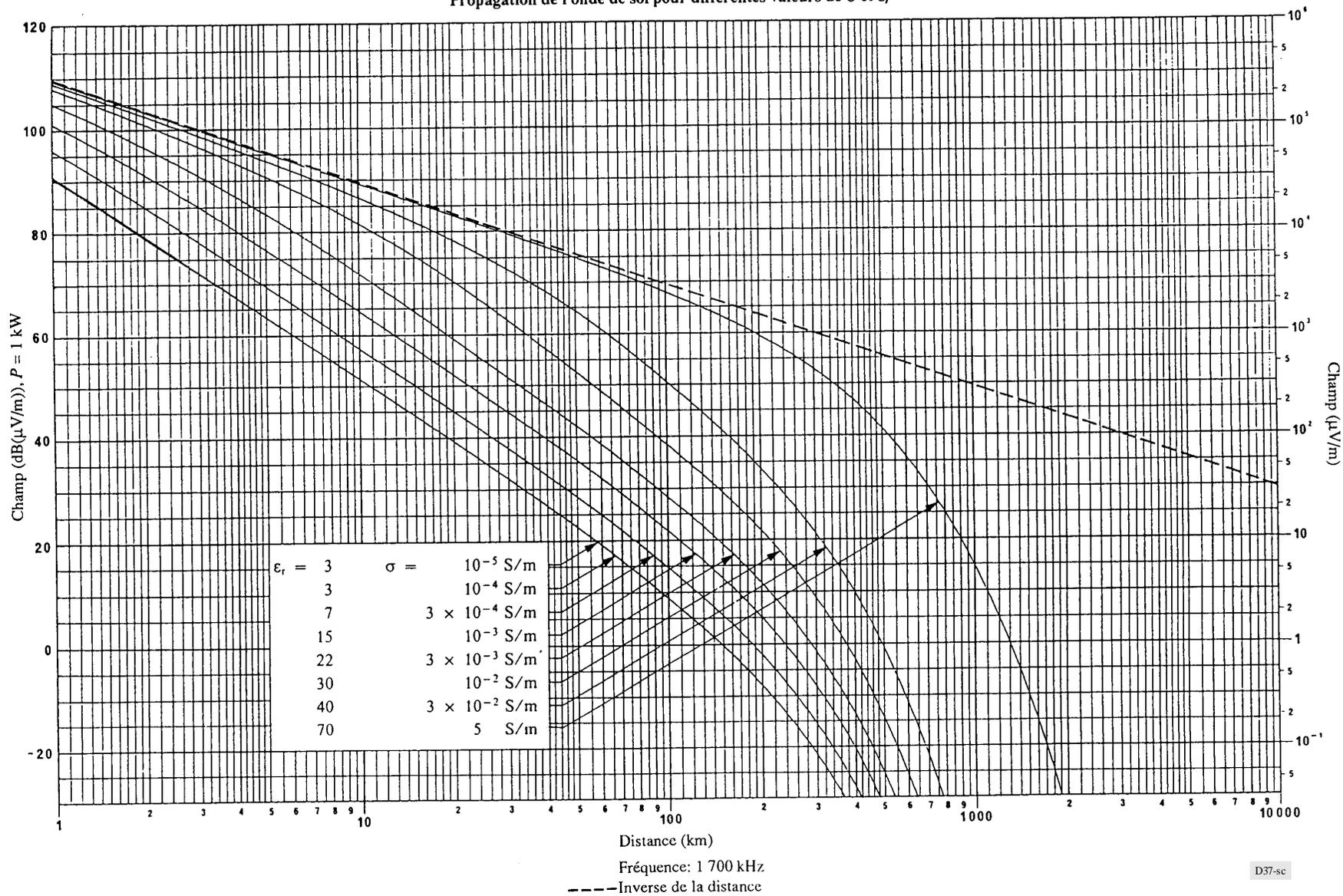


FIGURE 38

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

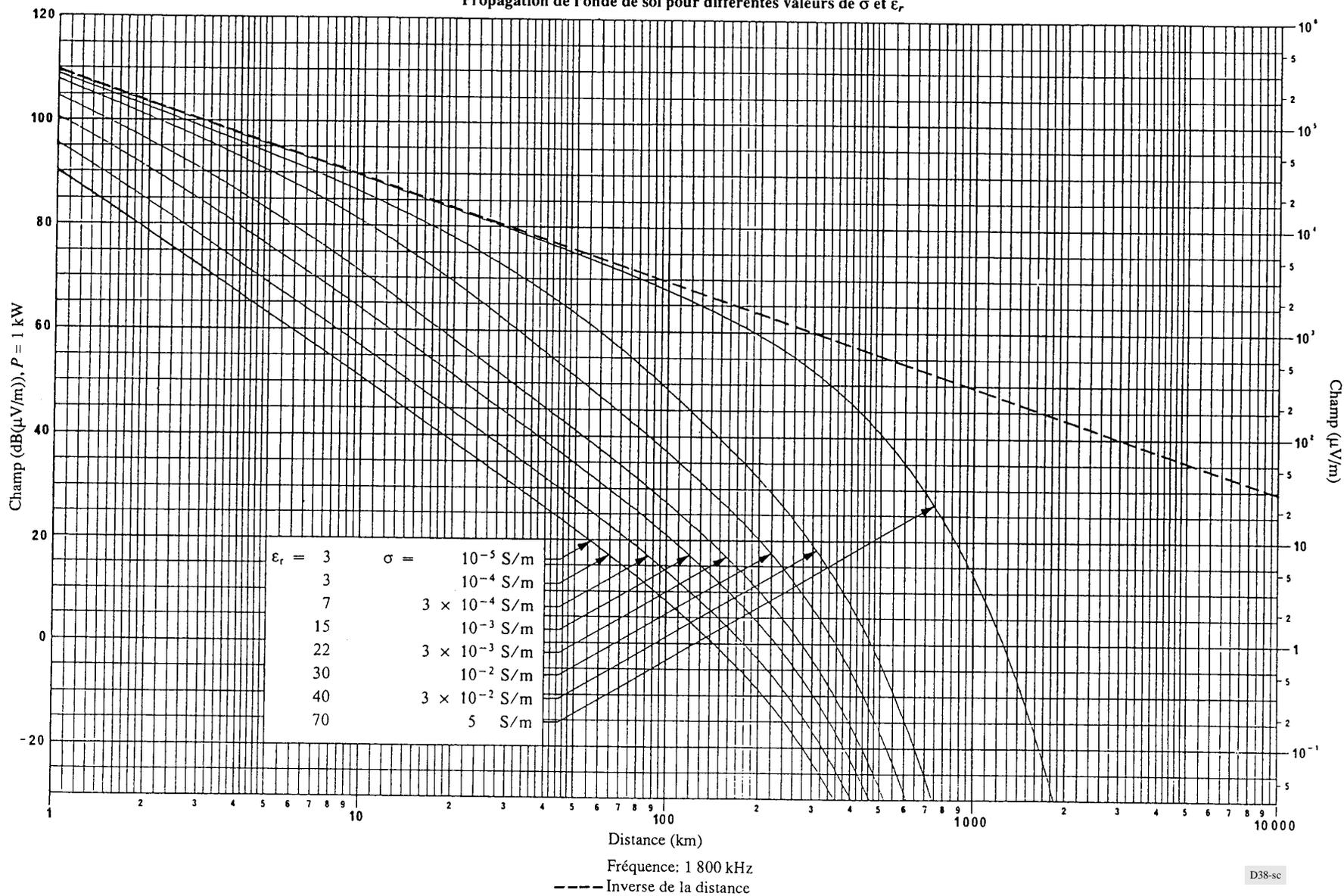


FIGURE 39
 Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

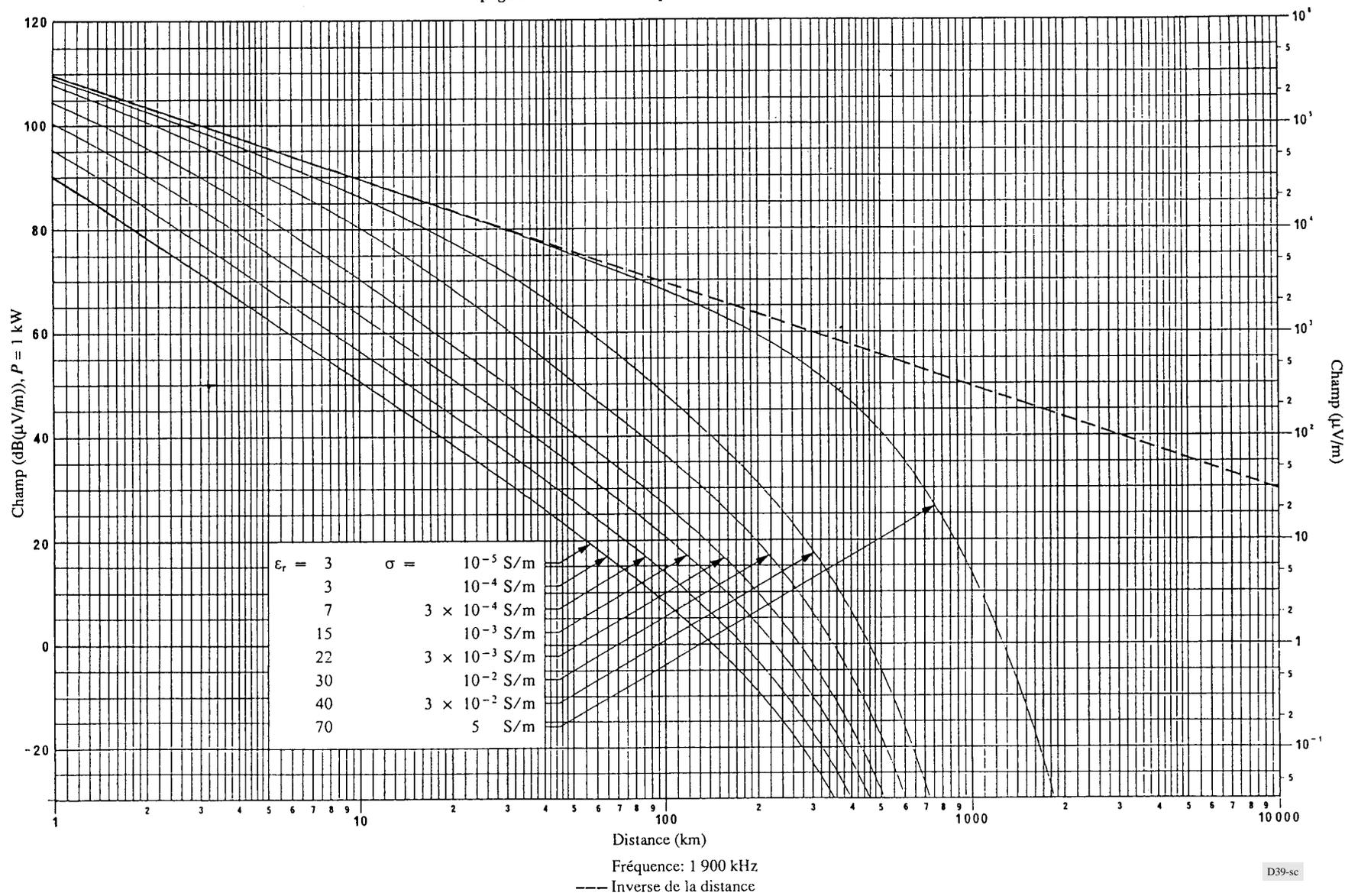


FIGURE 40

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

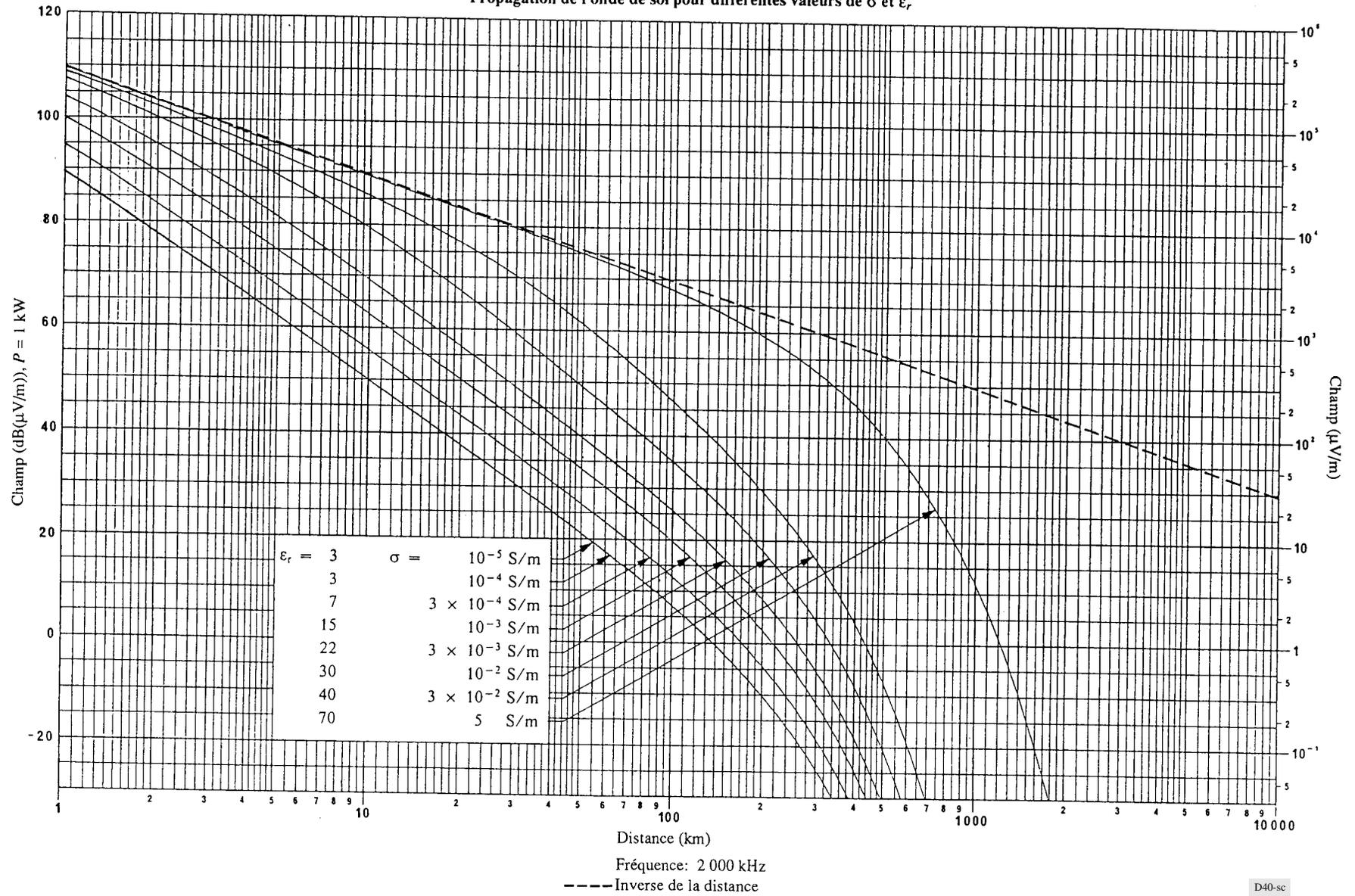


FIGURE 41

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

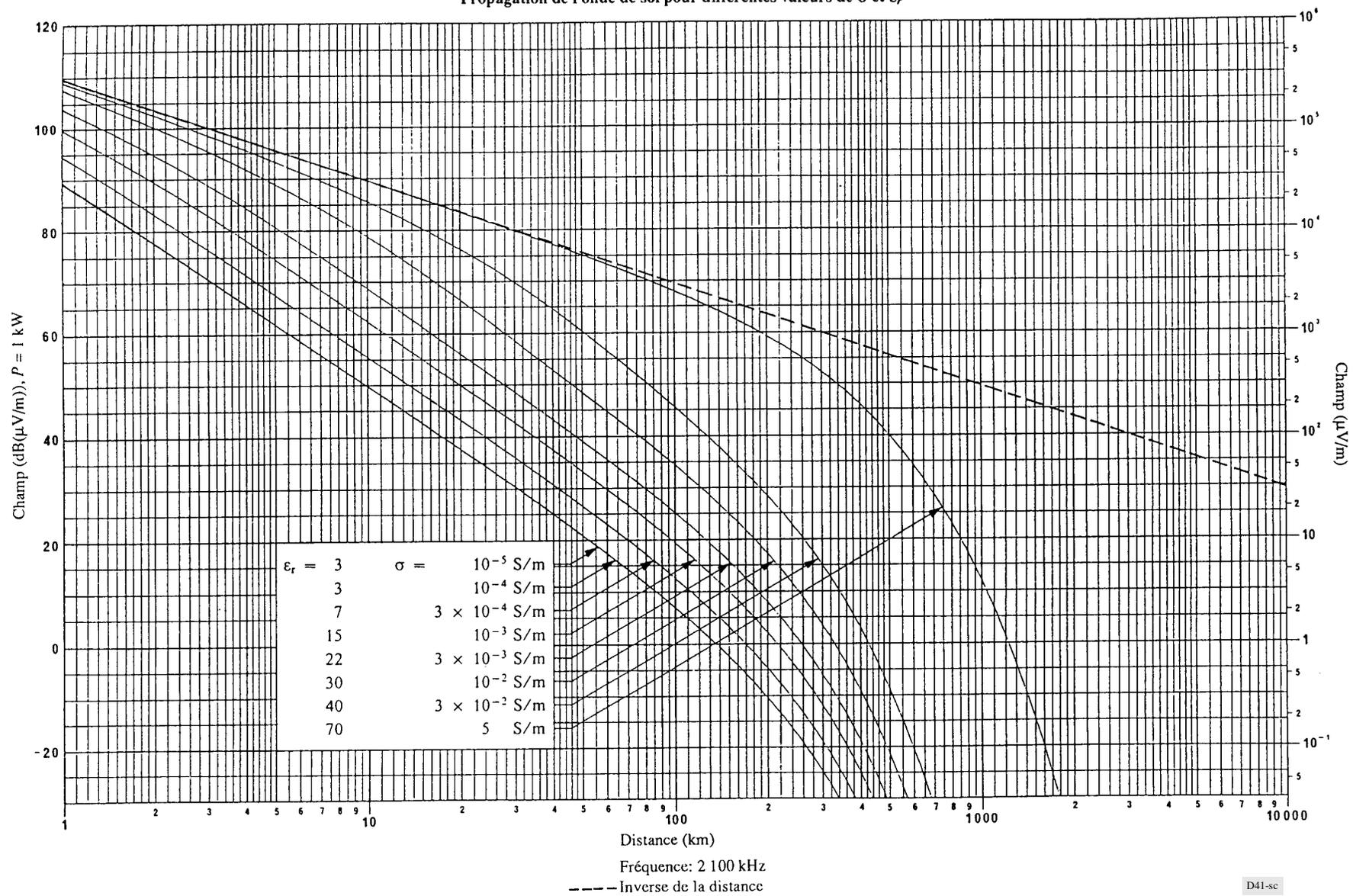


FIGURE 42

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

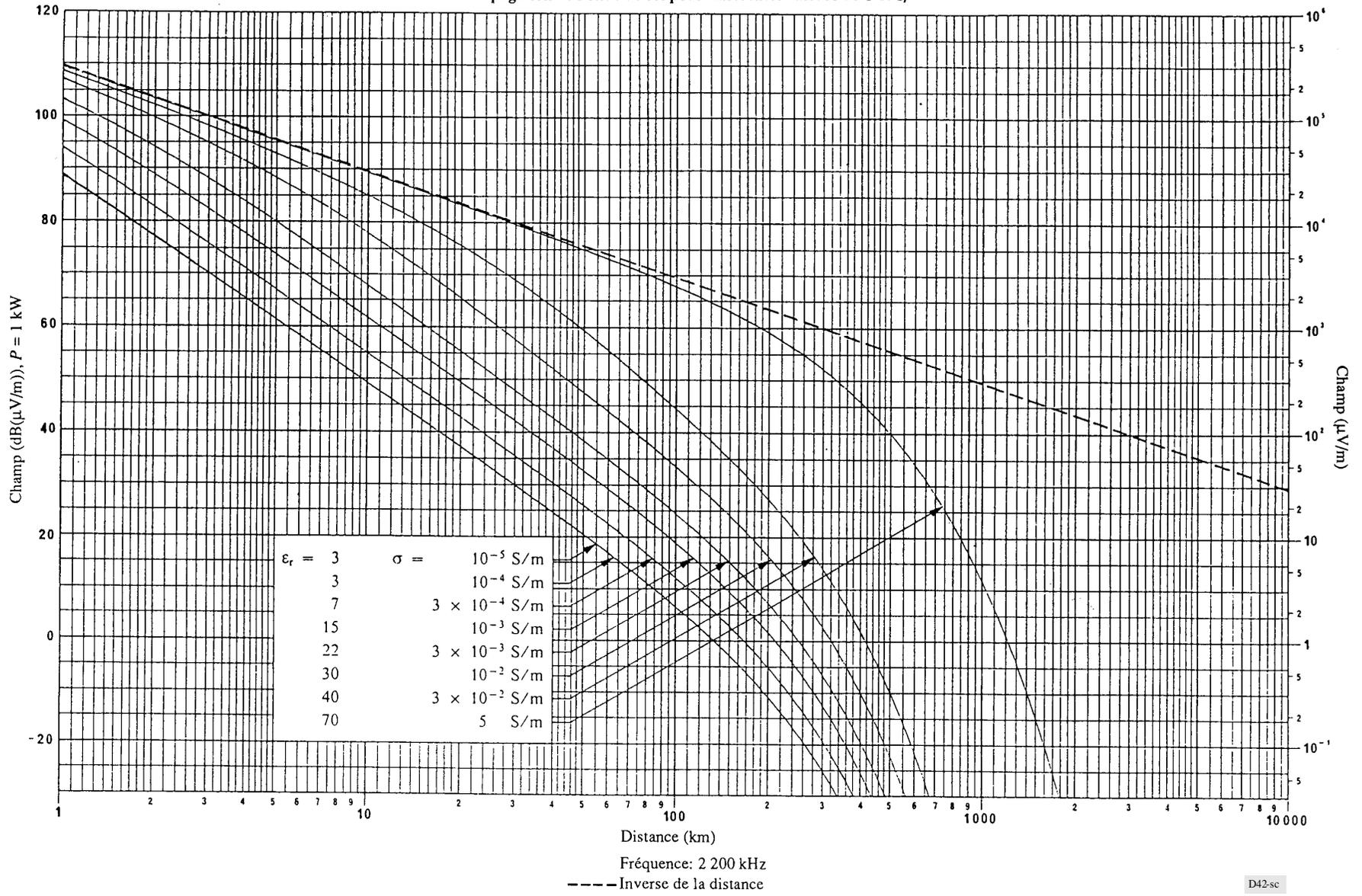
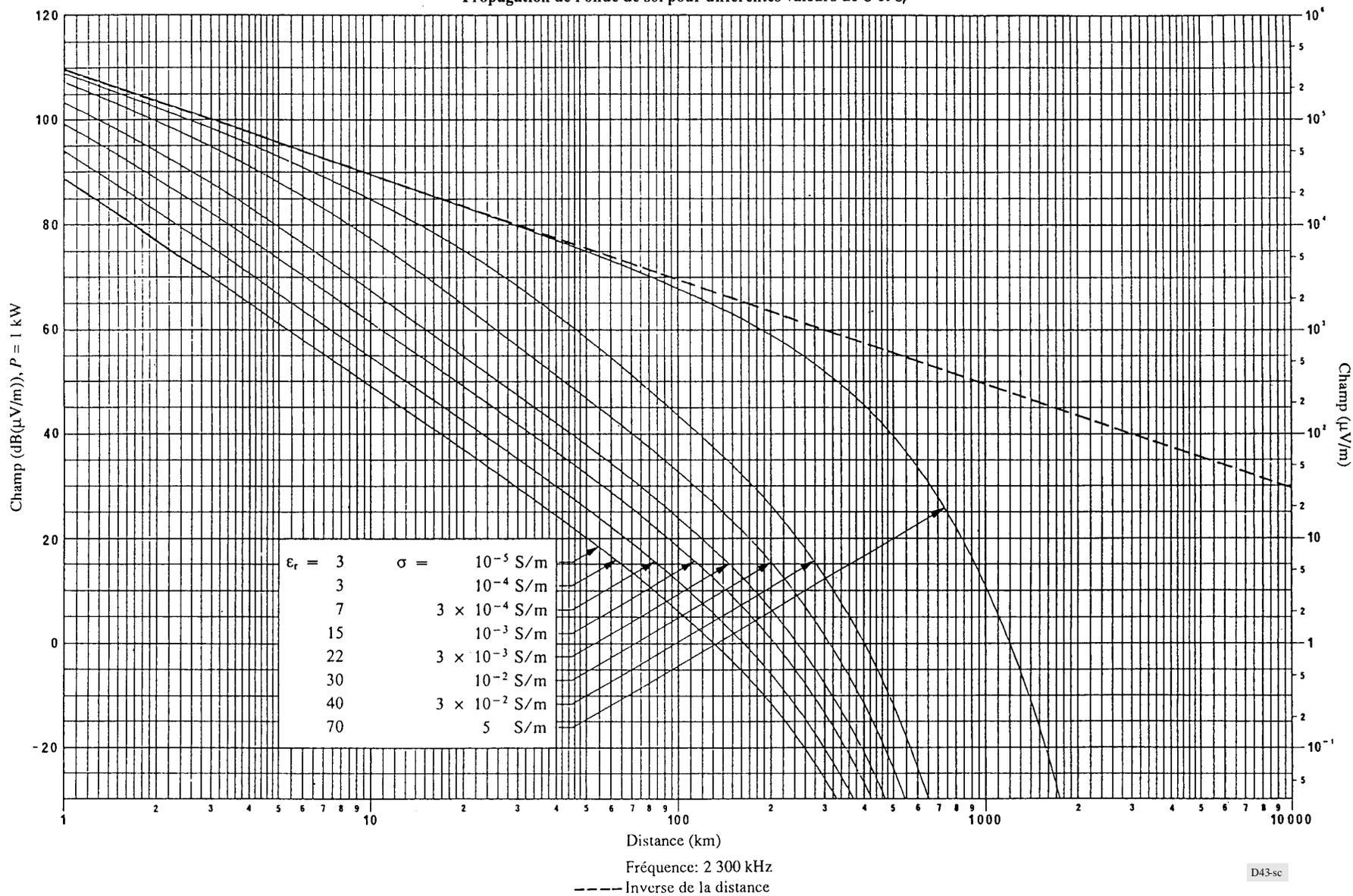


FIGURE 43

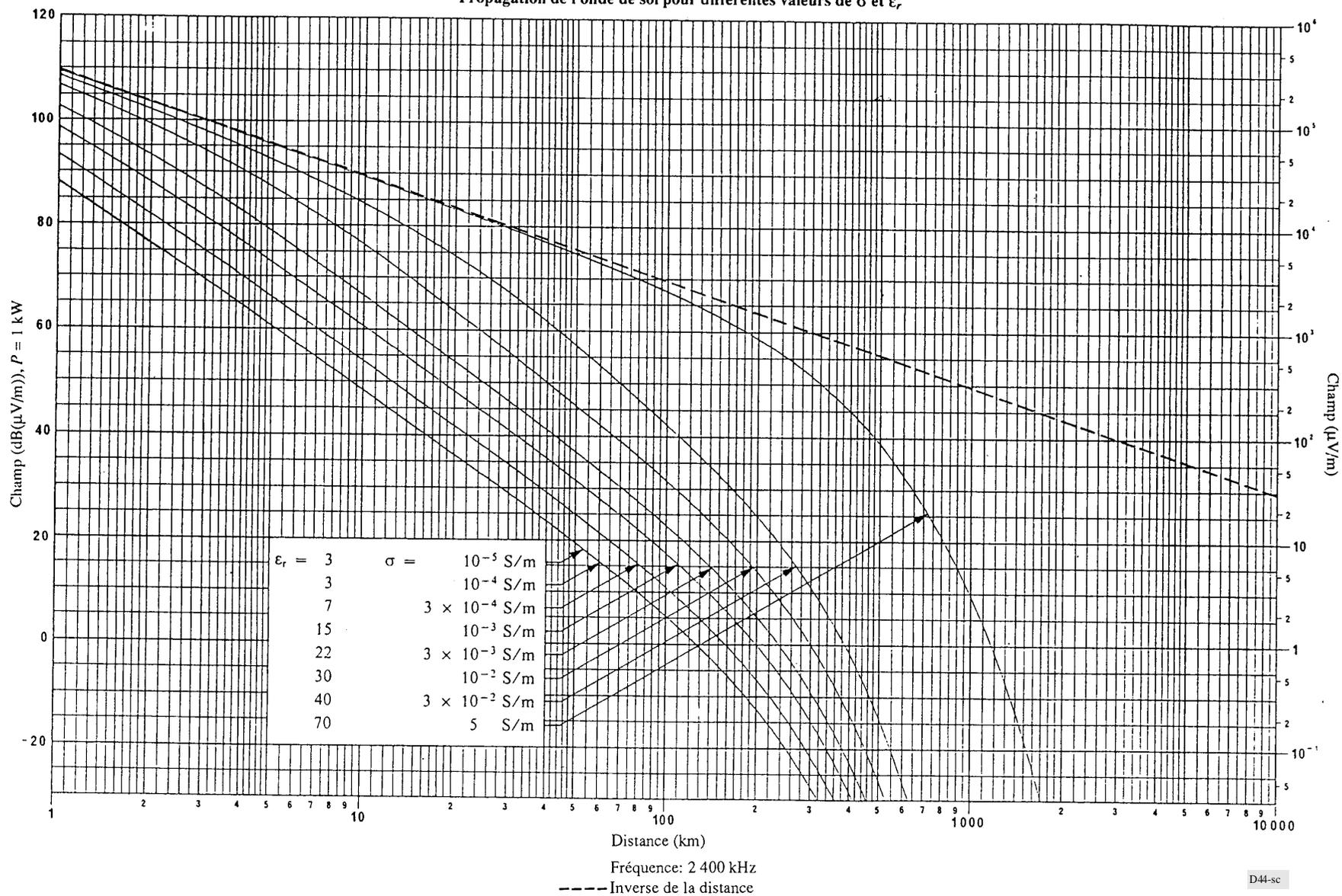
Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D43-sc

FIGURE 44

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



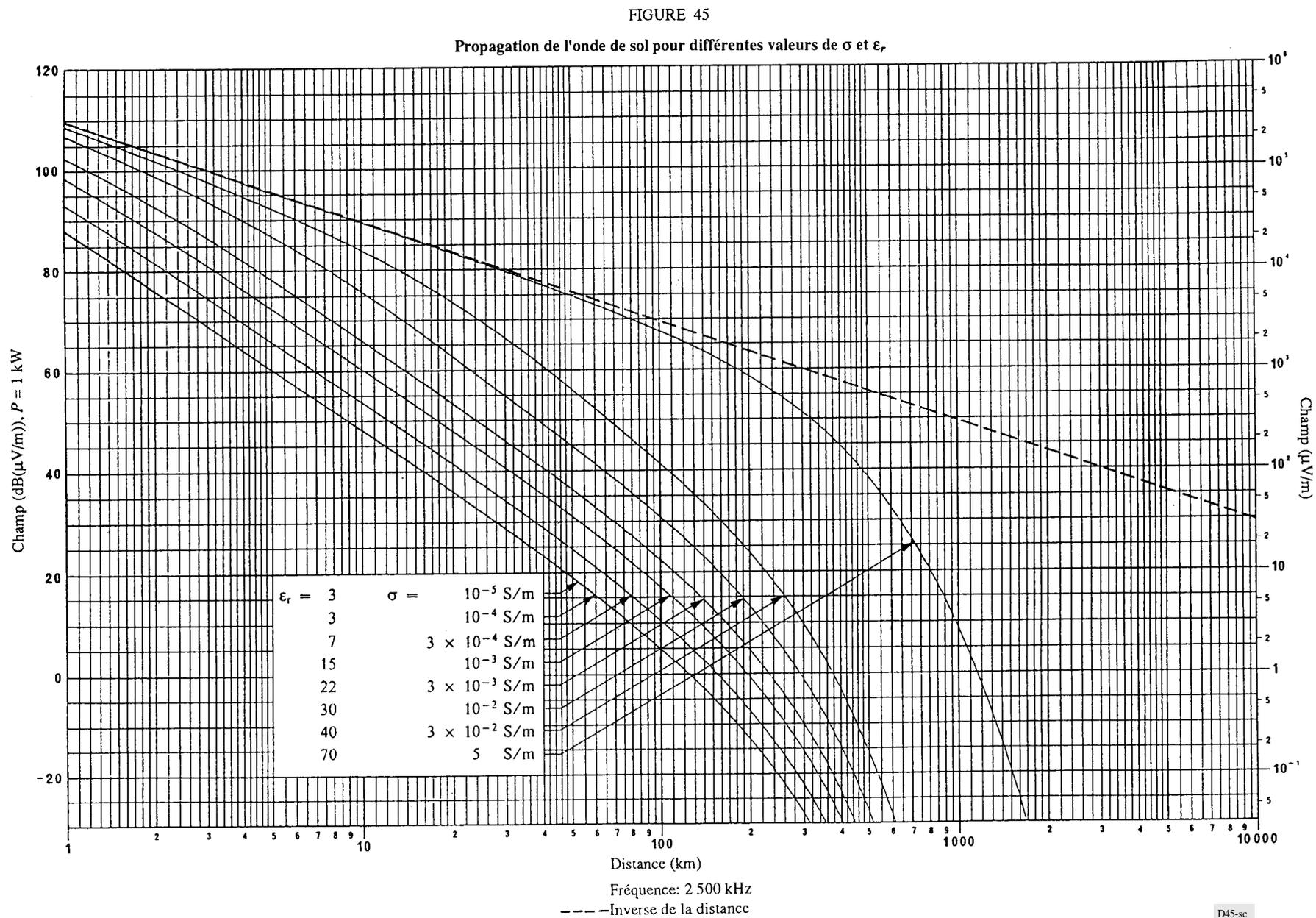


FIGURE 46

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

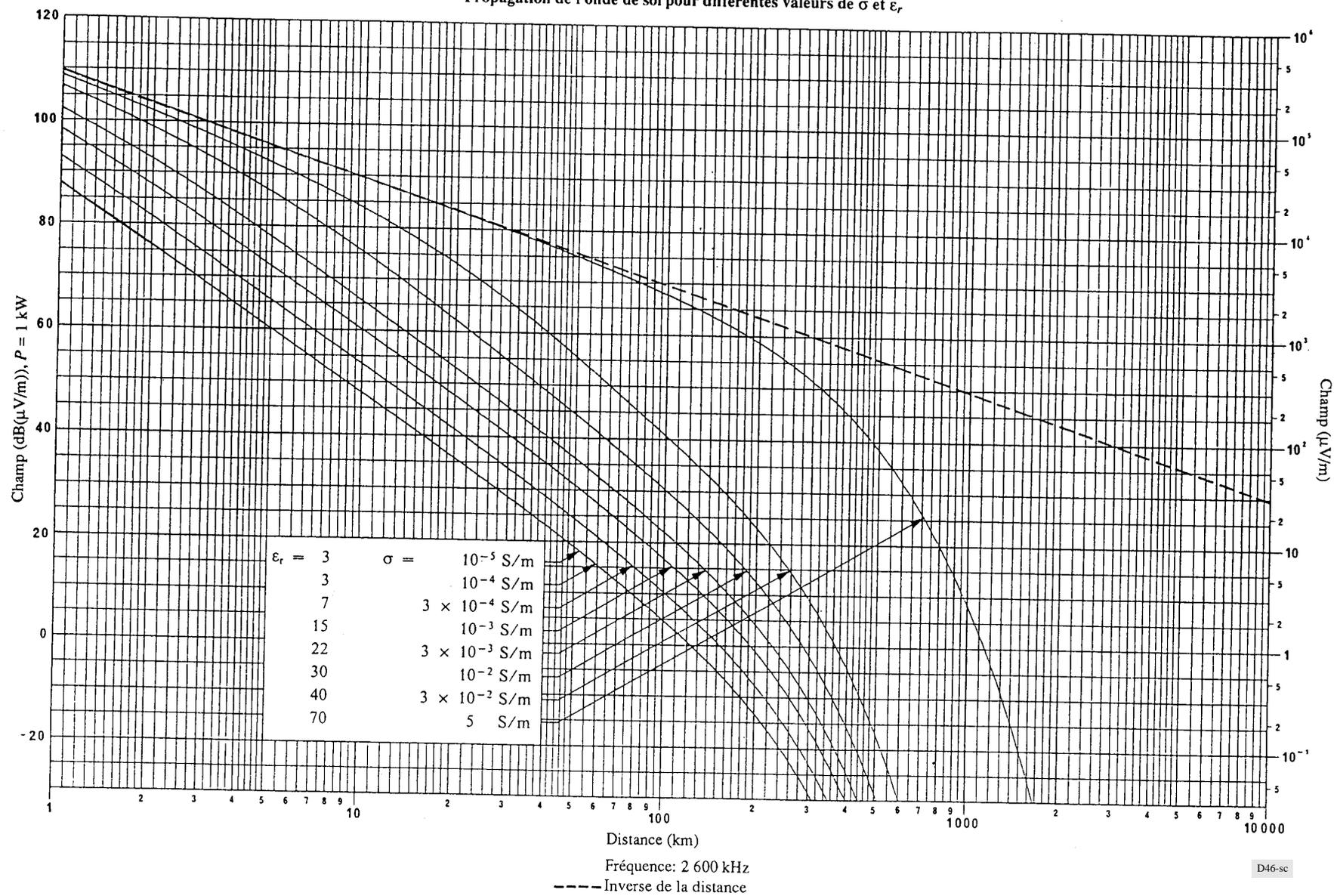


FIGURE 47

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

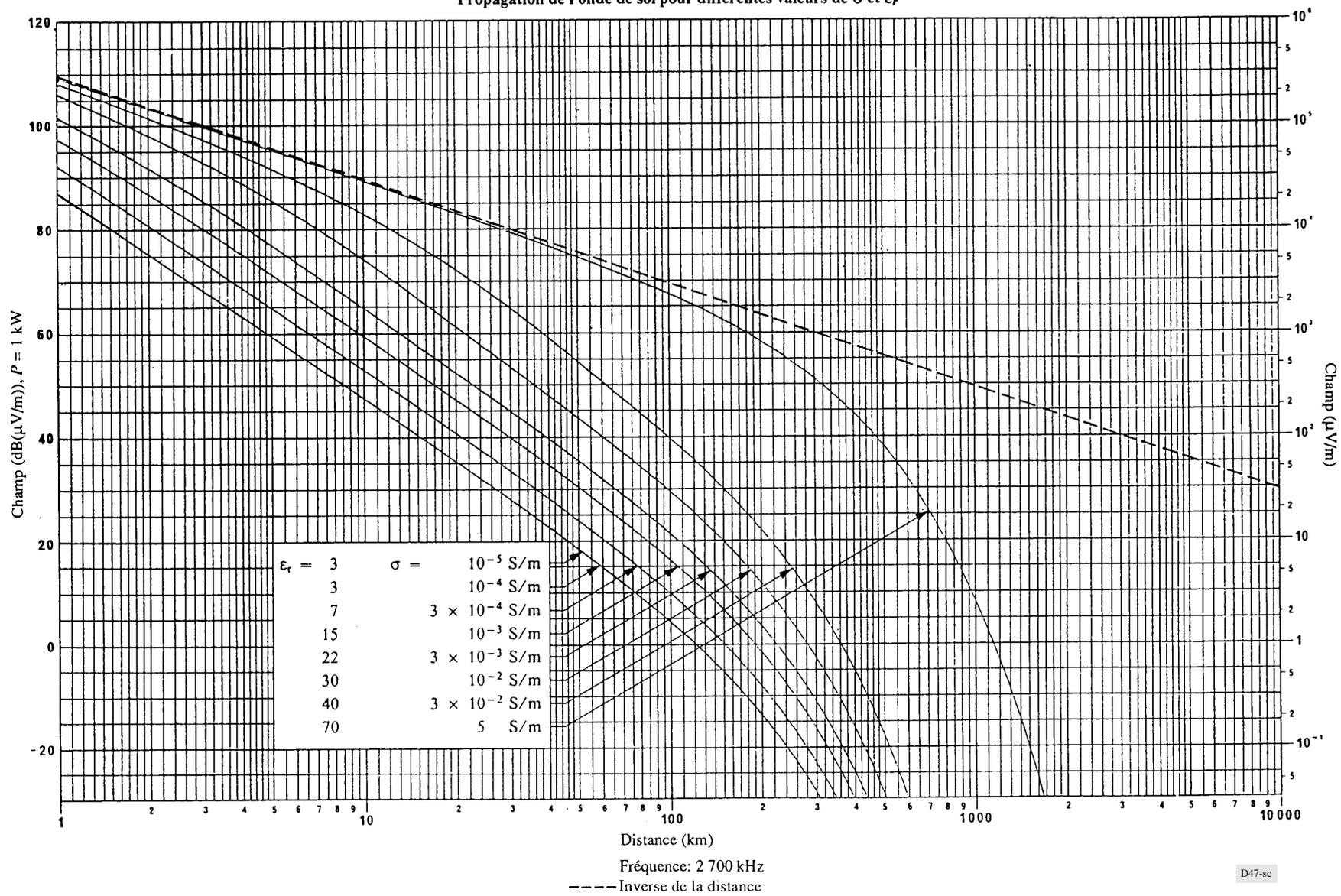


FIGURE 48

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

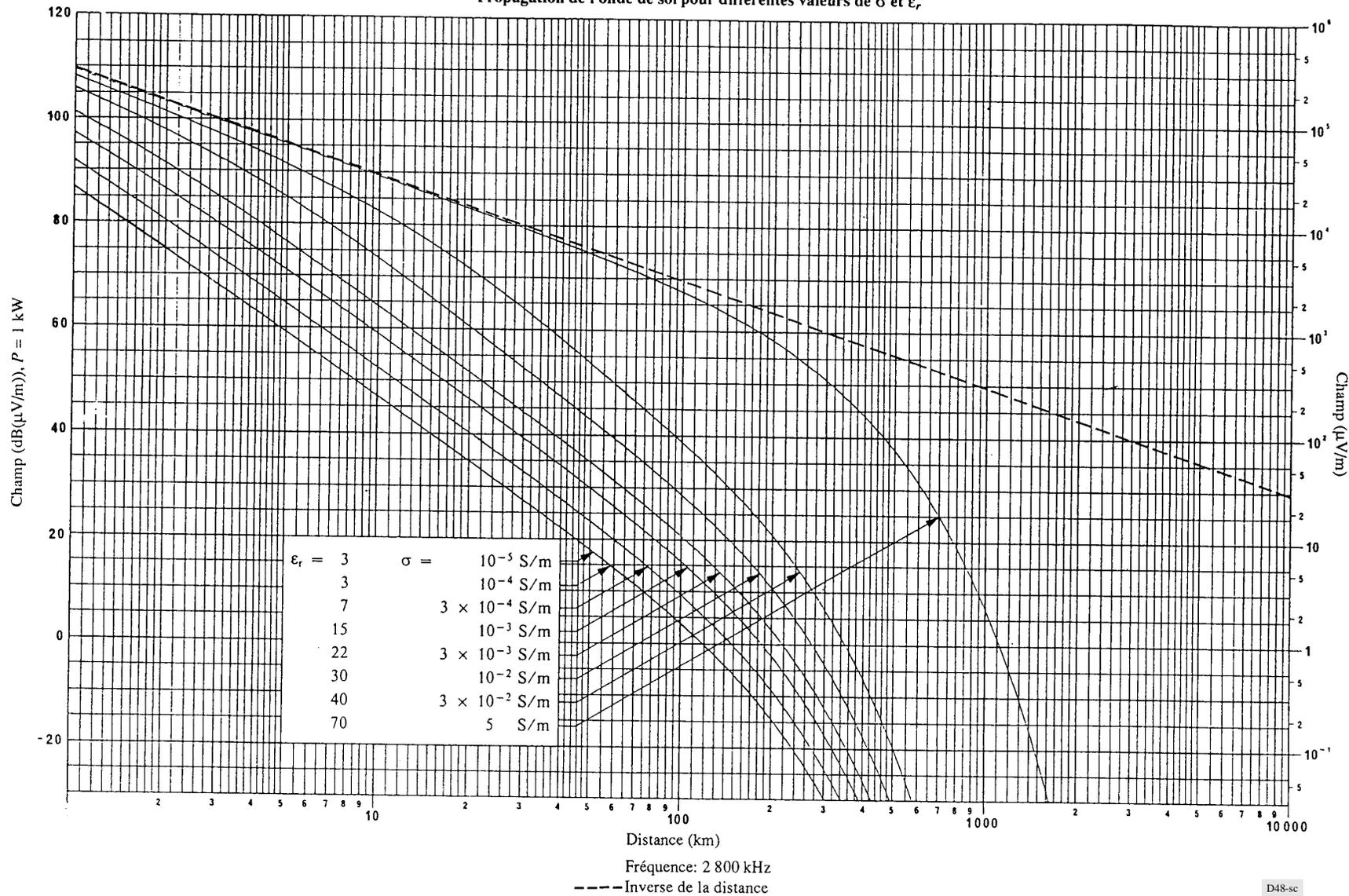


FIGURE 49

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r

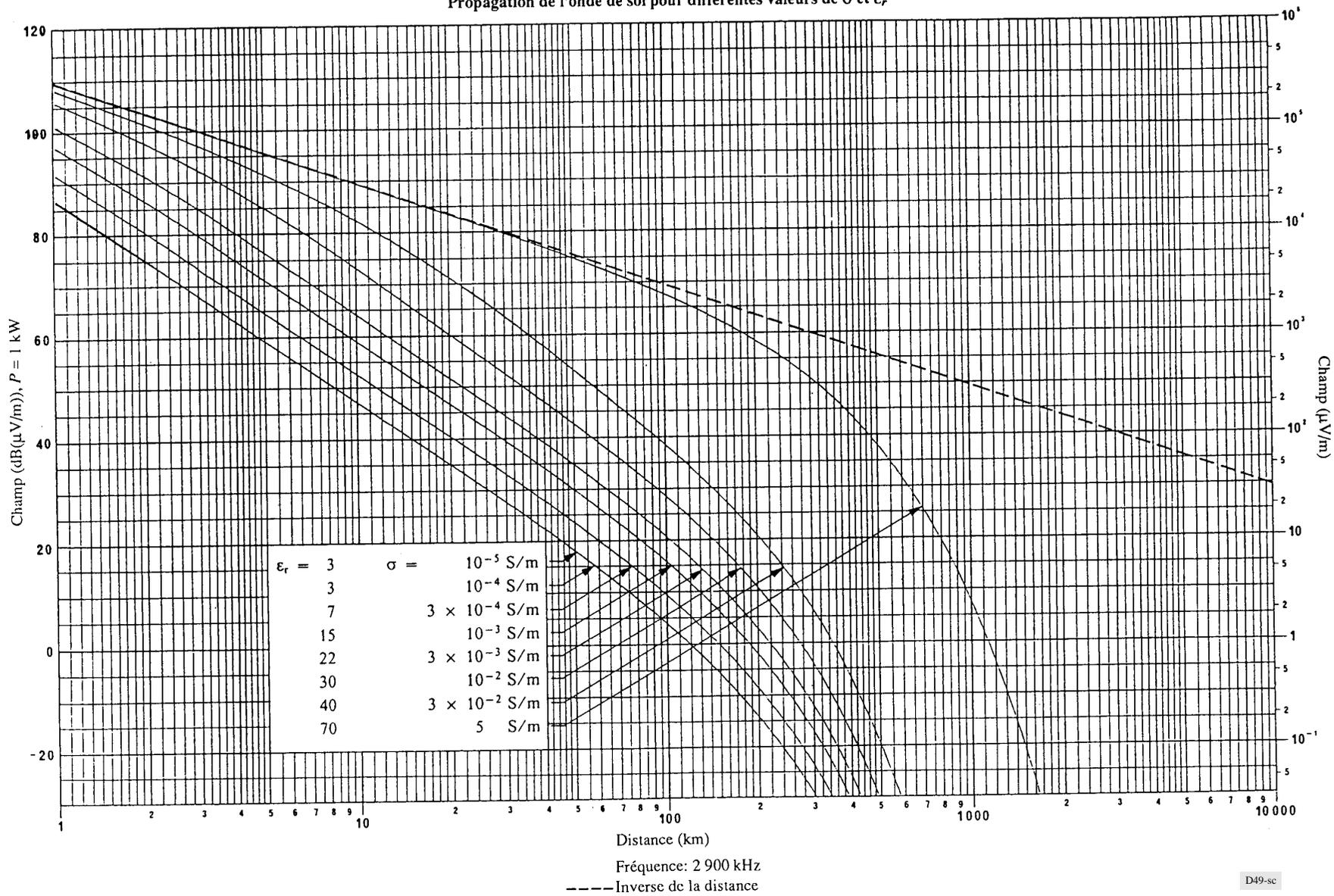
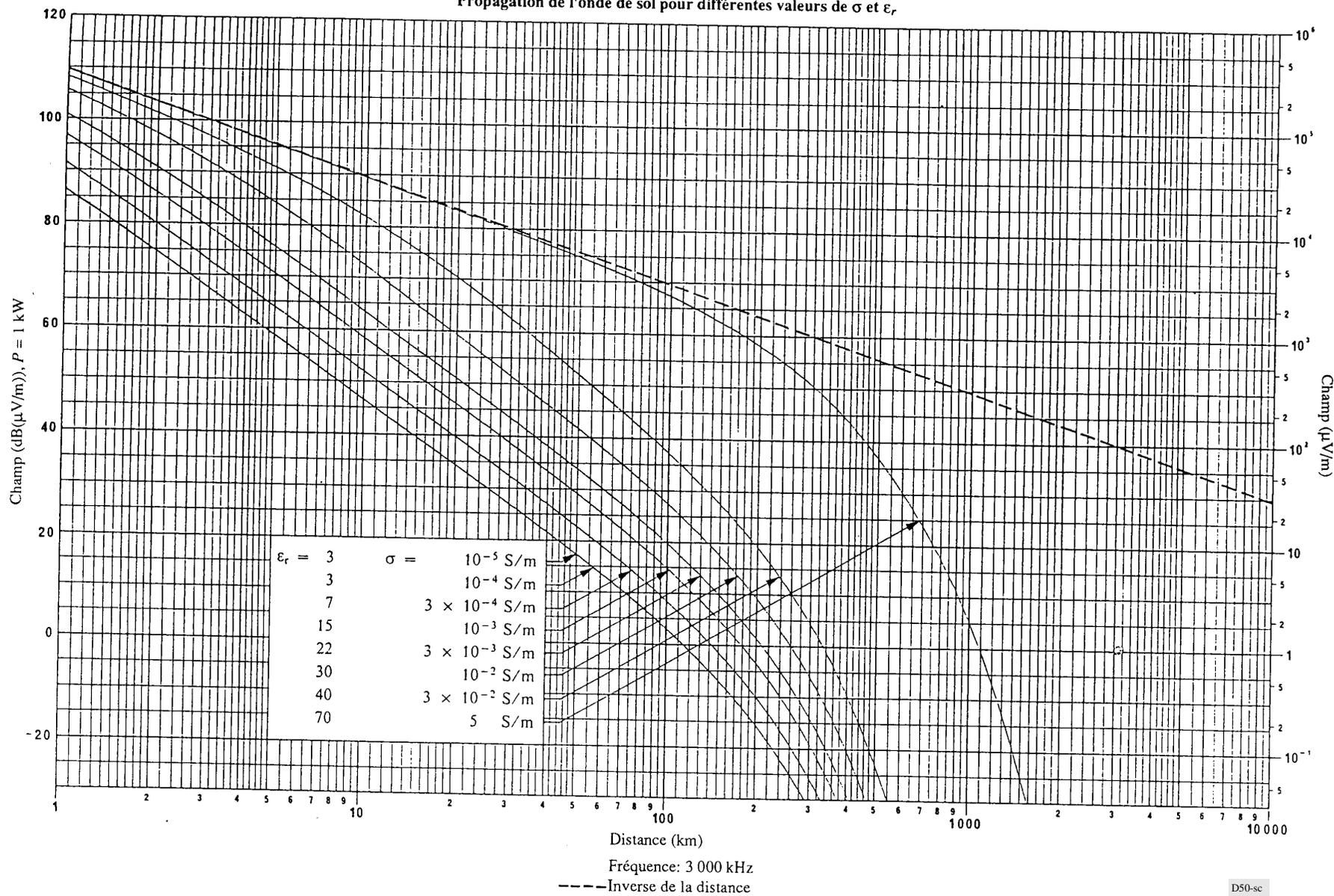


FIGURE 50

Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de σ et ϵ_r



D50-sc

ANNEXE 3

Elaboration des courbes de propagation

Le programme d'ordinateur GRWAVE a été utilisé pour produire les courbes de propagation des Annexes 1 et 2. GRWAVE effectue le calcul du champ de l'onde de sol dans une atmosphère exponentielle en fonction de la fréquence, des hauteurs d'antenne et des constantes du sol; la gamme de fréquences va approximativement de 10 kHz à 10 GHz.

Ce programme est disponible, avec sa documentation, dans les pages du site web de l'UIT-R traitant de la Commission d'études 3 des radiocommunications.
