

RAPPORT 879-1

**MÉTHODES PERMETTANT D'ÉVALUER LES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES
ÉQUIVALENTES DU SOL**

(Décision 3)

(1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de la mesure des caractéristiques électriques équivalentes du sol. La connaissance de ces caractéristiques présente une importance particulière pour la planification de la radiodiffusion à ondes hectométriques et kilométriques car, dans ce service, la propagation se fait essentiellement par l'onde de sol. Les valeurs de la conductivité équivalente du sol se situent d'ordinaire entre 0,1 et 30 mS/m. L'ampleur de cette variation entraîne, pour le champ d'un signal à 1 MHz à une distance de 100 km, une variation de 44 dB, ainsi qu'on peut le voir sur les courbes de la Recommandation 368. La connaissance de ces caractéristiques est donc indispensable à la fois pour pouvoir estimer avec précision la couverture de la radiodiffusion à ondes hectométriques et kilométriques et pour procéder aux calculs de brouillage.

2. Les caractéristiques électriques équivalentes du sol

On utilise l'expression de «caractéristiques électriques équivalentes» dans le domaine de la propagation par l'onde de sol afin de souligner le fait que les valeurs de la conductivité σ et de la permittivité (constante diélectrique) ϵ_r , qu'il faut utiliser pour calculer le champ de l'onde de sol peuvent différer de celles que fourniraient des mesures en laboratoire. Dans bien des cas, on est amené à modifier les valeurs des caractéristiques électriques relevées en surface à cause d'irrégularités du terrain ou de l'existence de couches dans le sous-sol. Aux basses fréquences et pour les faibles conductivités de surface, l'affaiblissement de propagation de l'onde de sol peut être déterminé par la conductivité de ces couches.

2.1 Importance relative de la conductivité et de la permittivité

Pour un sol homogène, la permittivité ϵ a peu d'influence sur l'affaiblissement de transmission de l'onde de sol dans les bandes hectométriques et kilométriques si la valeur ϵ_r est nettement inférieure à $60 \lambda \sigma$. Dans la plupart des cas, il suffit d'utiliser les valeurs de ϵ associées aux gammes de conductivité estimée que l'on trouve dans la Recommandation 527. Une autre solution consiste à utiliser la relation empirique trouvée par Hanle [1966] $\epsilon_r = 50 \sigma^{1/5}$, dans laquelle la conductivité est exprimée en S/m.

Au-dessus d'un sol constitué de couches stratifiées horizontalement, il peut arriver que la permittivité équivalente devienne très grande ou même négative [Eliassen, 1957; Wait, 1970]. Il est donc possible que la relation $\epsilon_r \ll 60 \lambda \sigma$ ne soit pas satisfaite pour les caractéristiques électriques équivalentes, alors même qu'elle le serait pour la couche superficielle et pour les couches sous-jacentes. Wait [1970] a établi une relation théorique pour les caractéristiques électriques équivalentes au-dessus d'un sol à stratification horizontale. Le Rapport 716 examine la nécessité d'utiliser l'impédance de surface équivalente totale (complexe) lorsque l'on calcule la phase de l'onde de sol pour les systèmes de radionavigation de précision [Johler et Horowitz, 1974].

2.2 Influence de la fréquence sur les caractéristiques électriques

Comme le montre la Fig. 1 de la Recommandation 527, la conductivité d'échantillons de sol varie avec la fréquence, dès que celle-ci est supérieure à 10 MHz. Au-dessous de cette valeur, la conductivité du sol ne dépend plus elle-même de la fréquence.

Les caractéristiques électriques équivalentes, quant à elles, varient en fonction de la fréquence lorsque les valeurs à la surface sont modifiées par la présence de couches sous-jacentes ou par l'irrégularité du terrain. L'influence des couches est fonction du rapport de l'épaisseur de la couche la plus élevée à la profondeur de pénétration. Il se peut donc que les constantes équivalentes du sol ne soient pas du tout les mêmes dans la bande décimétrique que dans la bande kilométrique. L'effet des irrégularités du terrain sur les caractéristiques électriques équivalentes dépend du rapport des variations d'altitude du terrain à la longueur d'onde. On trouvera davantage de renseignements sur ce sujet dans le Rapport 1145.

2.3 Profondeur de pénétration

De ce qui vient d'être dit, on peut conclure que les caractéristiques électriques équivalentes sont déterminées par la mesure dans laquelle le champ électromagnétique pénètre dans le sol. Celle-ci est caractérisée par la «profondeur de pénétration» représentée sur la Fig. 2 de la Recommandation 527. Dans la bande des ondes hectométriques, cette profondeur est généralement comprise entre 5 et 100 m. En conséquence, toute méthode de mesure des caractéristiques électriques équivalentes doit reposer soit sur des mesures radioélectriques à la fréquence considérée, soit sur des mesures du sol jusqu'à la profondeur de pénétration à cette fréquence.

3. Première approximation de la conductivité équivalente

Pour avoir une première idée de la conductivité équivalente dans une région pour la bande des ondes hectométriques, on peut partir de ce que l'on sait de la structure géologique et lithologique de cette région. Cela résulte du fait que l'on a observé, aux Etats-Unis et au Canada, un lien entre les mesures des conductivités équivalentes dans cette bande et les propriétés structurales du sol [Barghausen et autres, 1966]. La Fig. 1 peut servir de base pour cette première approximation. Des relations du même genre entre conductivité et structure ont également été mises en évidence pour l'URSS [Yakoupov et autres, 1969] et pour la Norvège [Eliassen, 1957].

Ces premières approximations de la conductivité s'expriment sous la forme d'une gamme de valeurs possibles assez large, aussi le champ de l'onde de sol dans la bande des ondes hectométriques que l'on évaluerait en prenant pour conductivité la valeur au milieu de cette gamme risque-t-il d'être entaché d'une incertitude pouvant atteindre ± 10 dB à une distance de moins de 100 km. Une telle estimation est cependant utile pour avoir une idée de la couverture de la radiodiffusion lorsqu'on ne dispose d'aucun résultat de mesure, et aussi pour faire les plans d'une campagne de mesure de conductivité équivalente sur le terrain. La *Carte mondiale des sols* de l'UNESCO et de la FAO est une source utile de renseignements géologiques et lithologiques.

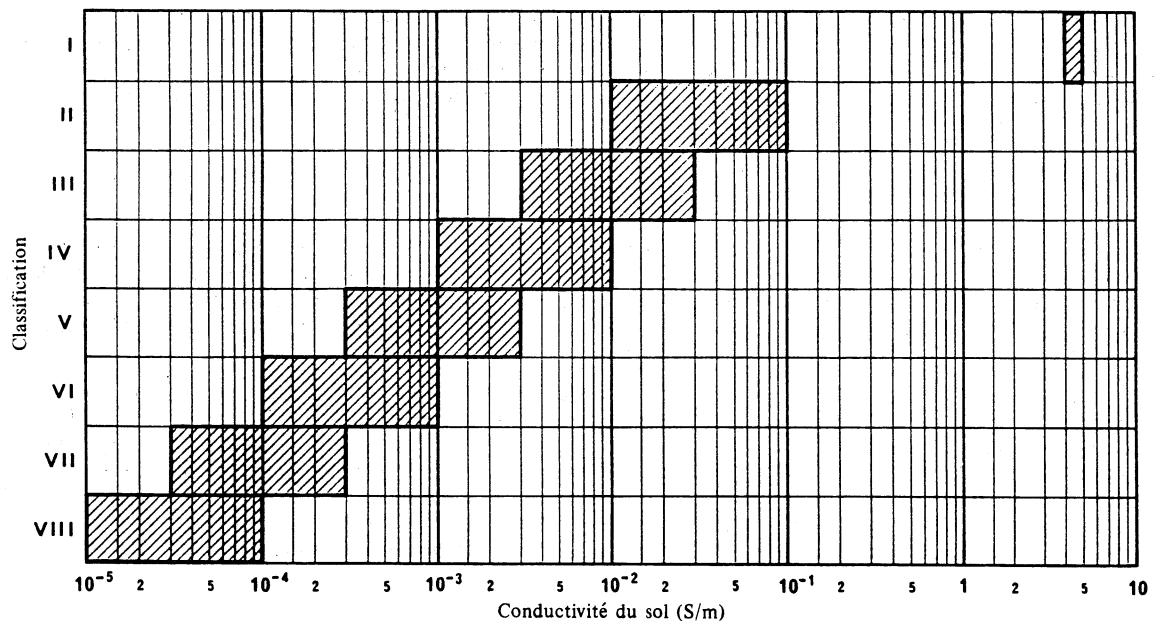


FIGURE 1 – Gammes prévues de conductivité effective du sol

Classification	Type de sol
I	Eau de mer*
II	Sols très humides, sols cultivés humides
III	Marais (eau douce), sols cultivés
IV	Eau douce, sols cultivés sablonneux, collines en climat tempéré
V	Sols moyennement secs, rochers, sables villes moyennes
VI	Sols secs, déserts
VII	Sols très secs, montagnes granitiques en régions froides, zones industrielles
VIII	Glaciers secs en zones montagneuses, permafrost, glaces polaires, hautes montagnes rocheuses en climats tempérés et froids

* Dans certaines zones, par exemple la mer Baltique, la conductivité de l'eau de mer peut être beaucoup plus faible (voir le § 5 du Rapport 229).

4. Mesures sur le terrain des caractéristiques électriques équivalentes

Nous examinerons dans ce qui suit la méthode fondée sur l'inclinaison des ondes et la méthode de mesure de l'affaiblissement. Ce sont les deux meilleures méthodes du point de vue de leur application à la propagation, car on peut établir une relation directe entre leurs résultats et les valeurs équivalentes dont on a besoin pour faire le calcul du champ de l'onde de sol.

Sur un terrain homogène, ces méthodes s'appliquent aisément. La première exige qu'en chaque point on mesure trois grandeurs, mais les caractéristiques électriques s'en déduisent directement. Avec la seconde, on n'a à faire qu'une mesure de champ en chaque point, mais l'analyse des résultats exige que l'on adapte une série de points de mesure aux courbes théoriques de propagation de l'onde de sol.

Dans le cas d'un sol non homogène, l'interprétation des mesures peut être au contraire très difficile. La difficulté provient de ce que le champ subit un changement brusque à la ligne de démarcation entre deux régions de conductivités différentes. Ces effets ont d'ailleurs tendance à s'atténuer à mesure que l'on s'éloigne de l'émetteur. On doit donc, quand les mesures se font à une distance suffisante de l'émetteur, veiller à ce que le «régime permanent», caractéristique du sol et non de la frontière, ait été établi. Etant donné que l'on connaît bien le comportement du champ électromagnétique au-dessus d'un sol horizontalement non homogène (voir la Recommandation 368), c'est à la méthode de mesure de l'affaiblissement que l'on donnera la préférence en pareil cas. Dans l'une et l'autre méthodes, il est très important de faire les mesures en plusieurs points le long d'un trajet radial issu de l'émetteur, de manière que l'on puisse reconnaître rapidement le passage d'une région à une région de conductivité différente.

4.1 Méthode fondée sur l'inclinaison des ondes

4.1.1 Mode opératoire

Un article de King [1976] comporte une liste d'ouvrages consacrés à cette méthode depuis une quarantaine d'années. Eliassen [1957] a donné des conseils pratiques détaillés sur les techniques de mesure. La méthode repose sur le fait que, au-dessus d'une surface de conductivité finie, le champ électrique dû à une source à polarisation verticale a une légère composante horizontale dirigée dans le sens de la propagation. Le vecteur champ électrique total est donc incliné sur la verticale locale comme le montre la Fig. 2. La composante verticale E_z et la composante horizontale E_x de ce champ n'étant pas en phase, l'extrémité du vecteur champ décrit une ellipse dans le plan défini par la verticale et par la direction de propagation. Entre les caractéristiques électriques et les deux composantes du champ, on a les relations simples:

$$\varepsilon_r = |E_z/E_x|^2 \cos 2\varphi \quad (1a)$$

$$\sigma/f = |E_z/E_x|^2 (\sin 2\varphi)/18\,000 \quad (1b)$$

φ étant l'angle de phase électrique entre les composantes du champ et f la fréquence de l'onde de sol en MHz.

Dans la pratique, il est très difficile de mesurer la composante horizontale E_x car elle est généralement beaucoup plus faible que la composante verticale E_z . Un léger défaut d'alignement de l'antenne de mesure donne lieu à une composante d'erreur appréciable provenant de E_z . De plus, la mesure de φ implique la mise en œuvre d'un matériel dispendieux.

La méthode de mesure habituelle consiste à utiliser un mesureur de champ relié à un petit doublet capable de tourner, en son centre, autour d'un axe normal aux composantes du champ. On note le maximum (E_1) et le minimum (E_2) des champs relevés pendant la rotation de l'antenne et on calcule le rapport $r = E_2/E_1$. On note en outre l'inclinaison θ de la direction de E_1 sur la verticale. Etant donné que l'on a besoin de connaître uniquement le rapport r des composantes du champ, cette méthode présente l'avantage que l'antenne et le mesureur de champ utilisés n'ont pas à être étalonnés.

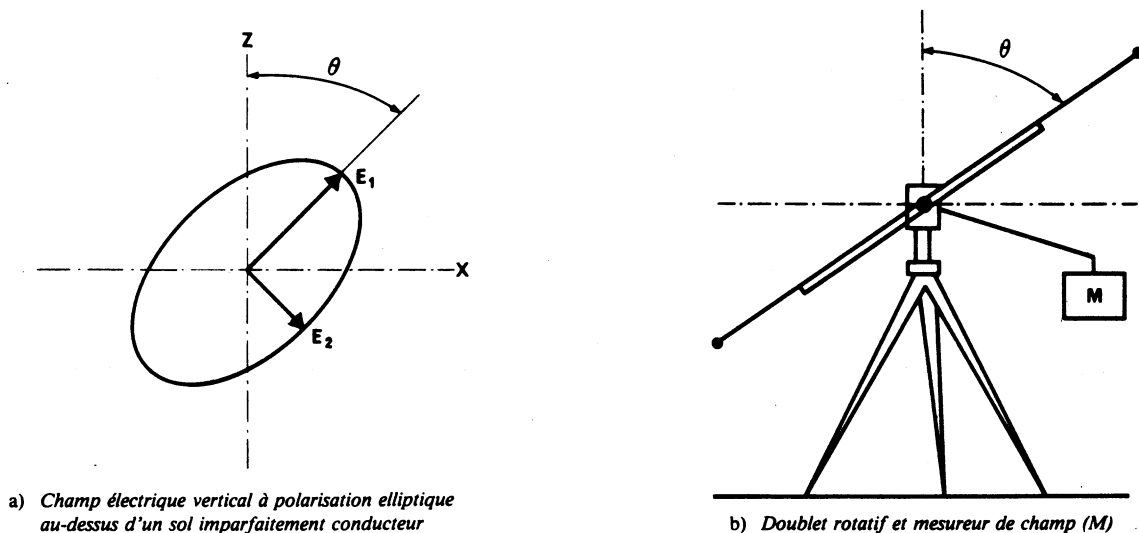


FIGURE 2

4.1.2 Analyse des données obtenues

Les grandeurs qui interviennent dans la relation (1) sont liées à r et à θ par les formules

$$E_v/E_z = \sqrt{\frac{r^2 + \operatorname{tg}^2 \theta}{1 + r^2 \operatorname{tg}^2 \theta}} \quad (2a)$$

$$\cos 2\varphi = \frac{(1 - r^2) \sin 2\theta - 4r^2}{(1 - r^2) \sin 2\theta + 4r^2} \quad (2b)$$

Les caractéristiques électriques peuvent s'obtenir soit par une analyse numérique des résultats de mesure, soit directement à partir des valeurs de r et de θ comme le montre la Fig. 3 [Eaton, 1976].

4.1.3 Exactitude des résultats

Le rectangle hachuré A de la Fig. 3 correspond à une erreur de mesure de $\pm 1^\circ$ sur l'inclinaison du champ électrique et de ± 1 dB sur le rapport des axes de l'ellipse. On voit d'après cette figure que l'exactitude du résultat obtenu dépend surtout de celle de la mesure de l'inclinaison. De même, l'exactitude de la permittivité équivalente est étroitement liée à celle du rapport des axes. Pour les applications aux télécommunications, il faut encore évaluer l'influence de cette erreur expérimentale sur l'incertitude qu'elle introduit dans les calculs de champ.

La méthode fondée sur l'inclinaison des ondes donne des valeurs des caractéristiques électriques à partir de mesures faites en un seul point, mais il est important que l'étude d'une zone donnée comporte une série de mesures faites le long d'une droite issue de la source de rayonnement. C'est ainsi que l'on doit procéder si l'on veut reconnaître les frontières entre des régions où les caractéristiques électriques ne sont pas les mêmes. Au-dessus d'un sol homogène, l'inclinaison et le rapport des axes sont indépendants de la distance à la source de rayonnement; cela suppose que les mesures sont faites à une distance supérieure à plusieurs longueurs d'onde. Au-dessus d'un sol non homogène, l'inclinaison et le rapport des axes subissent une discontinuité à la frontière entre deux régions de conductivités différentes. Les valeurs des constantes équivalentes évoluent alors lentement quand on s'éloigne en ligne droite de la source, jusqu'à ce que soient atteintes les valeurs caractéristiques de la nouvelle région [Blomquist, 1975]. Il peut arriver que cela n'ait lieu qu'après un très long parcours. Si l'on pénètre dans une troisième région de conductivité avant que les nouvelles valeurs d'équilibre aient été atteintes, l'interprétation des données fournies par la méthode fondée sur l'inclinaison des ondes risque de devenir très difficile [Stokke, 1978].

Cependant, si l'on tient compte de ces limitations, la méthode fondée sur l'inclinaison des ondes donne des résultats satisfaisants. Des mesures faites en République fédérale d'Allemagne montrent une très bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées avec la méthode de Millington, lorsque la méthode fondée sur l'inclinaison des ondes est utilisée pour mesurer la conductivité du sol [Damboldt, 1981].

4.2 Méthode fondée sur la mesure de l'affaiblissement

Cette méthode consiste à faire des mesures de champ le long d'un axe ayant son origine à l'emplacement d'une antenne d'émission à polarisation verticale et à adapter les résultats obtenus à des courbes théoriques comme celles de la Recommandation 368. Si les points s'adaptent bien à certaines courbes, on en conclut que les constantes équivalentes du sol le long de l'axe emprunté pour les mesures sont les mêmes que celles que l'on avait utilisées pour calculer ces courbes.

4.2.1 Mode opératoire

Les méthodes générales de mesure du champ sont décrites dans le Rapport 227. Il importe que, le long de l'axe choisi, on prenne des mesures en un nombre suffisant de points afin de pouvoir tracer une courbe expérimentale régulière et mettre en évidence les variations rapides de sa pente; ce dernier point est important pour la reconnaissance des frontières entre régions de conductivités différentes ou encore des trajets non homogènes. La méthode de mesure de l'affaiblissement se heurte à une difficulté matérielle: celle de trouver un nombre suffisant de routes ou autres voies d'accès à un certain nombre de points alignés le long du trajet radial choisi.

Une manière moderne de procéder aux mesures par la méthode de l'affaiblissement a été utilisée avec succès en Finlande [Laiho, 1976; Koskenniemi et Laiho, 1975]. Le mesureur de champ est installé à bord d'un aéronef léger ou d'un hélicoptère; l'antenne de mesure est montée à l'extérieur. Tandis que l'aéronef suit un trajet rectiligne issu de la source de rayonnement, on enregistre en permanence la valeur du champ ainsi que des données de navigation sur un enregistreur à bande. De telles mesures sont très économiques car on peut couvrir une vaste région en quelques heures de vol avec seulement un pilote et un navigateur chargé également du matériel de mesure de l'enregistrement.

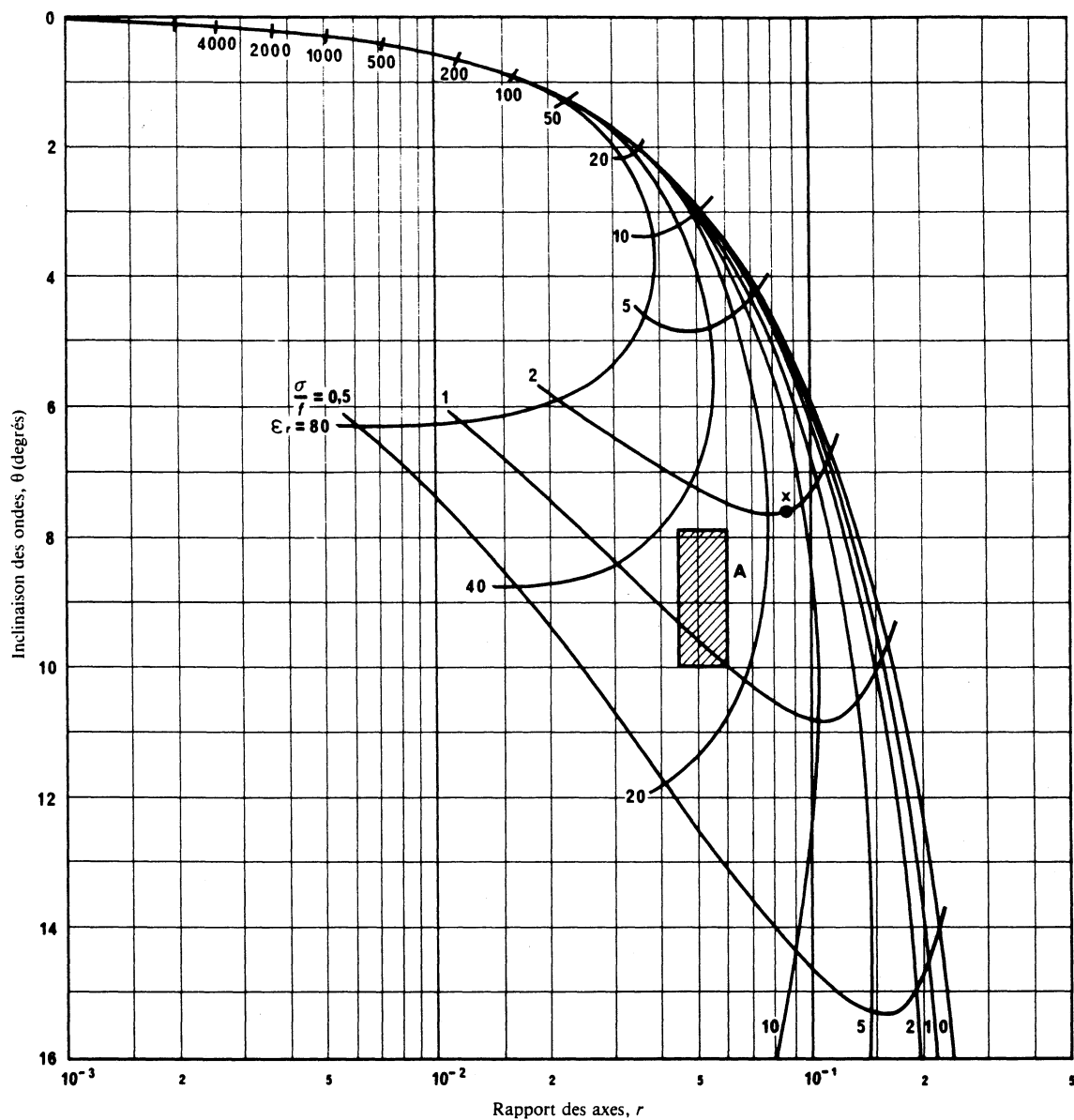


FIGURE 3 – Relation entre l'inclinaison des ondes (θ), le rapport des axes de l'ellipse (r), et les caractéristiques du sol

(La conductivité σ est en mS/m et la fréquence de mesure f en MHz)

L'altitude d'où sont faites ces mesures par avion est un facteur important en raison du gain de hauteur. La plupart des courbes théoriques de propagation de l'onde de sol sont calculées pour le cas où les deux terminaux sont au sol. Si le terminal de réception est à une certaine hauteur, le champ mesuré sera plus élevé que le champ au sol par suite de l'effet de gain de hauteur précité. Or, on ne peut pas appliquer de corrections de gain de hauteur aux valeurs mesurées, car cela exige précisément la connaissance des constantes du sol. Laiho [1976] estime cependant que le gain de hauteur est inférieur à 1 dB pour les fréquences inférieures à 1400 kHz et les altitudes inférieures à 100 m. On en conclut que les mesures de la conductivité équivalente faites d'avion dans la bande des ondes hectométriques devraient être effectuées sur la fréquence la plus basse pratiquement possible et à l'altitude la plus faible compatible avec la sécurité du vol.

4.2.2 Analyse des données obtenues

Les courbes théoriques comme celles de la Recommandation 368 ont été calculées pour une valeur donnée de la puissance rayonnée de référence. Les données mesurées doivent donc être rapportées à cette référence. Si l'on emploie les courbes de la Recommandation 368, qui sont fondées sur l'utilisation d'une puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.) de 1 kW, on doit ajouter la quantité $20 \log p_{eff}$ aux résultats de mesure en dB(μ V/m) avant de les analyser. p_{eff} est la p.a.r.v. de l'émetteur utilisé pour les mesures. Pour le cas où cette puissance est inconnue, Laiho [1976] et Gregorač et Budin [1976] suggèrent que l'on adapte la pente de la courbe expérimentale aux courbes théoriques pour des emplacements proches de l'émetteur. Cela fait, partant des champs mesurés (E_r) en n points alignés sur un trajet radial et des valeurs calculées aux mêmes distances ($A_{r,r}$) correspondant à la courbe de conductivité dont la pente s'adapte bien aux valeurs mesurées, on peut déterminer la p.a.r. par la formule:

$$p_{eff}^2 = \left(\sum_{r=1}^n A_{r,r} E_r \right) / \sum_{r=1}^n A_{r,r}^2 \quad (3)$$

et déterminer la conductivité moyenne au voisinage de l'émetteur.

Cette méthode d'analyse est d'une mise en œuvre très facile sur les trajets homogènes. Pour les trajets non homogènes, l'analyse devient très difficile dès qu'il y a plus d'un changement de conductivité le long du trajet radial. Dans le cas des mesures faites en Finlande mentionnées ci-dessus [Laiho, 1976], on a dû recourir à un ordinateur pour faire les calculs théoriques au-dessus de trajets mixtes au moyen de la méthode de Millington (Recommandation 368), en appliquant à cet effet la méthode des moindres carrés. Une procédure presque identique a été employée en Yougoslavie [Gregorač et Budin, 1976]. Plus récemment, une méthode améliorée a été mise au point [Grosskopf, 1981]; elle utilise une procédure spéciale d'optimisation numérique pour surmonter ces difficultés.

La Fig. 4 montre bien comme il est difficile d'analyser les données relatives aux trajets mixtes. Cette figure est extraite d'un article dont l'auteur [Stokke, 1975] décrit une analyse graphique de la méthode de calcul de l'affaiblissement de transmission de l'onde de sol exposée dans l'Annexe II à la Recommandation 368. Elle illustre le cas simple où il existe un seul changement dans la conductivité du sol, à la distance d_1 de l'émetteur.

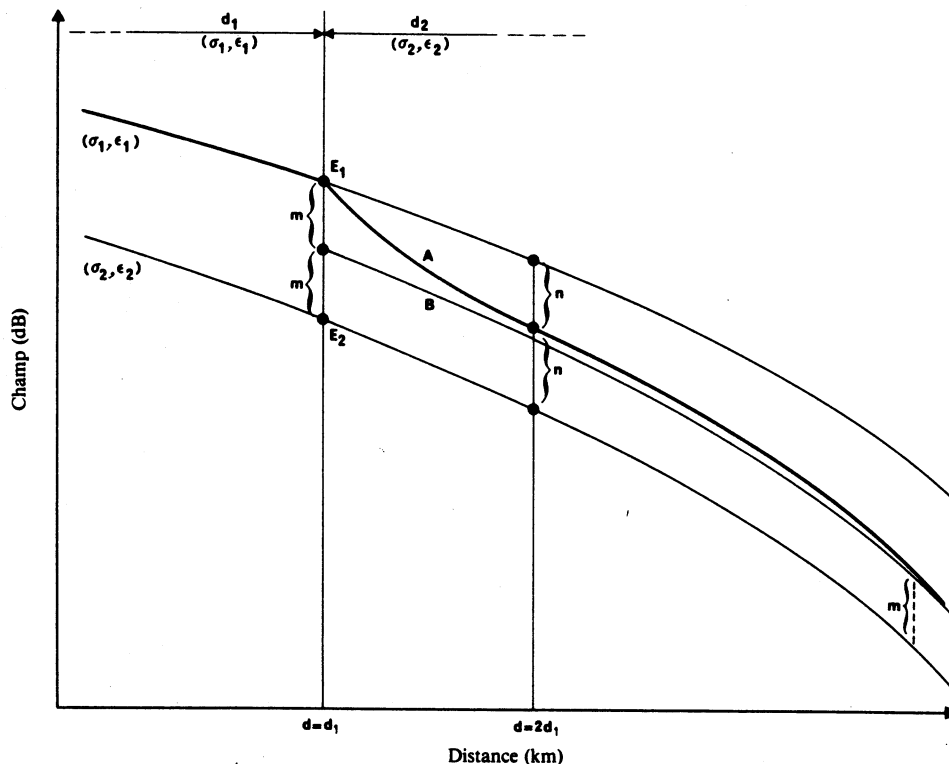


FIGURE 4 – Allure du champ électrique au voisinage de la ligne de démarcation entre deux régions dont les caractéristiques électriques équivalentes du sol ne sont pas les mêmes

Lorsque la conductivité passe d'une valeur à une valeur inférieure, on remarque que la courbe du champ passe par la valeur moyenne entre les deux courbes pour un sol homogène, à la distance $d = 2 d_1$, et qu'elle tend vers une valeur située sur une parallèle à la courbe inférieure du sol homogène. Cette asymptote est située au-dessus de la courbe inférieure du sol homogène, à une distance égale à la moitié de la différence en dB entre les deux courbes homogènes, à la distance $d = d_1$.

Des descriptions détaillées de la manière d'interpréter les mesures de champ existantes, en particulier quand il existe de nombreux changements de la conductivité, sont données par Stokke [1978, 1984].

Si l'on ne dispose pas de moyens de calcul électroniques ou s'ils sont trop onéreux, on doit tracer une courbe de conductivité en partant des données fournies par une série d'émetteurs. Les données fournies par chacun de ces émetteurs servent à définir les frontières des régions homogènes qui l'entourent.

4.2.3 Exactitude des résultats

Les mesures du champ des ondes hectométriques (bande 6) peuvent en général se faire à ± 2 dB près. Cela implique une erreur d'analyse de ± 2 dB dans la conductivité au-dessus d'un sol homogène pour la bande 6 ainsi qu'on peut le voir en se rapportant aux figures de la Recommandation 368. D'autres erreurs s'introduisent dans les estimations de la conductivité sur les trajets mixtes pour les raisons examinées ci-dessus. Les irrégularités du terrain introduiront encore d'autres erreurs si la hauteur des accidents de terrain que l'on rencontre le long du trajet est supérieure à l'altitude moyenne de celui-ci de bien plus qu'une longueur d'onde. Pour un terrain présentant de faibles irrégularités, la conductivité équivalente sera inférieure à celle que l'on aurait mesurée pour un terrain homogène dont la structure du sol serait la même [Barrick, 1971].

De plus, les résultats ne s'appliqueront qu'au trajet utilisé ou à un trajet très semblable. La méthode ne convient pas pour effectuer les mesures détaillées des caractéristiques électriques de la Terre sur de petites zones données.

5. Autres méthodes

Parmi les autres méthodes conçues pour les télécommunications, on trouve la méthode de mesure de l'impédance d'entrée de l'antenne. Cette méthode est fondée sur le fait que les caractéristiques électriques de la Terre peuvent être déduites des mesures de l'impédance d'entrée de l'antenne. Ces mesures peuvent être effectuées pour des antennes situées au-dessous, ou juste au-dessus, de la surface de la Terre. D'après certaines mesures effectuées en laboratoire [Iizuka, 1964] et de récentes recherches théoriques [Popović et Gavrilov, 1976], il est possible de déterminer les caractéristiques électriques du sol à partir des mesures d'impédance d'une antenne cylindrique (ou antenne équivalente composée d'une microligne à ruban), les antennes étant fixées sur l'interface air-sol. Pour appliquer cette méthode, il convient de veiller particulièrement à aligner exactement l'axe de l'antenne sur l'interface. L'avantage est que l'immersion n'est plus nécessaire.

Il existe diverses autres méthodes de mesure de la conductivité ou de la constante diélectrique de la surface de la Terre. Certaines d'entre elles sont décrites dans le Rapport 229. Dans un article de Lytle [1974] et dans l'IEEE Standard 356 [IEEE, 1974], on trouve des descriptions générales de ces méthodes, accompagnées de bibliographies très complètes.

Les méthodes dont il s'agit ici ne conviennent généralement pas pour la planification de la radiodiffusion. Beaucoup d'entre elles sont faites pour l'exploration géophysique et l'on ne peut pas les appliquer dans des conditions économiques au tracé d'une carte des constantes du sol dans une région de grande superficie. D'autres fournissent des valeurs des constantes électriques du sol qu'il est difficile de rattacher aux valeurs équivalentes à utiliser pour le calcul de l'affaiblissement de propagation de l'onde de sol. Pour ces raisons, on donne la préférence aux deux méthodes sur lesquelles porte le présent Rapport (méthode fondée sur l'inclinaison des ondes et méthode de mesure de l'affaiblissement).

Les méthodes par sondage peuvent néanmoins être utiles pour les projets d'implantation des antennes. Il est bon d'avoir une connaissance détaillée de la conductivité du sol autour de l'emplacement où l'on se propose d'ériger une antenne pour ondes décadiques, cela pour savoir si l'on aura besoin de réaliser un système de prise de terre afin que l'antenne ait un rendement maximal. Lorsque l'on fait ces mesures, on doit espacer les sondes de telle sorte que les mesures fassent connaître la conductivité équivalente d'une couche de profondeur égale à la profondeur de pénétration à la fréquence concernée [Grant et West, 1965].

6. Résultats des mesures

Les résultats des mesures des caractéristiques électriques équivalentes présentent de grandes variations dues à divers facteurs. La carte des conductivités équivalentes en ondes hectométriques pour les Etats-Unis [Fine, 1954] a été tracée d'après les données fournies par la méthode de mesure de l'affaiblissement. Par des procédés manuels, on a analysé les résultats de plus de 7000 mesures en faisant appel à 621 stations de radiodiffusion à ondes

hectométriques. La conductivité équivalente présente une variation qui est au moins du simple au double pour différents axes partant d'un même émetteur, même au-dessus de trajets géographiquement semblables. Une réduction des données effectuée à l'ordinateur, avec corrections pour trajets mixtes [Laiho, 1976], a permis de tracer, avec le plus petit nombre de données, une carte plus détaillée. Les résultats généraux de cette expérience conduisent à penser que les calculs du champ des ondes hectométriques effectués à partir des résultats valables pour un sol homogène seront entachés d'une incertitude de 5 dB liée aux erreurs sur les données relatives à la conductivité du sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W. et FISHER, R. M. [1966] Radio broadcasting on medium frequencies. NBS Rep. 9196, Accession No PB 269533, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- BARRICK, D. E. [1971] Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, *Radio Sci.*, Vol. 6, 5, 517-526.
- BLOMQUIST, Å. [1975] Seasonal effects on ground-wave propagation in cold regions. *J. Glaciology*, Vol. 15, 73.
- DAMBOLDT, T. [13-16 avril 1981] HF ground-wave field-strength measurements on mixed land-sea paths. IEE Second International Conference on Antennas and Propagation, Heslington, York, Royaume-Uni.
- EATON, J. L. [1976] The wave-tilt method of measuring electrical ground constants in the LF and MF bands. BBC Rep. RD 1976/15, UDC 621.396.673.
- ELIASSEN, K. E. [1957] A survey of ground conductivity and dielectric constant in Norway within the frequency range 0.2-10 Mc/s. *Geofysiske Publikasjoner*, Vol. 19, 11.
- FINE, H. [septembre 1954] An effective ground conductivity map for the continental United States. *Proc. IRE*, Vol. 42, 9, 1405-1408.
- GRANT, F. S. et WEST, G. F. [1965] *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- GREGORAČ, L. et BUDIN, J. [juin 1976] Calcul du rendement de la conductivité moyenne du sol au voisinage immédiat d'une antenne en ondes hectométriques. *Rev. de l'UER (Technique)*, 157.
- GROSSKOPF, R. [1981] Eine verbesserte Methode zur Berechnung des Wirkungsgrades und der Leitfähigkeiten in der näheren Umgebung einer Mittelwellensendeantenne (Une méthode améliorée pour mesurer le rendement et la conductivité du sol au voisinage immédiat d'une antenne d'émission à ondes hectométriques). *Rundfunktechn. Mitt.*, Vol. 25, 2.
- HANLE, E. [1966] The complex impedance of the earth's surface at radio frequencies and its measurement. *NTZ-Comm. J.*, Vol. 3, 136-143.
- IEEE [1974] *IEEE Guide for Radio Methods of Measuring Earth Conductivity*. IEEE Standard 356-1974.
- IIZUKA, K. [janvier 1964] An experimental investigation on the behaviour of the dipole antenna near the interface between the conducting medium and free space. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-12, 27-35.
- JOHLER, J. R. et HOROWITZ, S. [1974] Propagation of a Loran pulse over irregular inhomogeneous ground. AGARD Conf. Proc. No. 144, 28-1 à 28-13, SHAPE Technical Centre, La Haye, Pays-Bas.
- KING, R. J. [1976] Wave-tilt measurements. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-24, 115-119.
- 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.
- LAIHO, J. K. [1976] Measurement of the effective ground conductivity in Finland. *SÄHKÖ (Electricity in Finland)*, Vol. 49, 509-512.
- LYTLE, R. J. [1974] Measurement of earth medium electrical characteristics: techniques, results and applications. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, Vol. GE-12, 3, 81-101.
- POPOVIĆ, B. D. et GAVRILOV, T. [1976] A simple method for analysis of cylindrical antennae at the interface between two media. *Radio Electron. Engr.*, Vol. 46, 553-554.
- STOKKE, K. N. [1975] Analyse graphique de la méthode de Millington pour le calcul du champ au-dessus d'un terrain non-homogène. *J. Télécomm.*, Vol. 42, III, 157-163.
- STOKKE, K. N. [juin 1978] Problèmes concernant la mesure de la conductivité du sol. *Rev. de l'UER (Technique)*, 169, 106-111.
- STOKKE, K. N. [novembre 1984] Mesure de la conductivité du sol, *J. des télécomm.*, Vol. 51, XI, 611-613.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. (2^e édition), Pergamon Press, MacMillan, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- YAKOUPOV, U. S., BYALOBZKESKIY, S. G., GASSANOV, CH. CH., ISMAÏLOV, L. I. et ALPCHINE, G. U. [1969] Maps of the electric conductivity of rocks in the permafrost zone of the northeastern part of the USSR, Acad. Sci. USSR, *Izvestia Phys. (Solid Earth)*, 8, 537.