

# MANUEL SUR LA PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL

EDITION DE 2014  
BUREAU DES RADIOCOMMUNICATIONS





# ***Manuel sur la propagation de l'onde de sol***

***Edition de 2014***

Bureau des radiocommunications





## **Introduction**

La propagation de l'onde de sol présente un intérêt particulier pour les communications aux basses fréquences, notamment la radiodiffusion. Ce mode de propagation est utilisé sur ces fréquences depuis plus de 90 ans.

Le présent Manuel s'organise autour de quatre grandes parties:

- principes de base et théorie;
- principales considérations à grande échelle et méthodes de prévision utilisées pour les évaluations de compatibilité et les procédures de planification, dans le cadre de la gestion du spectre et à des fins de prévision de la couverture;
- variabilité à plus petite échelle, qui joue parfois un rôle déterminant dans l'évaluation de la qualité des services;
- mesures et phase de l'onde de sol.

Personnes ayant participé à l'élaboration de ce Manuel, par ordre alphabétique:

Itziar ANGULO

Les BARCLAY

Yuri CHERNOV

Nick DEMINCO

Igor FERNÁNDEZ

Unai GIL

David GUERRA

John MILSOM

Iván PEÑA

David DE LA VEGA.



## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
PARTIE 1 – Considérations théoriques .....	1
1 Introduction .....	1
2 Théorie de l'onde de surface: historique .....	1
3 Théorie de l'onde de surface .....	3
3.1 Introduction à la théorie .....	3
3.2 Théorie applicable à une Terre lisse homogène .....	4
3.3 L'effet de l'atmosphère .....	7
PARTIE 2 – Méthode de prévision recommandée par l'UIT-R.....	9
4 Recommandation UIT-R P.368 .....	9
5 Impédance de la surface .....	11
6 Conductivité du sol.....	11
6.1 Conductivité de la terre ferme.....	11
6.2 Conductivité de la mer .....	13
PARTIE 3 – Variantes de la procédure de prévision principale .....	15
7 Terre lisse de conductivité mixte.....	15
7.1 L'effet de renforcement au-dessus de la mer.....	15
7.2 Méthode de Millington pour les trajets mixtes .....	17
7.3 Estimation d'une valeur de conductivité représentative applicable à des trajets mixtes dans la bande des ondes hectométriques .....	17
8 Etat de la mer.....	18
9 Environnements ruraux.....	19
10 Environnements urbains .....	19
10.1 Effet des zones urbaines à forte densité de construction, de 0,1 à 20 km	19
10.2 Au-delà de 25 km .....	27
11 Variations saisonnières de la propagation de l'onde de surface.....	30
11.1 Historique.....	30
11.2 Variations journalières de la propagation de l'onde de surface.....	33

	<i>Page</i>
PARTIE 4 .....	35
12 Antennes de réception .....	35
13 Caractérisation de la variabilité spatiale du champ .....	36
14 Relief irrégulier.....	37
15 Effets locaux dans les zones bâties.....	39
15.1 Mesures réalisées dans des zones à forte densité de construction .....	39
15.2 Incidence de la fréquence d'émission en milieu urbain.....	44
15.3 Fortes variations du champ .....	45
16 Variation spatiale du champ à petite échelle .....	46
17 Propagation à l'intérieur des bâtiments.....	46
PARTIE 5 .....	49
18 Méthodes de mesure .....	49
18.1 Mesureur de champ .....	49
18.2 Mesure de la puissance rayonnée.....	49
18.3 Mesure de la conductivité équivalente du sol .....	50
19 Phase de l'onde de surface [71] .....	51
19.1 Introduction .....	51
19.2 Propagation au-dessus d'un terrain régulier et homogène.....	51
19.3 Perturbations de la phase secondaire.....	51
19.4 Trajets non homogènes .....	52
19.5 Irrégularités du terrain.....	52
19.6 Effets météorologiques.....	52
ANNEXE 1 – La méthode de Lee généralisée .....	54
20 Références bibliographiques.....	56



## PARTIE 1

### Considérations théoriques

#### 1 Introduction

Pendant la journée, aux fréquences moyennes, les signaux qui se propagent par l'ionosphère sont très affaiblis. La totalité des signaux occupant la bande de radiodiffusion en ondes hectométriques est alors acheminée par un autre mode de propagation: l'onde de sol, ou plus rigoureusement l'onde de surface. Les ondes de surface assurent aussi la propagation des signaux d'autres systèmes: radiodiffusion en ondes kilométriques, communication et navigation en ondes myriamétriques/kilométriques, communication à courte portée en ondes décamétriques, ainsi que certaines classes de radars en ondes décamétriques. A noter que dans ces systèmes, des modes de propagation ionosphérique peuvent aussi être présents.

La propagation de l'onde de surface repose sur des courants qui circulent dans le sol. La présence de l'atmosphère, bien qu'elle modifie les caractéristiques de propagation, n'est pas essentielle à ce mode. Les ondes de surface à polarisation horizontale subissent un affaiblissement considérable et n'ont pas d'utilité pratique, ou presque. Aussi toutes les applications susmentionnées utilisent-elles des ondes de surface à polarisation verticale.

Contrairement aux signaux propagés par l'ionosphère, la dispersion subie par l'onde de sol est négligeable, de sorte qu'en principe, il est possible de transmettre des signaux à large bande lorsque seule l'onde de surface est active.

Des évanouissements se produisent seulement lorsqu'il existe une variation temporelle dans le trajet de propagation. Les ondes de sol qui se propagent au-dessus des terres sont des signaux stables. Elles présentent parfois des variations saisonnières et peuvent aussi varier sur de courtes distances lorsqu'elles rencontrent des structures ou des caractéristiques topographiques notables. Au-dessus des mers, la propagation de l'onde de surface peut subir des évanouissements lents causés par les marées ainsi qu'un affaiblissement dû à l'état de la mer.

Depuis de nombreuses années, les méthodes reposant sur des considérations théoriques, qui constituent la base de la Recommandation UIT-R P.368, se sont imposées, comme un moyen robuste et relativement simple de prévoir la couverture des systèmes de radiodiffusion en ondes hectométriques et kilométriques, entre autres. Les méthodes de prévision dans les zones urbaines peuplées de tours demeurent toutefois incomplètes. En outre, les pertes supplémentaires dues à des obstacles locaux, à un relief accidenté, etc., jouent un rôle important, en particulier dans l'évaluation de la qualité globale de réception des services. Si l'on a recours à des méthodes de modulation robustes, il est peu probable que l'étalement en temps et en fréquence de l'onde de surface et de la combinaison des modes «surface» et «ionosphérique» entraîne une dégradation importante.

Le Manuel présente, dans un premier temps, l'onde de sol d'un point de vue théorique, puis il décrit les techniques et procédures adaptées aux prévisions de couverture globales à grande échelle à des fins de gestion du spectre, de planification et de conception. On s'intéresse ensuite aux effets à petite échelle que peuvent avoir, entre autres, les bâtiments et la topographie sur la qualité de fonctionnement et la qualité de service des systèmes, en particulier ceux mettant en oeuvre une modulation numérique. Enfin, on trouvera quelques informations sur les mesures et sur la phase relative de l'onde de sol.

#### 2 Théorie de l'onde de surface: historique

En 1909, Sommerfeld [1] trouve une solution applicable à un dipôle électrique vertical, à l'interface plane entre un isolant et un conducteur, mais ses travaux ne se présentent pas sous une forme pratique, susceptible de servir aux ingénieurs, et contiennent en outre une erreur qui crée une certaine confusion. En 1936, Norton [2] résout ces problèmes en grande partie, et, dans un article publié en 1937 [3], il présente une méthode de calcul applicable à une Terre plate. De 1937 à 1939, plusieurs articles publiés par Van der Pol et Bremmer [4] rendent possible le calcul des champs en des points distants à la surface d'une Terre sphérique, au moyen d'une série

de résidus. Dans un article ultérieur, publié en 1941, Norton [5] en propose une version plus pratique, destinée aux ingénieurs.

Mais ces méthodes ne prennent toujours pas en charge la variation des caractéristiques terrestres (permittivité et conductivité) le long du trajet. Or ces paramètres jouent un rôle particulièrement important lorsque le signal se propage pour partie au-dessus de la terre ferme et pour partie au-dessus de la mer (trajet mixte), car les caractéristiques de conductivité de ces deux milieux diffèrent d'un facteur 1 000 environ. En 1949, Millington [6] expose une méthode semi-empirique, qui donne des résultats assez corrects dans le cas d'un trajet présentant des variations des caractéristiques terrestres. En 1952, Hufford [7] publie une méthode prenant en compte des variations arbitraires des constantes terrestres et du relief le long du trajet. Cette méthode se présente sous la forme d'une équation intégrale qu'il est impossible de résoudre manuellement à des fins pratiques. En 1970, Ott et Berry [8] publient un algorithme informatique permettant de résoudre cette équation.

En 1982, Hill [9] décrit une méthode analytique visant à étendre la méthode proposée par Ott et Berry [8] à la prévision de la propagation au-dessus de terrains boisés et bâtis, ces derniers étant représentés sous forme de couches en plaques diélectriques, disposées sur un relief irrégulier. Un code source figure dans l'Appendice du rapport de Hill. Des travaux ultérieurs publiés en 1986 par DeMinco ([10], [11]) présentent plusieurs mises en oeuvre informatiques conviviales des modèles d'Ott et Berry [8] et de Hill [9]. Dans ces articles, DeMinco propose également un modèle de propagation de l'onde de sol le long d'un trajet mixte sur une Terre sphérique lisse reposant sur la méthode de Millington ([6], [19], [20]) (modèle qui s'applique au calcul d'un trajet mixte décrit ultérieurement), ainsi que plusieurs modèles applicables à diverses antennes fonctionnant en ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques, à des fins de calculs de systèmes. Kissick *et al.* ([12], [13]), Ott, Vogler et Hufford [14], et Adams *et al.* [15] ont vérifié ces modèles informatiques à partir de données de mesure. En 1999 et 2000, dans le cadre de nouveaux travaux, DeMinco ([16], [17]) associe le modèle de propagation le long d'un trajet mixte sur une Terre sphérique lisse et le modèle de propagation le long d'un trajet mixte sur une Terre irrégulière à des modèles d'antenne et des calculs de systèmes; ces travaux conduisent à un modèle en ondes kilométriques/hectométriques basé sur Windows ([15], [17]), utilisable en pratique comme un outil d'analyse pour les prévisions point à point et les prévisions sur zone mettant en oeuvre des antennes placées au sol ou en hauteur. Ces travaux intègrent également plusieurs modèles de propagation ionosphérique.

Après avoir étudié les effets de l'atmosphère terrestre sur la propagation de l'onde de surface, Rotheram ([18], [19], [20]) élabore une méthode générale de prévision de l'onde de sol et développe un programme informatique ad hoc. Cette méthode, qui intègre un profil exponentiel de la réfractivité atmosphérique, a servi de base aux courbes de propagation de la Recommandation UIT-R P.368 applicables aux antennes placées au sol.

Le programme correspondant, dénommé GRWAVE, qui permet de prévoir le champ de l'onde de surface dans le cas des antennes placées au sol ou en hauteur au-dessus d'une Terre sphérique lisse, est accessible via la page web de la Commission d'études 3 de l'UIT-R.

Dès le début, les campagnes de mesure des transmissions de radiodiffusion ont montré que la propagation à travers les zones urbaines présente des anomalies. Casebrook ([21], [22]) a ainsi montré que les zones urbaines et les reliefs accidentés ne peuvent pas être décrits de façon simple, car le courant qui circule dans les conducteurs verticaux, voire dans les arbres, produit un plan de masse inductif. D'où il ressort que l'affaiblissement linéique est très différent de celui obtenu avec un simple modèle de Terre lisse et que, dans cet environnement caractérisé par de nombreux obstacles, le rapport du champ électrique au champ magnétique n'est pas égal à l'impédance intrinsèque de l'espace libre.

Parallèlement à l'attention récente portée aux techniques de modulation numérique, on assiste à un regain d'intérêt pour les variations locales des signaux à petite échelle. De fait, dans le cas de la réception mobile, ces variations se traduisent par des évanouissements temporels, qui peuvent entraîner une dégradation de la qualité du signal reçu.

### 3 Théorie de l'onde de surface

#### 3.1 Introduction à la théorie

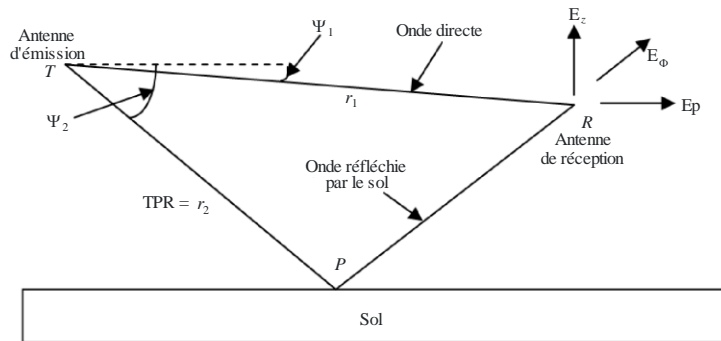
Examinons le cas simple d'une antenne,  $T$ , émettant au-dessus d'un sol plat parfaitement conducteur, comme illustré à la Figure 1. La tension,  $V$ , induite dans une antenne de réception située à un emplacement arbitraire,  $R$ , peut s'exprimer comme la somme vectorielle d'une composante directe et d'une composante réfléchie par le sol:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} \quad (1)$$

où  $I$  désigne le courant circulant dans l'antenne d'émission,  $Q$  est une constante,  $Q_1$  et  $Q_2$  prennent en compte les diagrammes polaires des antennes d'émission et de réception,  $R$  est le coefficient de réflexion ad hoc et  $k$  désigne le nombre d'onde ( $= 2\pi/\lambda$ ). Les autres termes sont définis dans la Figure 1.

FIGURE 1

Configuration géométrique de l'onde directe et de l'onde réfléchie par le sol



Ground Wave Prop. 01

Dans de nombreux cas, en particulier lorsque la fréquence rayonnée se situe dans la bande des ondes métriques ou dans une bande de fréquences supérieures, la formule ci-dessus fournit un résultat parfaitement acceptable pour des applications pratiques. Cela étant, pour décrire complètement le champ à l'emplacement  $R$ , il convient d'ajouter une composante, qui contribue à la tension résultante:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} + S \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} \quad (2)$$

où  $S$  désigne un facteur complexe qui dépend des propriétés électriques du sol, de la polarisation de l'émission, de la fréquence et de l'emplacement des stations terminales.

En présentant ce facteur de cette manière, on pourrait être tenté d'en minimiser la contribution et de privilégier le point de vue mathématique. Or, ce troisième terme, qui représente l'onde de surface, constitue un mode de propagation d'un intérêt pratique essentiel pour les systèmes radioélectriques fonctionnant dans la bande des ondes décimétriques et aux fréquences inférieures.

La combinaison d'ondes figurant dans l'équation (2), parfois appelée «onde de sol», est composée d'une onde spatiale et d'une onde de surface:

$$\text{onde de sol} = \underbrace{\text{onde directe} + \text{onde réfléchie}}_{\text{onde spatiale}} + \text{onde de surface}$$

Cela étant, les usages terminologiques varient: l'onde de surface est souvent appelée «onde sol», ou, parfois, «onde de sol de Norton» ou encore «onde de surface de Norton», du nom du chercheur qui a élaboré les méthodes simples de calcul de cette onde.

Lorsque les points  $T$  et  $R$  sont proches du sol, le coefficient de réflexion du sol est égal à  $-1$ ; l'onde directe et l'onde réfléchie s'annulent alors mutuellement, et l'onde de surface reste la seule composante importante.

## 3.2 Théorie applicable à une Terre lisse homogène

### 3.2.1 Terre plate de conductivité finie

*Théorie de la Terre plate de Sommerfeld-Norton:*

Sommerfeld [1] et Norton ([2], [3]) ont exprimé les composantes du champ de l'onde de sol causé par un petit conducteur élémentaire vertical, au-dessus d'une Terre plate de conductivité finie. Sous sa forme complète, l'équation 2 devient:

$$E_z = j30kIdl \left[ \left\{ \cos^2 \psi_1 \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \cos^2 \psi_2 R_v \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right\} + \left\{ (1 - R_v)(1 - u^2 + u^4 \cos^2 \psi_2) F \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right\} \right] \quad (3)$$

$$E_\rho = -j30kIdl \left[ \sin \psi_1 \cos \psi_1 \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \sin \psi_2 \cos \psi_2 R_r \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} - \cos \psi_2 (1 - R_v) u \sqrt{1 - u^2 \cos^2 \psi_2} \left\{ 1 - \frac{u^2}{2} (1 - u^2 \cos^2 \psi_2) + \frac{\sin^2 \psi_2}{2} \right\} F \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right] \quad (4)$$

où  $\psi_1$  et  $\psi_2$  sont définis dans la Figure 1, et  $Idl$  est le produit de l'intensité de la source par sa longueur (le «moment du dipôle»),  $R_v$  le coefficient de réflexion de Fresnel d'onde plane pour la polarisation verticale et  $F$  une fonction d'affaiblissement qui dépend du type de sol et de la longueur du trajet.  $F$  est donnée par la formule:

$$F = \left[ 1 - j \sqrt{(\pi w) \exp(-w)} \left\{ \operatorname{erfc}(j\sqrt{w}) \right\} \right] \quad (5)$$

où «erfc» désigne la fonction d'erreur complémentaire et

$$w = \frac{-j2kr_2 u_2 (1 - u^2 \cos^2 \psi_2)}{(1 - R_v)} \quad (6)$$

$$u^2 = \frac{2}{(\epsilon_r - jx)} \quad (7)$$

et

$$x = \frac{\sigma}{(w\varepsilon_0)} = 1,8 \times 10^4 \frac{\sigma}{f_{MHz}} \quad (8)$$

$\sigma$  étant la conductivité de la Terre exprimée en S/m,  $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$  la permittivité relative de la Terre et  $f_{MHz}$  la fréquence en MHz.

On notera que les équations (3) et (4) représentent les composantes du champ dans les directions verticale et radiale d'un système de coordonnées cylindrique.

### 3.2.1.1 Cas particulier des stations terminales au sol

Lorsque les points  $T$  et  $R$  se situent sur le sol et que, de ce fait,  $R_V = -1$  et  $\psi_1 = \psi_2 = 0$ , l'onde directe et l'onde réfléchie par le sol sont opposées et leur somme est nulle. Ces conditions sont valides dans de nombreuses applications pratiques aux fréquences basses. En pareil cas, l'onde de surface est prédominante et peut être exprimée sous une forme quelque peu simplifiée des équations (3) et (4), à savoir:

$$E_z = j60kIdl(1-u^2+u^4)F \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (9)$$

$$E_\rho = j30kIdl \left\{ u \sqrt{(1-u^2)(2-u^2+u^4)} \right\} F \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (10)$$

Ainsi, dans le cas de l'onde de surface avec antennes au sol, les composantes verticale et radiale du champ électrique sont toujours présentes. D'un point de vue physique, cela signifie que la surface d'onde de propagation est inclinée. La composante radiale donnée par l'équation (10) est faible par rapport à la composante verticale décrite par l'équation (9). Compte tenu de la relation de phase, la faible inclinaison de la surface d'onde se présente vers l'avant, dans la direction de propagation. Le degré d'inclinaison dépend de la conductivité du sol et de la fréquence. Ses mesures pourraient servir à déterminer les propriétés électriques du sol à un niveau local (voir le § 18.3.3). Etant donné que  $E_\rho$  est fini et que la composante du champ magnétique est horizontale, le vecteur de Poynting possède une composante vers le bas et une partie de l'énergie de l'onde à propagation horizontale est dissipée. C'est pourquoi, en plus de l'affaiblissement dû à l'expansion classique de l'onde, qui suit une loi quadratique inverse, il se produit un affaiblissement supplémentaire. Selon la théorie de Sommerfeld-Norton, cet affaiblissement supplémentaire est donné par le terme  $F$  (voir l'équation (5)),  $w$  se simplifiant dans le cas de stations terminales au sol comme suit:

$$w = \frac{-jkr u^2}{2} (1-u^2) \quad (11)$$

### 3.2.1.2 Interprétation

Les prévisions de couverture radioélectrique sont presque toujours exprimées en termes d'intensité du champ électrique, même dans le cas de la radiodiffusion en ondes kilométriques et hectométriques, alors que la plupart des récepteurs grand public sont équipés d'antennes à champ magnétique (tige de ferrite). Sauf dans le cas des environnements caractérisés par de nombreux obstacles et contenant des conducteurs verticaux (voir les § 11 et 12), l'onde de surface possède une composante magnétique horizontale,  $H_\phi$ , qui est liée à la composante électrique majeure par la relation approchée suivante:

$$H_\phi = -\frac{E}{Z_0} \quad (12)$$

où  $Z_0$  désigne l'impédance intrinsèque de l'espace libre ( $120\pi \Omega$ ). Il est donc suffisant de planifier les couvertures des services hertziens en termes de champ électrique.

L'affaiblissement de l'onde de surface est dû à l'inclinaison vers l'avant du champ électrique de l'onde. Il augmente à mesure que l'angle d'inclinaison croît. En combinant les équations (9) et (10), on peut montrer que le rapport des composantes du champ électrique s'exprime simplement sous la forme:

$$\frac{E_{\rho}}{E_z} \approx u = \frac{1}{\sqrt{K_r}} \quad (13)$$

où  $K_r$  désigne la constante diélectrique complexe du sol. Ce paramètre dépend de la fréquence et des propriétés électriques du sol.

Le Tableau 1 en fournit quelques valeurs représentatives.

TABLEAU 1  
Valeurs types de  $K_r$ , constante diélectrique complexe,  
pour différents types de surface et différentes fréquences

Type de surface	Fréquence (kHz)	
	200 (LF)	1 000 (MF)
Mer ( $\sigma=5$ S/m, $\epsilon_r=70$ )	70-j450000	70-j90000
Sol de bonne qualité ( $\sigma=10^{-2}$ S/m, $\epsilon_r=10$ )	10-j900	10-j180
Sol de qualité médiocre ( $\sigma=10^{-3}$ S/m, $\epsilon_r=4$ )	4-j90	4-j18

Les grandes valeurs de  $K_r$  correspondent à une faible inclinaison vers l'avant et donc à un petit affaiblissement. L'eau de mer se caractérise par une conductivité extrêmement élevée; l'onde de surface, dont le champ électrique est quasiment vertical, se propage au-dessus de ce milieu en subissant un affaiblissement relativement faible. En revanche, l'affaiblissement de l'onde de surface est maximal au-dessus des sols présentant une conductivité médiocre et aux hautes fréquences radioélectriques.

Le facteur  $(1 - u^2 + u^4)$  de l'équation (9) est proche de l'unité dans toutes les situations présentant une utilité pratique. On peut donc montrer que l'amplitude de la composante verticale du champ électrique est donnée par:

$$|E_z| = \frac{300}{r} \sqrt{P} |F| \quad (14)$$

où  $P$ , exprimé en kW, désigne la puissance totale rayonnée par un conducteur élémentaire de type doublet de Hertz ou par un petit élément rayonnant vertical,  $r$  est la longueur du trajet en km et  $E$  le champ électrique en mV/m.

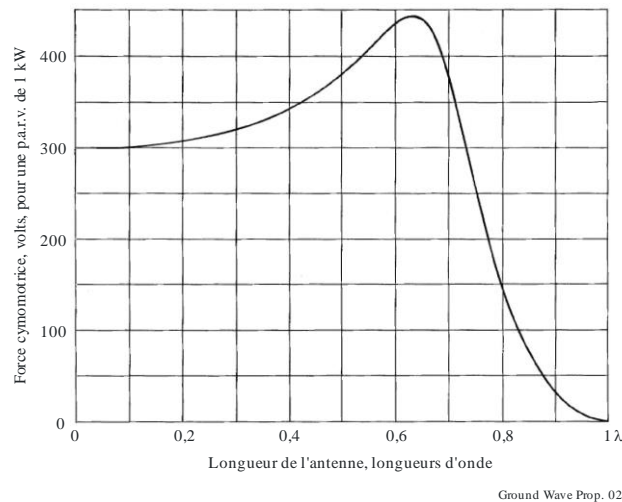
Cette équation, qui s'applique à une antenne verticale courte située au-dessus d'un sol plan parfaitement conducteur, fait office de référence.

A quelques longueurs d'onde de l'antenne,  $|F|$  est approximativement égal à l'unité et le champ varie comme  $1/r$ , c'est-à-dire comme l'inverse de la distance. A des distances suffisamment grandes, tant que l'hypothèse de Sommerfeld d'une Terre plate reste valable, il s'opère une transition et  $|F|$  devient inversement proportionnel à la distance; autrement dit, le champ varie comme  $1/r^2$ .

Pour une antenne verticale quart d'onde ( $\lambda/4$ ), la constante située à droite de l'équation (14) est égale à 314 (voir à ce propos la Recommandation UIT-R P.341, Annexe 1, Tableau 1, où les valeurs de cette constante sont données sous la forme de la force cymomotrice).

La Figure 2 fournit les valeurs de cette constante pour des antennes verticales de différentes longueurs, placées au sol.

FIGURE 2  
Force cymomotrice pour des antennes verticales placées au-dessus  
d'un sol plat parfaitement conducteur



### 3.2.2 Terre sphérique de conductivité finie

Les principes mathématiques de la propagation de l'onde de sol autour d'une Terre courbe sont complexes et difficiles à comprendre. Ces principes ont été décrits par Bremmer [23]. Sur de courtes distances, le modèle de l'onde de sol élaboré par Sommerfeld s'applique tel quel. Dans le cas de distances plus longues, il est nécessaire de calculer les champs en tenant dûment compte de la diffraction due à la courbure de la Terre. A noter également une troisième zone de distances, qui se situe normalement au-delà de celle où se produisent des variations du champ suivant une loi quadratique inverse; dans cette zone, la décroissance du champ devient exponentielle autour de la Terre courbe. La distance à partir de laquelle ce comportement exponentiel apparaît peut être calculée en appliquant la formule ci-dessous. Ainsi la Terre peut-elle être considérée comme plate jusqu'à une distance  $d$  exprimée en kilomètres par la relation suivante tirée de [24]:

$$d = \frac{80}{\sqrt[3]{f(\text{MHz})}} \quad (15)$$

Mis à part ce comportement supplémentaire applicable aux grandes distances, la plupart des autres caractéristiques de l'onde de surface se propageant au-dessus d'une Terre sphérique sont identiques à celles tirées du modèle de Terre plate de Sommerfeld.

### 3.3 L'effet de l'atmosphère

Dans leurs travaux théoriques, Sommerfeld, Norton, Van der Pol et Bremmer partent du principe qu'une onde se propage dans l'espace, au-dessus du sol, le long d'une ligne droite; ils ne tiennent donc pas compte des effets de l'atmosphère. Mais dans la pratique, l'atmosphère terrestre est stratifiée et possède un indice de réfraction, qui diminue en principe avec l'altitude. En moyenne, l'indice de réfraction varie avec l'altitude selon une loi exponentielle (voir la Recommandation UIT-R P.453).

Dans toute atmosphère dont l'indice de réfraction décroît avec l'altitude, les ondes radioélectriques sont réfractées vers le bas, en direction du sol. Dans le premier kilomètre au-dessus du sol, la variation exponentielle peut être assimilée à une décroissance linéaire; dans ce cas, on peut considérer que les trajets radioélectriques suivent des lignes droites, moyennant une augmentation fictive du rayon terrestre équivalent. Ce traitement est souvent appliqué dans la bande des ondes métriques et aux fréquences supérieures [25], en prenant comme facteur de rayon terrestre équivalent la valeur type de  $4/3$ .

Dans le cas des ondes de surface aux fréquences inférieures à 10 kHz, l'effet de l'atmosphère est négligeable et ce facteur tend vers l'unité [26]. Au voisinage de la bande de radiodiffusion en ondes hectométriques, il se situe dans l'intervalle 1,20-1,25 pour la plupart des catégories de sol (voir Rotheram [18]).

Ces résultats, qui correspondent à des conditions atmosphériques classiques (pour lesquelles la réfractivité au niveau de la mer  $N_0 = 315$  et la hauteur d'échelle = 7,35 km), sont utilisés dans les représentations graphiques de la Recommandation UIT-R P.368. Dans des conditions atmosphériques différentes, il peut être nécessaire d'utiliser d'autres facteurs du rayon terrestre équivalent pour simuler les effets de propagation prédominants. Pour obtenir des renseignements sur les conditions atmosphériques, on pourra s'appuyer sur des observations climatiques locales ou consulter la Recommandation UIT-R P.453; les données ainsi obtenues pourront être utilisées en paramètres d'entrée du programme informatique GRWAVE.



## PARTIE 2

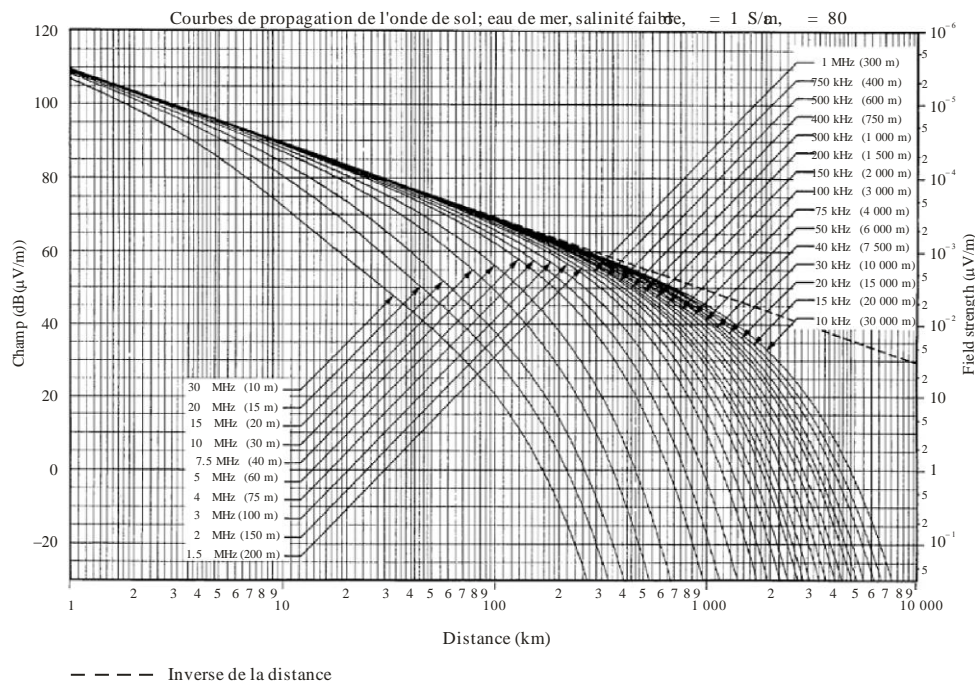
## Méthode de prévision recommandée par l'UIT-R

## 4 Recommandation UIT-R P.368

Les courbes de propagation recommandées par l'UIT-R pour le champ de l'onde de sol sont fournies dans la Recommandation UIT-R P.368. Ces courbes, qui reposent sur les principes décrits au § 3 ci-dessus, ont été calculées au moyen du programme informatique GRWAVE. En toute rigueur, la méthode est applicable à une Terre lisse, mais on obtient des prévisions satisfaisantes dans le cas d'un sol présentant des irrégularités du relief de faible dimension par rapport à la longueur d'onde et sans variations brutales de la hauteur. La variabilité due à des caractéristiques de surface de petite échelle susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité de service sera examinée plus loin. Les documents de référence [10] et [11] mettent en regard des prévisions et des données de mesure en vue d'examiner les différences entre les calculs effectués pour une Terre sphérique lisse et ceux réalisés pour une Terre irrégulière. Ces informations peuvent servir à déterminer quand il est nécessaire de remplacer le modèle de la Terre lisse par le modèle de la Terre irrégulière. Dans la mesure du possible, c'est au premier qu'on donnera la préférence; en effet, même avec les ordinateurs très puissants disponibles aujourd'hui, l'exécution du modèle de propagation le long d'un trajet mixte sur une Terre irrégulière nécessite un temps de calcul extrêmement long. Les documents [10] et [11] abordent également la question de la résolution du terrain nécessaire pour garantir une certaine précision des calculs dans le cas d'un relief irrégulier, dans les bandes des ondes kilométriques et hectométriques.

FIGURE 3

## Exemple de courbes figurant dans la Recommandation UIT-R P.368



Dans le cas des fréquences supérieures, on trouvera des courbes de propagation dans le Manuel UIT-R «Courbes de propagation des ondes radioélectriques au-dessus de la surface de la Terre». En outre, diverses Recommandations traitent de certains aspects particuliers de la propagation à ces fréquences (voir la Recommandation UIT-R P.1144).

Bien que les courbes de l'onde de sol aient été déterminées pour des antennes situées au sol, elles peuvent être utilisées pour des antennes placées en hauteur lorsque  $\epsilon_r \ll 60\sigma\lambda$ , pour des hauteurs inférieures à  $h = 1,2\sigma^{1/2}\lambda^{3/2}$ .

La Recommandation présente deux ensembles de courbes: le premier ensemble contient des courbes correspondant à diverses fréquences (entre 10 kHz et 30 MHz), avec, pour chaque figure, les mêmes valeurs de caractéristiques du sol (les caractéristiques utilisées sont récapitulées au Tableau 2). La Figure 3 reproduit un exemple de courbes de ce type. Dans un souci de commodité, le second ensemble présente les courbes dans une autre configuration, où chaque figure correspond à une fréquence unique (entre 30 kHz et 3 000 kHz) et à diverses caractéristiques du sol.

TABLEAU 2

**Graphiques de propagation de l'onde de sol pour diverses valeurs des caractéristiques du sol figurant dans la Recommandation UIT-R P.368**

Numéro de la figure	Description	Conductivité (S/m)	Permittivité relative
1	Eau de mer, salinité faible	1	80
2	Eau de mer, salinité moyenne	5	80
3	Eau douce	$3 \times 10^{-3}$	80
4	Terre	$3 \times 10^{-2}$	40
5	Sol humide	$1 \times 10^{-2}$	30
6	Terre	$3 \times 10^{-3}$	22
7	Sol moyennement sec	$1 \times 10^{-3}$	15
8	Sol sec	$3 \times 10^{-4}$	7
9	Sol très sec	$1 \times 10^{-4}$	3
10	Glace d'eau douce, $-1$ °C	$3 \times 10^{-5}$	3
11	Glace d'eau douce, $-10$ °C	$1 \times 10^{-5}$	3

Chaque ensemble de courbes contient également la courbe «inverse de la distance», reproduite en pointillé.

Pour des raisons pratiques, les courbes sont données pour une p.a.r.v. de 1 kW, c'est-à-dire pour une puissance de 1 kW rayonnée de façon équidirective par un élément rayonnant vertical court situé sur une Terre sphérique lisse. Il conviendrait de tenir compte de la puissance de l'émetteur réel ou proposé, des pertes dans le réseau de couplage alimentant l'antenne, du diagramme de rayonnement en azimut si l'on a recours à des systèmes d'antennes directionnels, et de la longueur des éléments d'antenne (la Figure 2 indique la variation du gain en fonction de la hauteur d'antenne en termes de force cymomotrice; la Recommandation UIT-R P.341 fournit également le gain pour quelques antennes de référence). Il conviendrait aussi de prendre en compte le niveau de qualité du système de terre de l'antenne (fils radiaux). Une méthode permettant de mesurer la p.a.r.v. réelle d'un système existant est décrite au § 18.2.

Le programme GRWAVE a également été conçu pour une puissance de 1 kW rayonnée de façon équidirective par un élément rayonnant vertical court situé sur une Terre sphérique lisse. A cet effet, le moment du dipôle utilisé pour les calculs est égal à  $5\lambda/2\pi$ .

Il est à noter que l'emploi du concept d'affaiblissement de transmission peut être source de confusion lorsque la présence du sol contraint le rayonnement dans le demi-espace se trouvant au-dessus du sol (voir la Recommandation UIT-R P.341, Annexe 2).

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 intégrer les effets de champ proche en augmentant le champ (dB) de:

$$10 \log \left\{ 1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4} \right\} \quad (16)$$

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

On trouvera dans le document de référence [27] une étude intéressante sur la précision du positionnement de la frontière entre le champ proche et le champ lointain. Plusieurs aspects y sont abordés: réduction au minimum du déphasage du champ électrique traversant l'ouverture de chaque antenne, erreur sur l'amplitude de la prévision du champ, distance nécessaire pour que les termes en  $1/r^2$  et  $1/r^3$  du champ électrique deviennent significatifs (champ proche) ou négligeables (champ lointain) par rapport au champ en  $1/r$ .

## 5 Impédance de la surface

Une autre façon d'envisager les pertes dues à la propagation de l'onde de sol consiste à partir de la relation «inverse du carré de la distance» exprimant la puissance du signal (relation «inverse de la distance» dans le cas du champ, comme le montre la Recommandation UIT-R P.368), puis à exprimer séparément l'affaiblissement dû aux pertes de propagation par l'onde de surface.

On peut montrer [28] que le facteur d'affaiblissement est égal à:

$$A = 1 - i\sqrt{\pi\rho} \exp(-\rho) \operatorname{erfc}(i\sqrt{\rho}) \quad (17)$$

et que  $\rho$  peut s'exprimer comme suit:

$$\rho = -\frac{i\pi\eta^2 r}{\lambda} \quad (18)$$

où  $\eta$  désigne l'impédance de la surface donnée par:

$$\eta = \frac{(\varepsilon - i60\sigma\lambda - 1)^{1/2}}{\varepsilon - i60\sigma\lambda} \quad (19)$$

L'impédance de la surface est un paramètre utile auquel on peut avoir recours pour décrire les caractéristiques d'une surface complexe comme les irrégularités du relief, les arbres, les infrastructures d'origine humaine, les bâtiments et les vagues.

## 6 Conductivité du sol

### 6.1 Conductivité de la terre ferme

Les informations contenues dans la Recommandation UIT-R P.368 et la procédure correspondante du programme GRWAVE ont fait leurs preuves et sont aujourd'hui couramment utilisées pour la planification initiale et l'évaluation de la compatibilité ou de la réutilisation des fréquences. Cela étant, c'est sans doute sur l'estimation des caractéristiques du sol, en particulier sa conductivité, qu'il demeure les plus grandes incertitudes. Les caractéristiques électriques de la surface terrestre sont examinées dans la Recommandation

UIT-R P.527. On notera que ces caractéristiques sont en principe indépendantes de la fréquence dans la bande des ondes décamétriques et aux fréquences inférieures (exception faite du cas de la glace d'eau douce dans les bandes des ondes kilométriques et myriamétriques).

Cela étant, il importe de noter la profondeur de pénétration prévisible, ou profondeur pelliculaire, des ondes radioélectriques dans le sol<sup>1</sup>. Dans le cas de l'eau de mer, la profondeur de pénétration (c'est-à-dire la profondeur à laquelle les signaux sont affaiblis à 1/e de la valeur en surface) n'est que de 25 cm environ à 1 MHz. Dans le cas d'un sol moyennement sec, elle est de 25 m environ. Ainsi, pour déterminer ou estimer la conductivité effective à des fins de prévision de la couverture en ondes hectométriques, et à plus forte raison en ondes kilométriques, il importe de tenir compte de la géologie sous-surfacique. On trouvera dans le document de référence [68] des informations complémentaires sur la profondeur de pénétration du champ électrique dans le sol (profondeur pelliculaire) et sur la mesure des propriétés diélectriques du sol.

Il est très peu probable que les méthodes consistant à déterminer la conductivité au moyen de sondes enfoncées dans la terre et autres méthodes de mesure d'un échantillon de sol donnent des résultats pertinents; en effet, ces méthodes ne mesurent habituellement que les caractéristiques du sol en surface. On obtiendra les mesures les plus valables au moyen d'émetteurs d'essai ou opérationnels et en réalisant des séries de mesures à diverses distances (voir le § 18.3).

La Recommandation UIT-R P.832 fournit des cartes de conductivité pour les ondes myriamétriques et hectométriques. Les cartes correspondant aux ondes myriamétriques sont données pour des zones continentales et couvrent la quasi-totalité des zones terrestres du monde. Les cartes correspondant aux ondes hectométriques sont données pour de nombreux pays ou groupes de pays, telles que fournies par les administrations. Le Voeu UIT-R 91-1 dispose que les administrations devraient vérifier et, le cas échéant, réviser les informations contenues dans l'Atlas mondial, notant qu'il peut être nécessaire, dans certains cas, d'inclure des variations saisonnières; que les nouvelles administrations devraient vérifier que l'Atlas mondial actuel de la conductivité du sol tient compte de leurs besoins et contribuer par leurs apports à réviser les données; et que les administrations des pays pour lesquels l'Atlas mondial ne contient pas de données sur la conductivité du sol devraient rassembler ces données et les communiquer conformément aux renseignements figurant dans la Recommandation UIT-R P.832.

---

<sup>1</sup> La profondeur de pénétration dans un matériau quelconque est donnée par:

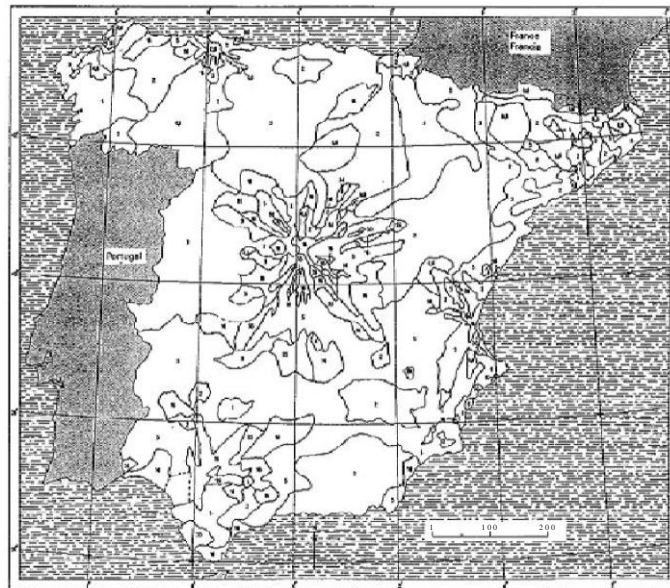
$$\delta = \left( \frac{\sqrt{2}}{\omega \sqrt{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0}} \right) \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (20)$$

où:

$\delta$  est la profondeur de pénétration,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\sigma$  désigne la conductivité,  $\mu_0$  la perméabilité de l'espace libre,  $\mu_r$  la perméabilité relative,  $\varepsilon_0$  la permittivité de l'espace libre et  $\varepsilon_r$  la permittivité relative.

FIGURE 4

Exemple de carte de conductivité du sol figurant dans la Recommandation UIT-R P.832



Ground Wave Prop. 04

La Recommandation contient aussi une carte mondiale sur la conductivité en ondes hectométriques, qui peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas d'informations détaillées. Cela étant, cette carte ne donnant qu'une indication générale de la conductivité, elle pourra convenir aux évaluations des besoins de spectre à l'échelle mondiale ou régionale, mais sans doute pas à l'estimation d'une couverture localisée. En l'absence d'informations complémentaires, la meilleure méthode d'estimation de la conductivité consiste à examiner des cartes géologiques et à comparer les caractéristiques de la zone à l'étude avec celles d'une autre région du monde présentant une configuration géologique et climatique analogue.

## 6.2 Conductivité de la mer

Dans le cas de l'eau de mer, la Recommandation UIT-R P.368 fournit des valeurs prévisibles de la conductivité, à savoir une valeur type de 5 S/m et une valeur basse de 1 S/m. Cela étant, la conductivité dépend de la salinité et de la température de l'eau de mer. Pour obtenir des prévisions plus précises, la conductivité attendue peut être fournie en entrée du programme GRWAVE.

La conductivité de l'eau de mer est donnée par la formule:

$$\sigma = 0,18C^{0,93} (1 + 0,02(T - 20)) \quad \text{S/m} \quad (21)$$

avec:

$C$ : salinité (en grammes de sel par litre)

$T$ : température (°C).

La conductivité,  $\sigma$ , des mers froides est de l'ordre de 3,5 S/m; celle des mers chaudes est de 5 S/m environ.



## PARTIE 3

## Variantes de la procédure de prévision principale

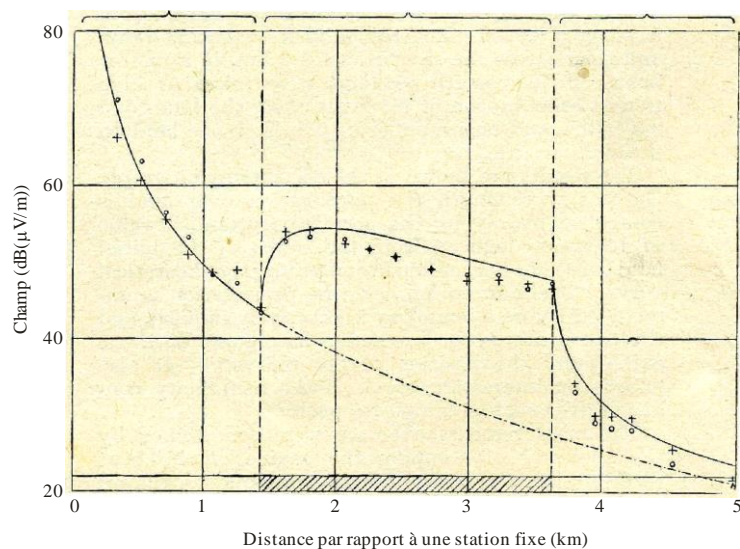
## 7 Terre lisse de conductivité mixte

## 7.1 L'effet de renforcement au-dessus de la mer

Lorsque les caractéristiques du sol évoluent le long du trajet de propagation, le champ résultant varie de façon inattendue avec la distance. Considérons le cas d'une onde qui se propage au-dessus de la terre ferme, puis au-dessus de la mer, et de nouveau au-dessus de la terre. Le champ de l'onde diminue à mesure que le signal progresse dans la première région; puis il se renforce en traversant la côte (augmentation rapide suivie d'une diminution plus progressive); enfin, il subit une décroissance rapide en traversant la côte opposée. Les premières méthodes traitant de cette question donnaient des résultats incorrects, qui n'étaient pas conformes au critère de réciprocité. Pour résoudre ce problème, Millington [6] a élaboré une procédure imposant le respect de ce critère. Cette procédure s'est révélée très satisfaisante dans le cas d'une Terre modérément lisse, donnant des résultats très proches de ceux obtenus par la méthode plus complexe développée par Hufford [7]. A noter par ailleurs une étude théorique de la propagation au-dessus d'une surface complexe, qui affiche une bonne concordance avec les résultats expérimentaux [29].

FIGURE 5

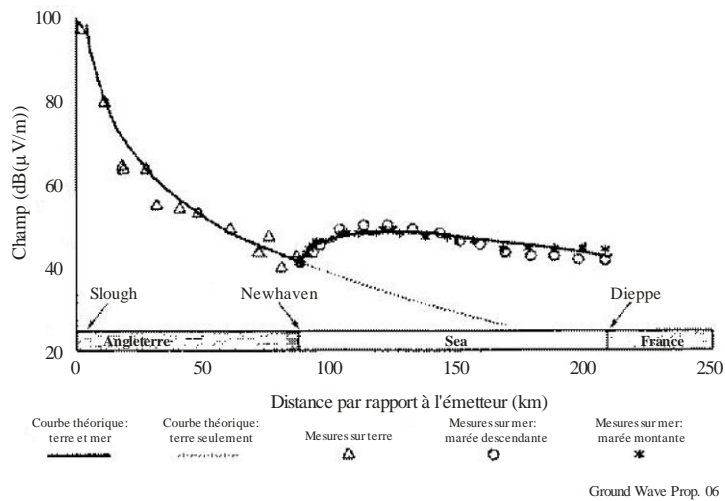
## Première démonstration de l'effet de renforcement de l'onde de sol au-dessus de la mer à 77 MHz



Ground Wave Prop. 05

Les premiers essais de Millington, réalisés à 77 MHz, à de faibles distances, montrent bien cet effet de renforcement [30] (voir la Figure 5). Pour confirmer cet effet, ce premier essai a été suivi d'une expérience longue distance au-dessus de la Manche à 3 MHz [31] (voir la Figure 6).

FIGURE 6  
Essais portant sur l'effet de renforcement de l'onde de sol à 3 MHz

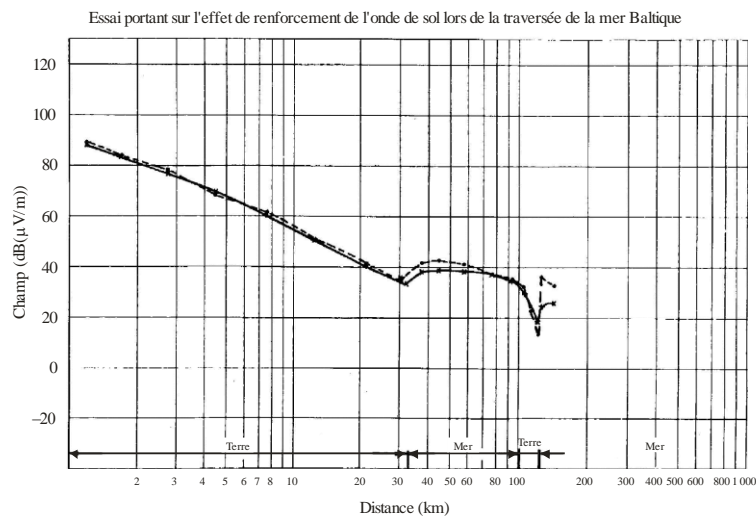


Cet effet est tellement inattendu qu'il pourra être nécessaire d'en refaire la démonstration à l'intention des nouvelles générations d'ingénieurs.

D'autres confirmations de l'effet de renforcement sont fournies dans les documents [12] et [14]. L'effet y est présenté pour un trajet Terre-mer, avec une bonne concordance entre les prévisions de propagation et les mesures, pour des fréquences comprises entre 100 et 2 000 kHz. Le document [9] montre un effet de renforcement analogue lorsque le trajet de propagation passe d'une forêt à une clairière, à une fréquence de 10 MHz. Le document [32] présente les effets de renforcement sur des trajets passant de la terre ferme à une étendue d'eau, pour des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 285-325 kHz.

La Figure 7 illustre le résultat d'un essai plus complexe réalisé à 3,9 MHz sur un trajet terre-mer-terre-mer en mer Baltique [33].

FIGURE 7  
Essais portant sur l'effet de renforcement de l'onde de sol lors de la traversée de la mer Baltique





## 7.2 Méthode de Millington pour les trajets mixtes

La méthode proposée par Millington, applicable, entre autres, à un trajet terre-mer-terre, consiste à suivre la courbe du champ de l'onde de sol sur la première partie du trajet, laquelle est située au-dessus de la terre ferme. Au niveau de la frontière terre-mer, la courbe de propagation au-dessus de la mer est ajustée pour correspondre à la valeur au-dessus de la terre en cet emplacement précis. Cette deuxième courbe est ensuite suivie jusqu'à la prochaine côte et la courbe correspondante de propagation au-dessus de la terre est ajustée à cette distance. La nouvelle courbe de propagation au-dessus de la terre est suivie jusqu'à la distance requise. On obtient ainsi une première valeur intermédiaire. Les emplacements de l'émetteur et du récepteur sont ensuite intervertis et la procédure est répétée pour le trajet inverse, ce qui fournit une seconde valeur intermédiaire. La valeur de prévision recherchée est obtenue en effectuant la moyenne géométrique des deux valeurs intermédiaires du champ (moyenne arithmétique lorsque les champs sont exprimés en décibels).

Pour mettre en oeuvre cette méthode, deux options se présentent: soit appliquer une procédure graphique simple si les courbes sont tracées selon une échelle de distance linéaire, soit utiliser un programme informatique (qui ne présente pas de difficulté particulière).

La procédure est également décrite à l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.368.

**Etape 1.** On choisit, pour une fréquence donnée, la courbe correspondant à la section  $S_1$  et on relève le champ  $E_1(L_1)$  en  $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$  à la distance  $L_1$ . La courbe correspondant à la section  $S_2$  permet de déduire **ensuite** les champs  $E_2(L_1)$  et  $E_2(L_1 + L_2)$ , puis on trouve, de façon similaire à l'aide de la courbe s'appliquant à la section  $S_3$ , les champs  $E_3(L_1 + L_2)$  et  $E_3(L_1 + L_2 + L_3)$ , et ainsi de suite.

**Etape 2.** Le champ à la réception est alors défini par l'expression:

$$E_R = E_1(L_1) - E_2(L_1) + E_2(L_1 + L_2) - E_3(L_1 + L_2) + E_3(L_1 + L_2 + L_3) \quad (22)$$

**Etape 3.** 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:

$$E_T = E_3(L_3) - E_2(L_3) + E_2(L_3 + L_2) - E_1(L_3 + L_2) + E_1(L_3 + L_2 + L_1) \quad (23)$$

**Etape 4.** Le champ recherché est donné par:

$$E_M(R) = \frac{(E_R + E_T)}{2} (\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) \quad (24)$$

## 7.3 Estimation d'une valeur de conductivité représentative applicable à des trajets mixtes dans la bande des ondes hectométriques

Comme indiqué précédemment, lors des calculs de prévision, c'est sans doute l'estimation de la conductivité du sol qui présente la plus grande incertitude. Dans le cas des trajets terrestres, pour lesquels les variations de la conductivité ne sont pas trop extrêmes, il n'est pas toujours justifié d'appliquer la procédure de prévision pour trajets mixtes décrite ci-dessus. En pareil cas, on pourra appliquer une méthode de prévision fondée sur une valeur de conductivité représentative de la totalité de la section terrestre du trajet. Les documents [32] et [13] viennent confirmer cette hypothèse dans le cas des fréquences de la bande des ondes kilométriques proches de 300 kHz. Les documents [12], [14] et [9] la confirment pour les bandes des ondes kilométriques et hectométriques. Enfin, le document [1] confirme l'hypothèse dans le cas des ondes décimétriques.

La conductivité pondérée est définie comme la moyenne des valeurs de conductivité le long du trajet, pondérées de la longueur de chaque section de conductivité:

$$\sigma_{pondérée}(\text{mS/m}) = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot d_i}{\sum_i d_i} \quad (25)$$

où  $\sigma_i$  désignent les différentes valeurs de conductivité le long du trajet, et  $d_i$  les longueurs des sections du trajet présentant une conductivité constante.

La conductivité pondérée est une valeur de conductivité représentative du trajet qui peut être utilisée dans le calcul de prévision. En procédant ainsi, les estimations des niveaux de champ le long de trajets mixtes entièrement terrestres donnent de bons résultats. Dans le cas des trajets mixtes terre-mer-terre, la conductivité pondérée ne doit être utilisée que pour les sections terrestres, après quoi il convient d'appliquer la méthode de Millington.

## 8 Etat de la mer

La conductivité équivalente de l'eau de mer pour une mer calme a été examinée au § 6. Il nous faut aussi considérer le cas d'une mer agitée, car les vagues créent une irrégularité de surface et donc un affaiblissement additionnel par diffusion de l'énergie du mode de l'onde de surface.

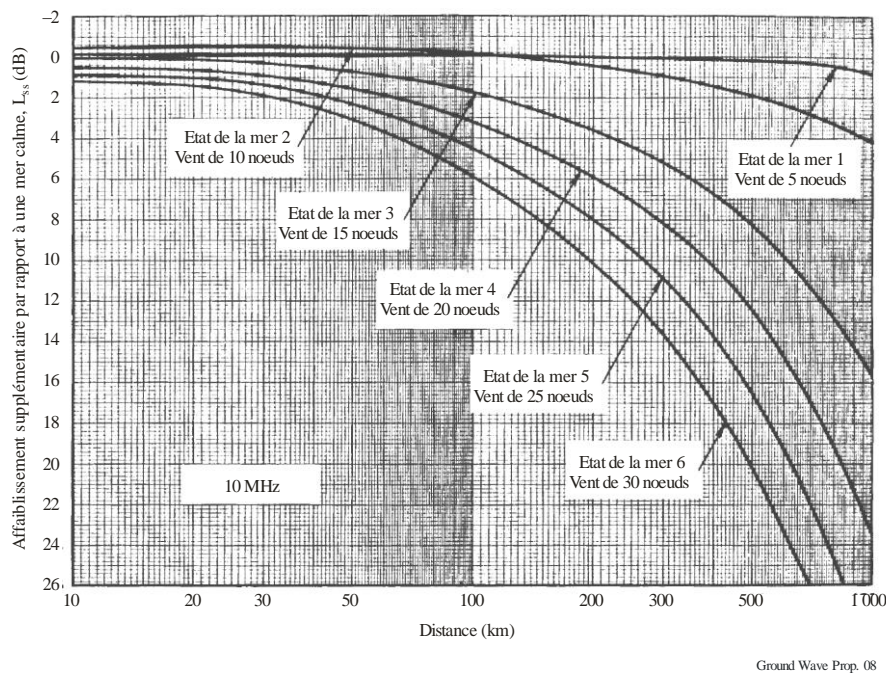
Une théorie couramment utilisée pour la propagation de l'onde de sol dans le domaine des hautes fréquences au-dessus d'une mer agitée est celle élaborée par D. E. Barrick ([34], [35]). Elle s'intègre facilement à la méthode de détermination du champ de l'onde de sol se propageant sur une Terre lisse. Barrick a montré que les effets d'une surface légèrement rugueuse peuvent être modélisés en remplaçant l'impédance d'une surface lisse par une impédance de surface équivalente qui dépend de la rugosité de la surface considérée. La théorie de Barrick repose sur trois hypothèses:

- i) la hauteur de la surface au-dessus d'un plan moyen est faible par rapport à la longueur d'onde;
- ii) les pentes de la surface sont faibles;
- iii) le milieu situé au-dessous de la surface est très conducteur.

Ces diverses conditions se trouvent réunies dans le cas de la propagation en ondes décimétriques au-dessus de la mer. En revanche, elles ne le sont pas dans le cas des ondes métriques se propageant au-dessus d'une mer modérément agitée, ni en ce qui concerne la propagation au-dessus de la terre ferme, et ce quelle que soit la bande de fréquences.

La Figure 8 donne des exemples d'affaiblissement en fonction de l'état de la mer, à 10 MHz, pour le modèle du spectre des vagues de mer élaboré par Phillip [36]. En règle générale, l'affaiblissement augmente avec la longueur du trajet, l'état de la mer et la fréquence radioélectrique. Cette figure illustre un phénomène caractéristique: à des distances allant jusqu'à 100 km de la côte, mais au-delà de la distance à laquelle se produit l'effet de renforcement, le champ au-dessus d'une mer légèrement agitée est supérieur à celui qui règne au-dessus d'une mer calme (voir l'état de la mer N° 2 dans la Figure 8). Pour une longueur d'onde de 295 m, on a observé une augmentation de 1,5 à 2 fois [28].

FIGURE 8

**Affaiblissement dû à l'état de la mer à 10 MHz****9 Environnements ruraux**

En environnement rural, le champ moyen dépend des propriétés électriques du sol, de la fréquence, de la distance à l'émetteur et de variations de grande échelle dues aux effets des irrégularités du relief au voisinage du récepteur. Tous ces aspects ont été décrits dans les chapitres précédents.

Dans des situations concrètes, en environnement réel, les conditions de réception ne sont pas identiques d'un emplacement à l'autre, même lorsque la distance entre les emplacements est très inférieure à la distance à l'émetteur; ce phénomène est dû aux variations locales du relief et à la présence d'arbres, de végétation, de bâtiments, d'infrastructures d'origine humaine, de câbles électriques aériens, etc. Dans nombre d'environnements apparemment dégagés, la différence des niveaux d'un signal à des emplacements voisins suit une distribution log-normale avec un écart type compris en moyenne entre 2 et 4 dB environ.

Le cas particulier de la propagation au-dessus du bord des falaises a été étudié par Furutsu [37]. Pielou [38] a fourni un exemple de l'effet produit.

**10 Environnements urbains****10.1 Effet des zones urbaines à forte densité de construction, de 0,1 à 20 km****10.1.1 Introduction**

Un certain nombre d'applications fait appel aux radiofréquences dans la bande des ondes hectométriques sur de courtes distances (par exemple, organisation des réseaux de radiodiffusion urbains et régionaux, développement des services publics collectifs, etc.). Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques des champs électromagnétiques dans cette bande, à des distances comprises entre plusieurs dizaines de mètres et quelques dizaines de kilomètres. Il existe pourtant peu d'études sur la répartition et l'affaiblissement des fréquences moyennes en zone urbaine, pour des distances inférieures à une longueur d'onde.

Le comportement de l'intensité du champ électromagnétique lointain en zone urbaine a été étudié par plusieurs auteurs, notamment Causebrook [22] (voir le § 10.2) et Chernov [39].

Dans la région de champ proche, le champ augmente de façon marquée aux courtes distances et on observe une différence dans les vitesses de variation des composantes électrique et magnétique. La composante qui subit la plus forte amplification dépend du type de l'antenne d'émission. En particulier, lorsque l'on s'approche d'une antenne à champ électrique (par exemple, une antenne unipolaire verticale), seule subsiste, à la limite, la composante électrique due au courant circulant dans l'antenne.

A de courtes distances, le champ décroît d'abord en  $R^{-3}$ , puis en  $R^{-2}$ ; à grande distance, il décroît en  $R^{-1}$ . En présence de bâtiments, en zone urbaine, ces lois présentent quelques spécificités.

La première hypothèse, confirmée par des études préliminaires, est que l'affaiblissement des ondes dans les zones urbaines bâties devrait être supérieur à l'affaiblissement observé au-dessus d'une Terre lisse. Si cet effet est marqué, l'affaiblissement peut s'exprimer par une formule simple.

### 10.1.2 Rappel théorique succinct (voir par exemple [28] et [60])

Dans le cas d'un champ rayonné par une source électrique élémentaire dans une direction perpendiculaire à l'axe de la source, la composante électrique,  $E_{el}$ , et la composante magnétique,  $H_{el}$ , s'expriment comme suit:

$$E_{el} = \left( \frac{iJkZ_0}{4\pi} \right) \left( \frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left( 1 + \frac{1}{ikR} - \frac{1}{k^2R^2} \right) \quad (26)$$

$$H_{el} = \left( \frac{iJkl}{4\pi} \right) \left( \frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left( 1 + \frac{1}{ikR} \right) \quad (27)$$

De même, dans le cas d'un élément rayonnant magnétique, la composante magnétique,  $H_m$ , et la composante électrique,  $E_m$ , sont données par:

$$E_m = \left( \frac{ikJl}{4\pi} \right) \left( \frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left( 1 + \frac{1}{ikR} \right) \quad (28)$$

$$H_m = \left( \frac{1kJl}{4\pi Z_0} \right) \left( \frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left( 1 + \frac{1}{ikR} - \left( \frac{1}{k^2R^2} \right) \right) \quad (29)$$

où  $J$  désigne l'intensité du courant dans l'élément rayonnant,  $l$  la longueur de l'élément,  $Z_0$  la résistance de l'espace libre ( $120\pi \Omega$ ) et  $k = 2\pi/\lambda$ . Les indices « $el$ » et « $m$ » désignent respectivement la source de rayonnement électrique et la source de rayonnement magnétique.

Dans le champ proche, on a  $R \approx 1/k$ ; le terme « $\exp(-ikR)$ » est donc à peu près égal à 1, d'où:

$$E_{el} = JZ_0 / (i4\pi R^3) \quad (30)$$

$$H_{el} = Jl / (4\pi R^2) \quad (31)$$

$$E_m = Jl / (4\pi R^2) \quad (32)$$

Il ressort de ces expressions qu'à proximité de l'élément rayonnant, le champ augmente de façon marquée et que les composantes électrique et magnétique n'augmentent pas avec la même vitesse. Dans le champ proche, le rapport  $E_{el}/H_{el}$  augmente de façon proportionnelle à l'inverse de la distance:

$$E_{el}/H_{el} = W / (iR) \quad (33)$$

On peut déduire des équations (26) à (29) que dans la zone de champ proche, le champ décroît en  $R^{-3}$ , puis en  $R^{-2}$ , et que dans la zone de champ lointain, il décroît en  $R^{-1}$ . En outre, dans la zone de champ proche, les composantes électrique et magnétique sont déphasées de  $90^\circ$  environ; de ce fait, le champ a un caractère réactif et non rayonnant, le vecteur de Poynting étant quasiment égal à zéro.

De nombreux textes fondamentaux sur l'électrodynamique et les antennes (voir notamment [40]) n'analysent pas la zone de champ proche de façon exhaustive et ne décrivent pas non plus la façon dont se créent les champs lointains. Dans le cadre de la présente étude, une analyse du champ proche est cependant essentielle.

A cet effet, nous considérons ici que pour des distances courtes, le terme « $\exp(-ikR)$ » peut être remplacé par la valeur approchée  $(1-ikR)$ ; les équations (26) et (27) deviennent alors:

$$E_{el} = \left( \frac{ijklZ_0}{4\pi R} \right) \left( -\frac{1}{k^2 R^2} - ikR \right) \quad (34)$$

$$H_{el} = \left( \frac{ijkl}{4\pi R} \right) \left( \frac{1}{ikR} - ikR \right) \quad (35)$$

Il ressort de ces deux formules que le module du vecteur de Poynting  $\Pi = [H_{el}^* E_{el}]$  est composé de deux parties: une partie imaginaire  $\Pi_{im} \approx (kJ/4\pi)^2 Z_0 / (k^3 R^5)$  et une partie réelle égale au produit de la partie réelle de la composante magnétique (dans laquelle le premier terme de la seconde parenthèse est manifestement plus important que le second terme) et de la partie réelle de la composante électrique. La composante magnétique du vecteur décroît en  $1/R^2$ , et la composante électrique reste constante. Leur produit donne:

$$\Pi_{Re} \approx (kJ/4\pi)^2 Z_0 / R^2 \quad (36)$$

Ainsi, la vitesse de décroissance de la densité de puissance est identique à proximité de l'antenne d'émission et dans la zone lointaine, pour laquelle, à partir de (26) et (27) pour de grandes valeurs de  $R$ , nous obtenons l'équation (36). Autrement dit, la partie réelle de la densité de puissance rayonnée par une antenne à champ électrique varie avec la distance, dans les zones proche, intermédiaire ou lointaine, en  $1/R^2$ , ce qui correspond à la loi générale de l'expansion sphérique. De façon caractéristique, le rapport de la partie imaginaire à la partie réelle augmente à proximité de l'élément rayonnant:

$$\Pi_{im} / \Pi_{Re} = 1 / k^3 R^3 \quad (37)$$

Dans la bande des ondes hectométriques, la zone proche se limite à des distances très inférieures à  $1/k$ . Ainsi, pour des longueurs d'onde comprises entre 200 et 300 m, pour lesquelles  $1/k$  varie de 31 à 48 m, la zone proche s'étend jusqu'à 10 m environ.

Dans la zone lointaine, pour les ondes hectométriques de longueur supérieure à 300-500 m environ, l'intensité du champ est donnée par:

$$E = (300 P^{1/2} / R) \cdot V \quad \text{mV/m} \quad (38)$$

où:

$P$ : puissance rayonnée (kW)  
 $R$ : distance (km).

La fonction d'affaiblissement,  $V$ , dépend d'un paramètre,  $\rho$ :

$$\rho = -i(\pi R / \lambda) \cdot [(\epsilon' - 1) / (\epsilon')^2], \quad \epsilon' = \epsilon - i \cdot 60 \lambda \sigma \quad (39)$$

où:

- $\lambda$ : longueur d'onde (m)
- $\varepsilon'$ : perméabilité diélectrique complexe
- $\varepsilon$ : partie réelle de la perméabilité
- $\sigma$ : conductivité du sol (S/m).

Dans le cas des longueurs d'onde comprises entre 200 et 300 m (1,5 – 1,0 MHz) et pour des conductivités,  $\sigma$ , entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$  S/m:

$$\varepsilon' = \varepsilon - i \cdot 60 \cdot (200 \cdot 10^{-3} \dots 300 \cdot 10^{-2}) = \varepsilon - i \cdot (12 \dots 180).$$

Dans le cas des sols de faible conductivité,  $\varepsilon'$ , le premier terme de l'équation (39) peut être négligé, d'où:

$$\rho \approx 10^5 \cdot \pi R / (6 \lambda^2 \cdot \sigma)$$

où  $R$  est exprimé en km,  $\lambda$  en m et  $\sigma$  en mS/m.

Par conséquent, pour  $\sigma = 1$  mS/m et  $\lambda = 200$  m,  $\rho = 1,31$  et  $13,1$  pour  $R = 1$  et  $10$  km respectivement.

La fonction d'affaiblissement est donnée par la formule approchée suivante:

$$V = (2 + 0,3\rho) / (2 + \rho + 0,6\rho^2) \quad (40)$$

Pour de grandes valeurs de  $\rho$ , l'équation (40) présente une dépendance voisine de  $1/\rho$ , et le facteur d'affaiblissement est proportionnel à  $R^{-1}$ .

Ainsi, dans le cas d'un sol de faible conductivité et à des fréquences de fonctionnement élevées, la dépendance du champ avec la distance varie progressivement de  $1/R$  (26) à  $1/R^2$  au-delà de 1 km environ. A ces distances, compte tenu de (38) et (40), nous avons:

$$E = 300 P^{1/2} \cdot 6 \lambda^2 \sigma / (10^5 \pi R^2) = 5730 \cdot P^{1/2} \lambda^2 \sigma / R^2 \quad \mu\text{V/m} \dots \quad (41)$$

où  $P$  est exprimé en kW,  $R$  en km,  $\lambda$  en m et  $\sigma$  en mS/m.

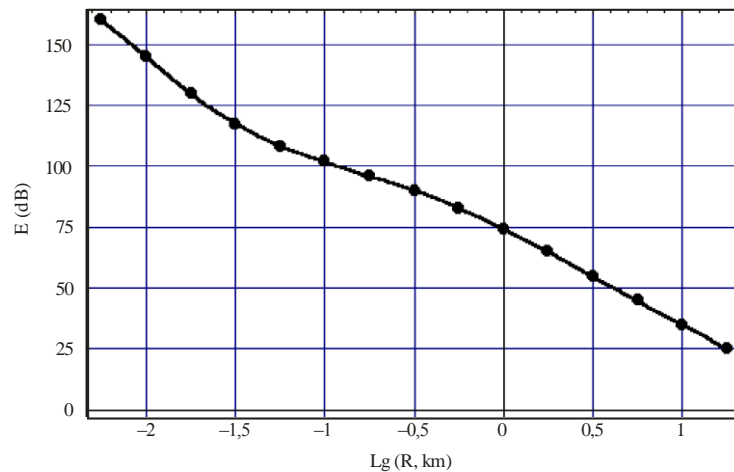
Il importe de noter que  $1/R^2$  (voir [41]) est en théorie la vitesse maximale de décroissance du champ en fonction de la distance à l'émetteur dans des conditions de milieu urbain homogène, à des distances où l'on peut considérer que la surface de la Terre est plate. Cette expression définit la dépendance limite, de sorte que dans le cadre des hypothèses formulées ci-dessus, une décroissance plus abrupte en fonction de la distance serait en théorie impossible, et ce quelles que soient les conditions. En appliquant cette démarche, Chernov [41] propose une solution commune, valable à toutes les distances à partir d'une dizaine de mètres:

$$E(R) = 74,72 - 33,36R - 10,47R^2 - 1,25R^3 + 367R^4 + 077R^5, \text{ dB } (\mu\text{V/m}), \quad (42)$$

où  $R = \lg(R, \text{ km})$ .

Cette relation de dépendance est illustrée à la Figure 9.

FIGURE 9



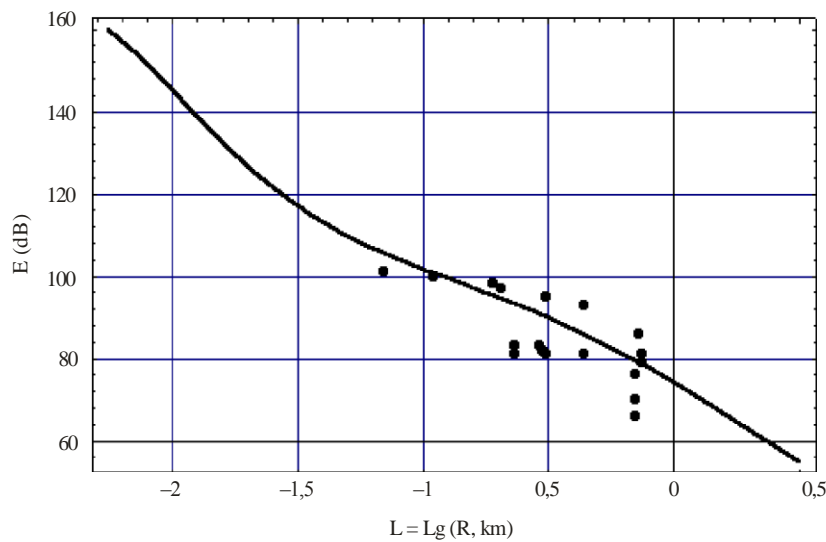
Ground Wave Prop. 09

### 10.1.3 Résultats des mesures

Pour évaluer l'erreur inhérente à cette courbe (Figure 9) ainsi que l'affaiblissement des ondes hectométriques à de courtes distances de l'émetteur, des mesures ont été réalisées ([41], [61] et [63]) au moyen d'un mesureur de champ muni d'une antenne-cadre blindée, jusqu'à une distance de 1 000 m par rapport à l'émetteur, dans divers environnements urbains.

La courbe de dépendance théorique et les mesures de champ [41] sont représentées à la Figure 10.

FIGURE 10

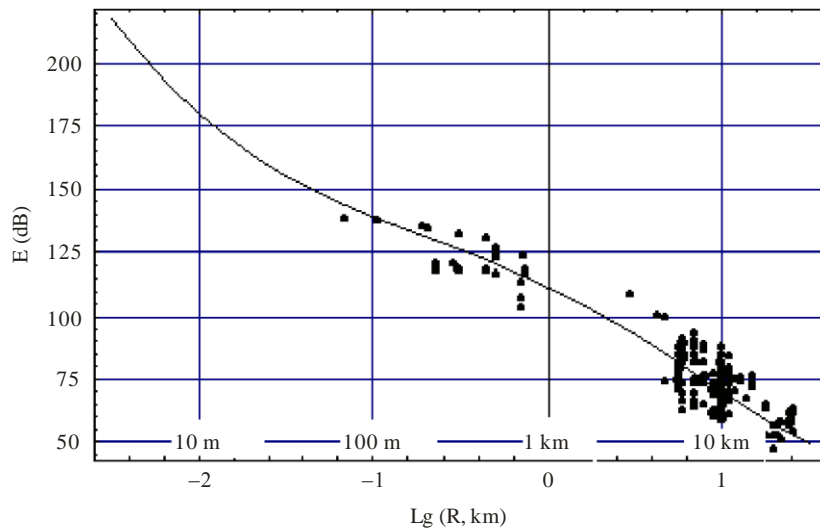


Ground Wave Prop. 10

Il ressort de cette figure que les données mesurées sont en bonne concordance avec la courbe théorique. Il importe en outre de noter que les mesures sont regroupées et qu'elles ne s'écartent pas de la tendance, même lorsqu'elles sont réalisées dans des bâtiments. A noter toutefois une exception: les mesures effectuées dans un ascenseur présentent un affaiblissement supplémentaire de 40 dB maximum imputable aux parois métalliques.

Ces résultats ainsi que ceux obtenus précédemment dans une ville à des distances comprises entre 0,5 et 30 km, pour une puissance rayonnée de 5 kW [41], sont représentés à la Figure 11.

FIGURE 11



Ground Wave Prop. 11

Cette étude a montré qu'au-delà de 500 m, les effets de l'affaiblissement spécifique au milieu urbain commencent à se faire sentir et que la propagation en ondes hectométriques dans les zones urbaines bâties est analogue à celle obtenue au-dessus d'un sol de conductivité médiocre,  $\sigma=1$  mS/m.

D'autres séries de mesures ont été réalisées pour des émetteurs situés en ville, avec des longueurs de trajet comprises entre 0,5 et 26 km et pour des fréquences allant de 702 à 1 539 kHz. Ci-dessous figurent deux exemples de répartition du champ le long de lignes de propagation.

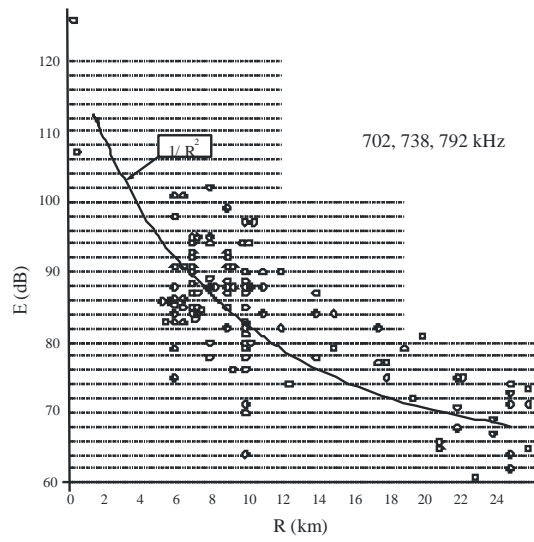
Pour augmenter le volume de données, les résultats ont été regroupés: la Figure 12 regroupe les résultats de mesure du champ rayonné par trois émetteurs à des fréquences situées dans la partie inférieure de la bande de radiodiffusion en ondes hectométriques, et la Figure 13 regroupe les résultats obtenus pour quatre émetteurs dans la partie supérieure de la bande. La puissance annoncée de chaque émetteur est de 5 kW.

La courbe quadratique inverse est également représentée dans les deux figures; elle affiche une concordance relativement bonne avec les mesures.

Outre les mesures réalisées au moyen d'émetteurs situés en ville, des recherches ont aussi été menées sur des émetteurs situés en périphérie, à des distances de 10-12 km et jusqu'à quelques dizaines de kilomètres. Ces nouvelles mesures ont été effectuées sur une période de quatre jours. Les mesures de champ ont été réalisées à l'aide d'un véhicule équipé à cet effet, se déplaçant dans la ville de Moscou et dans ses environs. A noter que les emplacements choisis pour les analyses étaient limités à des trajets traversant le centre-ville (Figure 14).

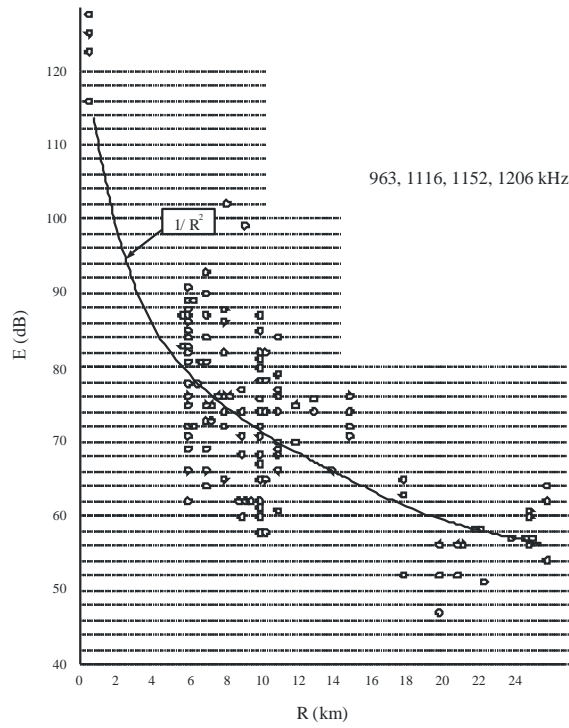


FIGURE 12



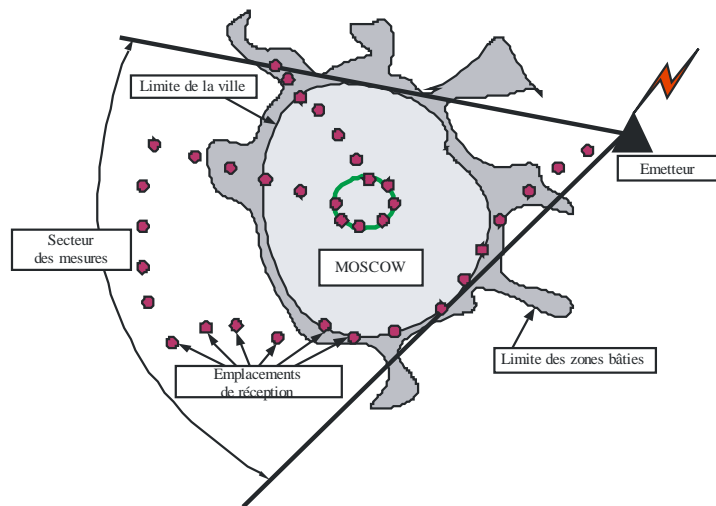
Ground Wave Prop. 12

FIGURE 13



Ground Wave Prop. 13

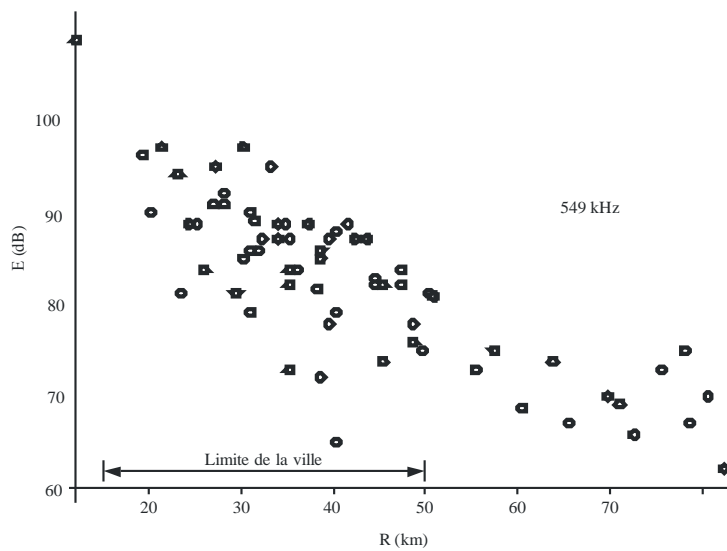
FIGURE 14



Ground Wave Prop. 14

Les Figures 15 et 16 illustrent les résultats obtenus pour l'un des émetteurs suburbains sur deux fréquences différentes.

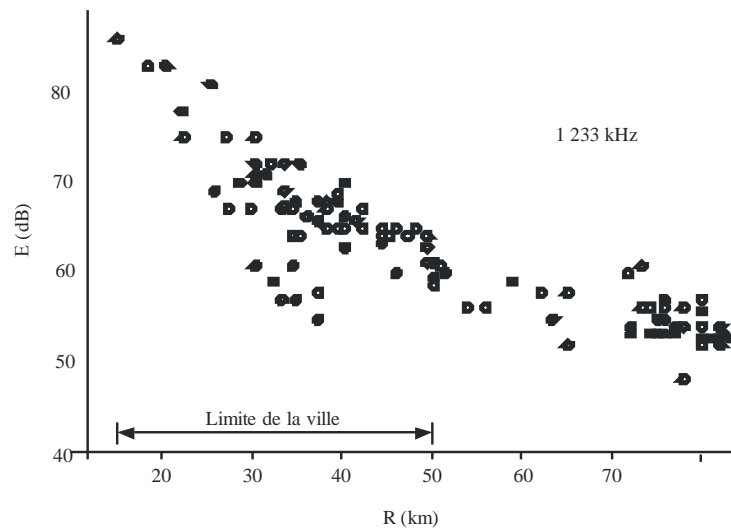
FIGURE 15



Ground Wave Prop. 15

Outre les résultats obtenus à des fréquences moyennes, on notera également des travaux analogues [42] consacrés à des mesures du même type dans la bande des ondes décamétriques. Il en ressort qu'à des distances comprises entre 100 et 700 m de l'émetteur, le champ est quasiment proportionnel à  $1/R$ , alors qu'entre 0,7 et 10 km, la loi de dépendance se rapproche plutôt de  $1/R^2$ . Le document [39] fournit des informations complémentaires sur les mesures effectuées dans l'agglomération de Moscou.

FIGURE 16



Ground Wave Prop. 16

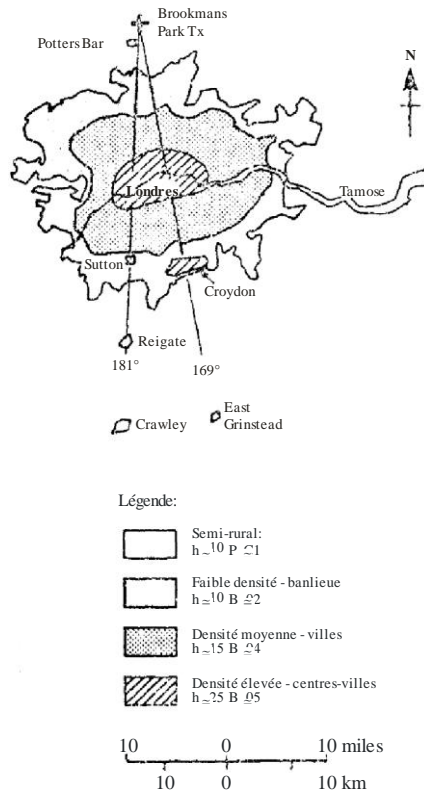
## 10.2 Au-delà de 25 km

Après la mise en place de la radiodiffusion en ondes hectométriques dans les années 1920, les variations du signal reçu ont fait l'objet de plusieurs études. Celles-ci ont permis de relever plusieurs phénomènes (voir [43], [44], [45] et [46]): effets de la conductivité du sol, effets de la hauteur et des irrégularités du relief, influence des grands du bâtiment, etc., effets nocturnes de l'onde ionosphérique (alors inconnue) et, en particulier, augmentation de la vitesse d'affaiblissement avec la distance en milieu urbain. Une fois compris les principes généraux de la propagation de l'onde de sol dans la bande des ondes hectométriques, il est apparu que les prévisions de couverture globale reposant sur une propagation au-dessus d'une Terre lisse caractérisée par des conductivités appropriées étaient relativement satisfaisantes dans la plupart des cas, pour des émissions à forte puissance desservant un environnement composé de zones rurales et de zones urbaines. Cela étant, le regain d'intérêt pour la radiodiffusion locale essentiellement destinée aux villes et à leurs banlieues a révélé l'insuffisance de ces méthodes en milieu urbain. Ces considérations seront d'autant plus importantes dans le cas de la radiodiffusion numérique, pour laquelle la frontière entre une réception satisfaisante et une réception impossible à de faibles rapports signal/bruit est beaucoup plus marquée.

Les effets des bâtiments, d'autres structures contenant des éléments verticaux conducteurs et des arbres ont été identifiés par Bown *et al.* [44], qui en ont fourni une explication en termes de circuits résonants dans les structures verticales. Plus tard, Causebrook [47] a mené des études un peu partout dans Londres, à partir desquelles il a expliqué les effets observés dans les zones à forte densité de construction. Dans ce cadre, il a réalisé des mesures à trois fréquences et pour deux azimuts traversant la capitale britannique (voir la Figure 17).

FIGURE 17

Trajets de mesure à travers Londres

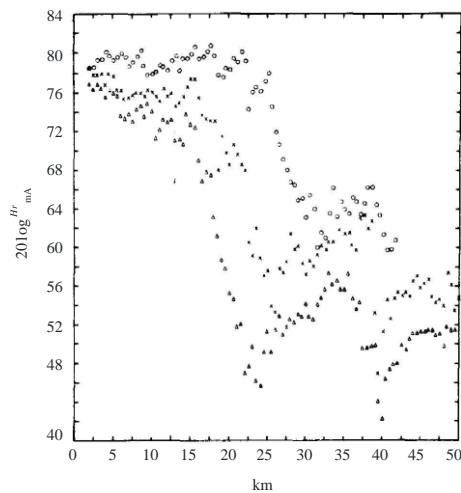


Ground Wave Prop. 17

Les mesures obtenues par Causebrook sur le trajet traversant la ville de Londres à l'azimut  $169^\circ$  sont illustrées à la Figure 18. Aux trois fréquences étudiées, le champ à proximité de l'émetteur ne décroît pas comme prévu: on observe d'abord une décroissance rapide jusqu'à un minimum, puis un renforcement. Causebrook a donc examiné l'évolution de l'impédance de surface due à une structure qui ressemblerait à un lit de «clous conducteurs». Il a examiné le plan complexe de la fonction  $\rho$  (voir l'équation (18)) et a tracé la courbe de l'affaiblissement  $A$  (équation (17)) et de la phase. Le résultat est illustré à la Figure 19.

FIGURE 18

Mesures réalisées sur trois fréquences à travers la ville de Londres



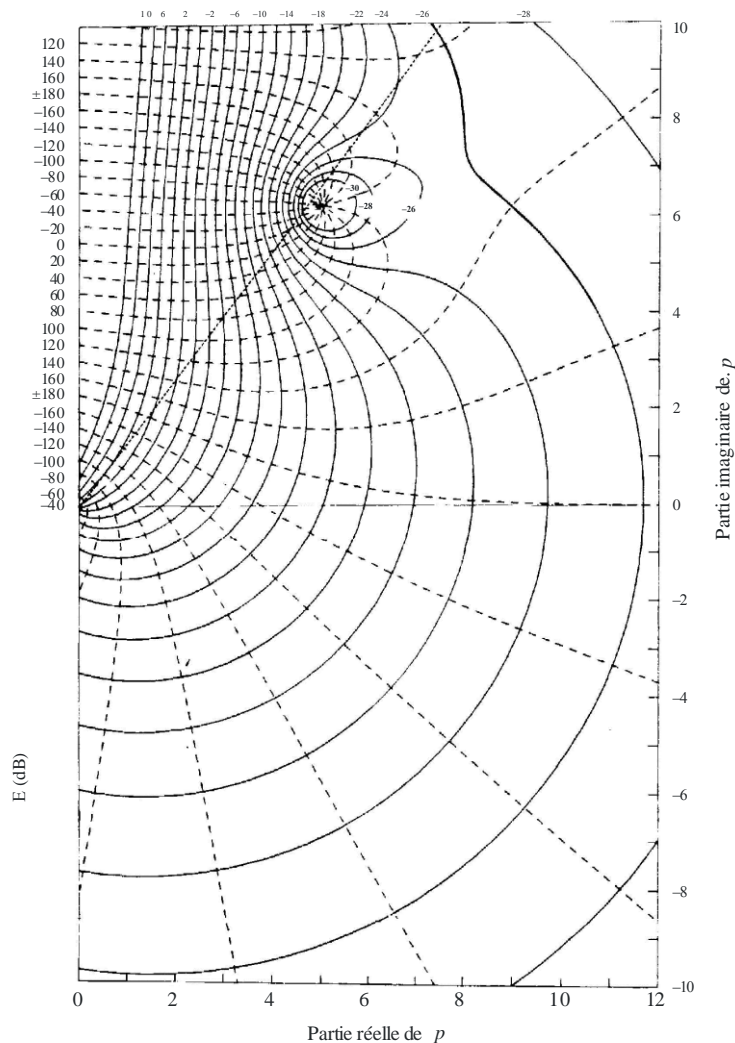
Ground Wave Prop. 18

Il a ainsi montré que dans le cas d'une Terre lisse et dans la majorité des environnements de type rural, la propagation se situe dans la moitié inférieure de la Figure 11, là où les contours présentent une forme régulière. En revanche, les résultats obtenus dans l'environnement urbain de forte densité se situent dans la moitié supérieure de la figure, où l'on observe une variation inhabituelle de l'affaiblissement, y compris un point zéro.

Une méthode de calcul a été proposée dans laquelle le trajet a été divisé en deux segments de conductivités et de caractéristiques de surface différentes; les caractéristiques comprennent la hauteur des structures d'origine humaine et le pourcentage de zones recouvertes de bâtiments. Pour l'heure, cette méthode n'a pas été développée ni largement mise à l'épreuve en tant qu'outil de prévision.

Luo [48] a abordé ce problème de façon différente en définissant un ensemble de composantes d'affaiblissement relatives à la longueur du trajet, à la réflexion, à la diffraction et à la réfraction autour des bâtiments, etc.

FIGURE 19  
Le plan complexe  $\rho$



Ground Wave Prop. 19

## 11 Variations saisonnières de la propagation de l'onde de surface

La propagation de l'onde de surface présente parfois des variations saisonnières. Ces variations peuvent être dues à des modifications de la réfractivité de la troposphère (voir le § 3.3) ou à l'état de la couche de végétation, à des changements du niveau de la surface libre de la nappe phréatique, à des températures négatives où l'eau se transforme en glace, à une épaisse couche de neige, etc., autant de changements qui sont susceptibles de modifier la conductivité équivalente du sol. Tous ces changements peuvent avoir une incidence sur l'intensité du champ de l'onde de surface. En particulier, ces variations saisonnières peuvent entraîner une diminution du champ en été.

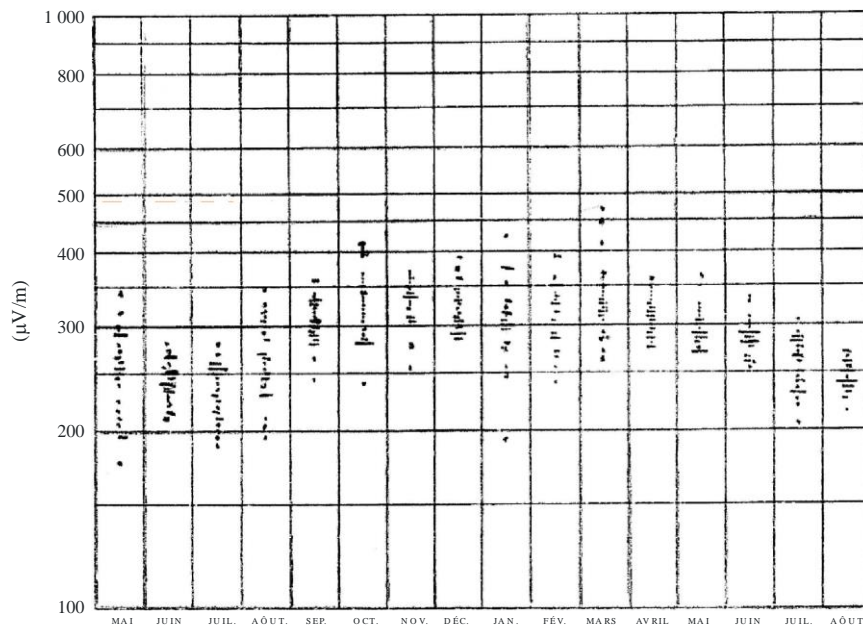
### 11.1 Historique

C'est dans les années 1920 qu'ont été réalisées, dans les environs de Philadelphie (Etats-Unis d'Amérique) [49], les premières mesures, de jour, du niveau de signal d'une station en ondes hectométriques, jusqu'à une distance de plusieurs centaines de kilomètres. Ces mesures ont montré que les valeurs médianes prises sur une demi-heure ne sont pas constantes d'un jour à l'autre, mais varient jusqu'à plusieurs décibels. De plus, le niveau de signal moyen varie également d'un mois à l'autre et présente une variation saisonnière dont l'ampleur est maximale pendant les mois d'hiver. Les chercheurs ont ainsi observé que les moyennes mensuelles des variations saisonnières du signal pouvaient atteindre 4-5 dB. Des études ont été effectuées pour déterminer la

cause de ces variations. Il a été établi une corrélation des changements du niveau de signal avec la température ambiante, l'humidité, la pression et d'autres paramètres atmosphériques. La valeur maximale de corrélation négative a été observée pour la température, sans que les raisons physiques de ce phénomène soient expliquées. Un exemple de variations du niveau de signal sur une année est donné à la Figure 20.

FIGURE 20

**Exemple de variations saisonnières enregistrées aux Etats-Unis d'Amérique**



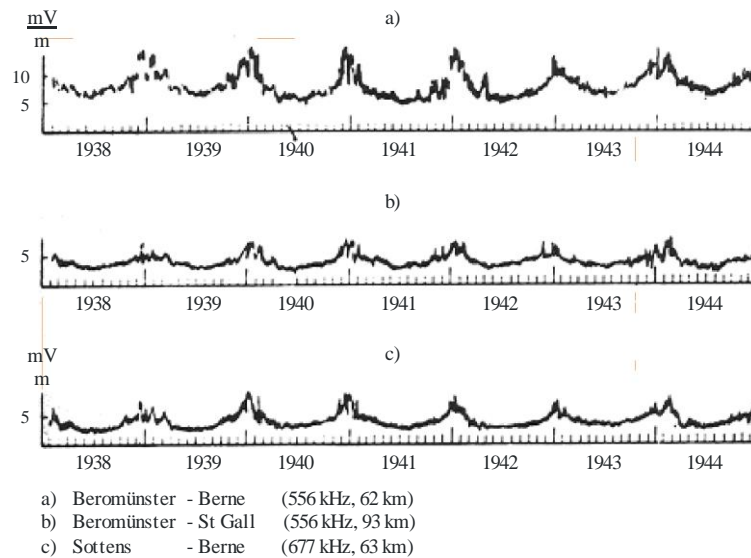
Tous les jours à 13 h 30, heure des Etats de la côte Est des Etats-Unis, valeurs de champ, de Philadelphie (WCAU) à Baltimore, 1 170 km, 76 miles, mai 1939 - août 1940

Ground Wave Prop. 20

Des mesures analogues ont été effectuées en Suisse, en ondes hectométriques, à des distances atteignant 100 km, de 1938 à 1944. Les résultats ont été publiés en 1945 [50]. Le climat d'Europe centrale présente une plus grande gamme de températures et les variations saisonnières y sont aussi plus importantes, jusqu'à 8 dB. Les résultats obtenus en Suisse, de jour, sont présentés à la Figure 21.

FIGURE 21

## Exemple de variations saisonnières enregistrées en Suisse



Ground Wave Prop. 21

A la fin du XXe siècle, des mesures ont été réalisées sur de nombreuses fréquences dans les bandes des ondes kilométriques et hectométriques, à diverses heures de la journée, sur des trajets de diverses longueurs, de 11 à 2 500 km, aux alentours de Moscou et en Sibérie.

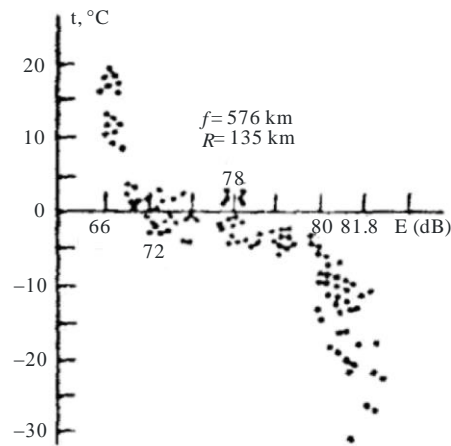
Le document [51] fournit les résultats des premières mesures effectuées dans les environs de Moscou. Des campagnes de mesures plus complètes et plus longues ont été menées sur divers trajets en ondes hectométriques dans la région de Moscou; les variations saisonnières relevées étaient comprises entre 10 et 15 dB en moyenne.

Dans la région sibérienne, qui connaît les plus grands changements de température entre l'été et l'hiver, on a observé des variations du signal de 15 dB environ et plus [52]. Un exemple de variations du champ près de la ville de Tomsk est présenté à la Figure 22. Ce sont les trajets situés à des latitudes moyennes dans des régions présentant d'importantes zones boisées qui subissent les plus grandes variations saisonnières du niveau de signal, de 5 à 15 dB ou plus ([53] et [54]). Le Tableau 3 récapitule les valeurs moyennes de variation de  $H$  (dB) entre les mois d'hiver et les mois d'été [61].



FIGURE 22

Variations saisonnières du champ à 576 kHz en fonction de la température, pour un trajet de 155 km près de la ville de Tomsk



Ground Wave Prop. 22

TABLEAU 3

Variations saisonnières du niveau de signal

Température moyenne en janvier (°C)	4	0	-10	-16
Variation type, $H$ (dB)	4	8	13	15

Les résultats ci-dessus sont repris dans les Recommandations UIT-R P.368-9 et P.1321-3.

## 11.2 Variations journalières de la propagation de l'onde de surface

On observe également des variations journalières sur tous les trajets en ondes hectométriques dans la région de Moscou [39] et sur la plupart des trajets en ondes kilométriques. La Figure 23 en fournit quelques exemples (les fréquences de fonctionnement et la longueur des trajets sont précisées dans la légende). Dans la bande des ondes kilométriques, l'écart quadratique moyen du niveau de signal s'échelonne entre quelques fractions d'un décibel sur de courts trajets dans la partie inférieure de la bande de fréquences, avec une moyenne de 0,8 dB, et quelque 10 dB dans la partie supérieure de la bande, pour des longueurs de trajet atteignant 1 000 km et plus. Dans la bande des ondes hectométriques, les variations du niveau de signal pour des trajets de quelques dizaines de kilomètres sont beaucoup plus importantes qu'en ondes hectométriques, en général entre 2 et 4 dB, et parfois jusqu'à 5-6 dB (voir la Figure 24).

L'affaiblissement sur les trajets de l'onde de sol est fortement lié à la fréquence et à la longueur du trajet. Dans la bande des ondes hectométriques, même pour des trajets de 20 à 100 km, les variations quadratiques moyennes présentent une dépendance notable par rapport à la saison et à la fréquence, comme le montrent les Figures 25 et 26.

FIGURE 23

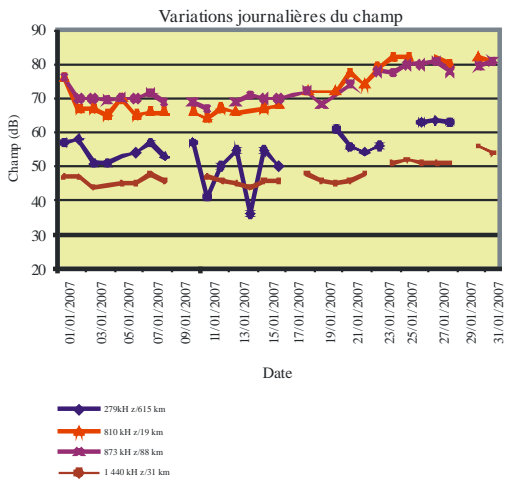


FIGURE 24

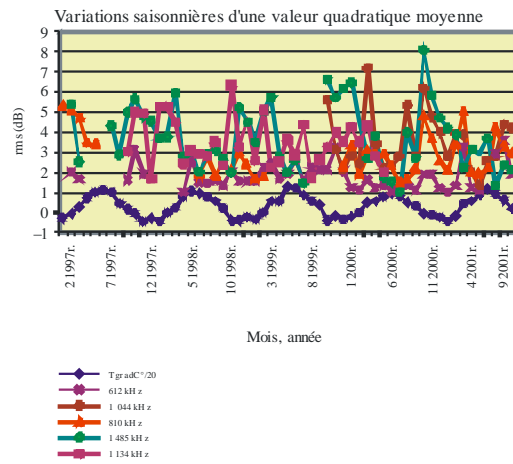


FIGURE 25

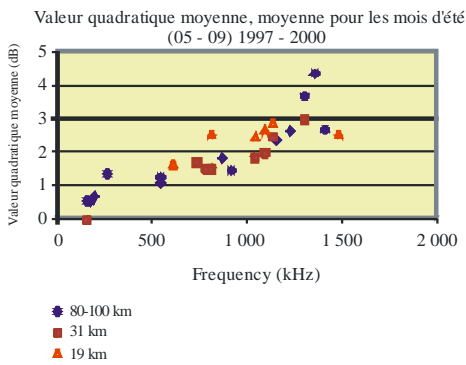
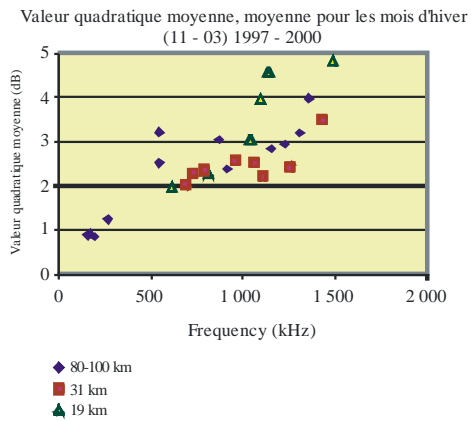


FIGURE 26



## PARTIE 4

## 12 Antennes de réception

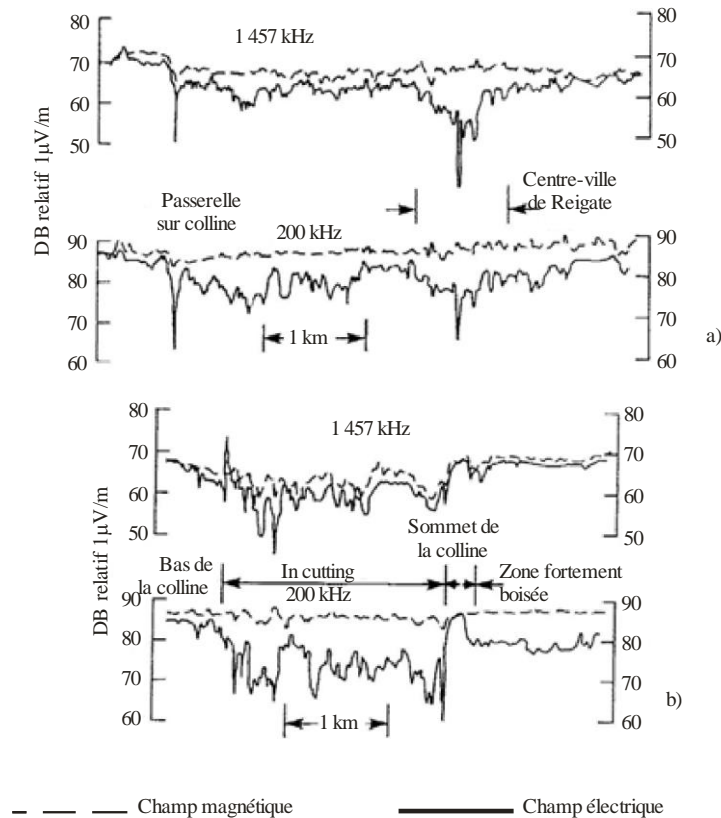
Comme on l'a indiqué au § 3.2.1.2, dans les environnements dégagés, le champ électrique vertical et le champ magnétique horizontal sont liés conformément à l'équation (12). Deux types d'antenne peuvent être utilisés pour les mesures et pour la réception des services: antennes tiges ou filaires, qui réagissent au champ électrique (certaines antennes radio de voiture par exemple), ou antennes-cadres de ferrite, qui réagissent au champ magnétique (que l'on trouve notamment dans des récepteurs de radiodiffusion grand public).

Dans les environnements comportant des obstacles, la variabilité spatiale du champ électrique est souvent beaucoup plus importante que ce que relèvent les antennes magnétiques. La plupart des récepteurs portatifs de mesure du champ sont munis d'antennes-cadres qui sont étalonnées pour le champ électrique au moyen de l'équation (12).

La Figure 27 illustre la variation que l'on observe avec une antenne à champ électrique et une antenne à champ magnétique, sur deux exemples de trajet [55].

FIGURE 27

Mesures effectuées sur deux trajets au moyen d'une antenne magnétique et d'une antenne électrique



### 13 Caractérisation de la variabilité spatiale du champ

Dans ce qui précède, on a caractérisé le comportement général d'une onde de surface se propageant à travers des zones de conductivités différentes, ainsi qu'au-dessus de la mer et dans des zones urbaines. Le champ reçu varie aussi sur de plus courtes distances (quelques mètres), et ce en raison d'effets locaux (changements topographiques ou présence de structures ou de groupes de structures, etc.).

La variabilité du champ peut aussi s'exprimer comme la combinaison de deux termes, chacun d'eux représentant une composante du signal de nature différente, dont les variations n'ont pas la même origine [56]:

- Variabilité spatiale de grande échelle  $m(x)$ : elle est due à des variations de grande échelle le long du trajet séparant l'émetteur du récepteur. Dans le cas de la propagation de l'onde de sol, cette variabilité est causée par des modifications des caractéristiques du trajet émetteur-récepteur ou des conditions de réception en ville, et par les caractéristiques électriques du terrain et de la rugosité du relief.
- Variabilité spatiale de petite échelle  $r_0(x)$ : elle représente les variations locales du signal, et se superpose au niveau moyen à grande échelle; cette variabilité est essentiellement due à l'influence des conditions de réception locales, notamment aux variations causées par divers éléments (ponts, lignes électriques, etc.).

Ces termes sont liés par la formule suivante (en échelle linéaire):

$$r(x) = m(x) \cdot r_0(x) \quad (43)$$

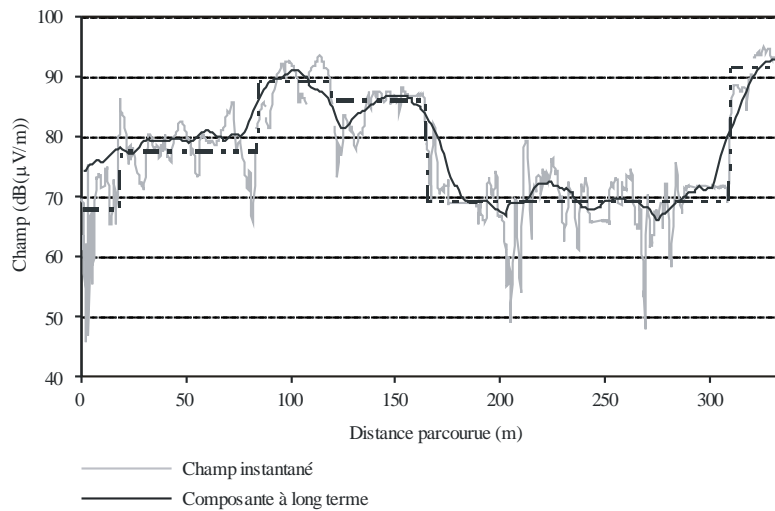
La composante à long terme  $m(x)$ , ou variabilité à grande échelle du signal, est obtenue en calculant la moyenne du signal  $r(x)$ , ce qui permet de supprimer les effets de l'environnement local à l'emplacement du récepteur. Le signal  $m(x)$  correspond à une série de valeurs moyennes locales du signal  $r(x)$  dans le cas de la réception mobile.

La composante à court terme  $r_0(x)$ , ou variation rapide du signal autour de la valeur moyenne  $m(x)$ , représente les variations locales du signal  $r(x)$ . Aussi convient-il, pour évaluer la composante à court terme, de calculer d'abord la composante à long terme en effectuant la moyenne des échantillons de signal situés dans un certain rayon autour de chaque emplacement, puis de soustraire cette composante de l'enveloppe du signal.

Une différenciation correcte des composantes  $m(x)$  et  $r_0(x)$  permet d'analyser plus précisément la variabilité spatiale du signal et de déterminer correctement les sources qui sont à l'origine de l'affaiblissement moyen du champ dans une zone étendue, ainsi que les variations locales du champ dues aux conditions qui règnent à l'emplacement de réception.

La méthode généralisée de Lee (voir l'Annexe 1) est une technique de référence destinée à calculer les valeurs moyennes locales du signal à long terme le long d'un trajet. La Figure 28 présente un exemple de variations spatiales instantanées et à long terme d'un signal; les mesures ont été effectuées en déplaçant un récepteur dans un environnement urbain. La variation à court terme correspond à la variation rapide autour des valeurs médianes locales.

FIGURE 28

**Variations spatiales à long terme du champ reçu en milieu urbain**

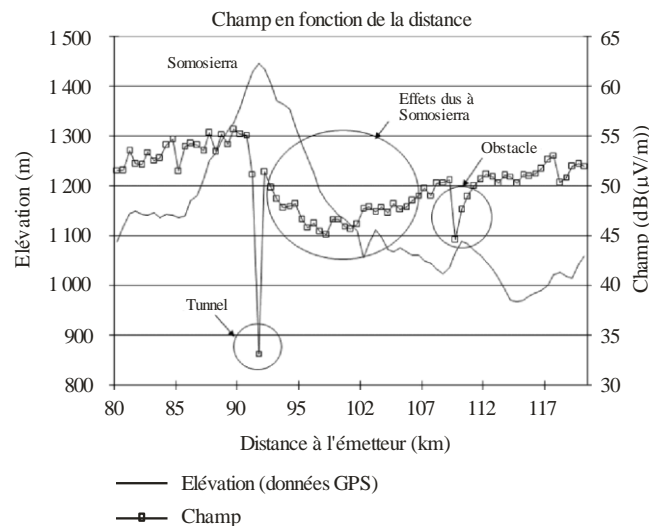
Ground Wave Prop. 28

**14 Relief irrégulier**

Si l'affaiblissement de l'onde de surface est essentiellement déterminé par les propriétés électriques du sol, les accidents du relief aussi sont à l'origine d'affaiblissements le long du trajet dans la bande des ondes hectométriques ([8], [57] et [58]). Ces affaiblissements du champ ne sont significatifs qu'en présence, à proximité de l'emplacement de réception, de grandes irrégularités du relief (grandes par rapport à la longueur d'onde) qui font obstacle au trajet émetteur-récepteur. Cela étant, s'il est vrai que les irrégularités situées à proximité du récepteur ont un effet prédominant, toutes les irrégularités marquées qui se trouvent sur l'ensemble du trajet ont en fait un effet notable sur l'affaiblissement total, cela d'autant plus que la pente du côté éloigné de l'irrégularité est accentuée [11]. Le champ diminue au niveau des sites de réception situés derrière ces obstacles. La variation du signal correspondante dépend de l'ampleur de l'obstruction due aux irrégularités du relief le long du profil du trajet; on peut la considérer comme un facteur d'affaiblissement supplémentaire et il convient de l'ajouter à la valeur moyenne de l'affaiblissement de la transmission le long du trajet.

FIGURE 29

Variations du champ en fonction de la distance à l'émetteur, enregistrées lors d'une campagne de mesures. Les valeurs d'élévation du terrain relevées par GPS sont indiquées.



Ground Wave Prop. 29

La Figure 29 montre un exemple de variations du champ lorsque le récepteur se déplace le long d'un itinéraire et que des irrégularités du relief font obstacle au trajet émetteur-récepteur. L'itinéraire, quasiment radial par rapport à l'émetteur, traverse la chaîne de montagnes de Somosierra (Espagne). Dans ce schéma figurent les valeurs mesurées 12 km avant et 28 km après le sommet de Somosierra, ainsi que les profils de hauteur correspondants. Près du sommet, un tunnel traverse la chaîne de montagnes, ce qui produit un évanouissement profond du signal. On observe un très net affaiblissement du champ sur le flan «occulté» de la montagne (plus de 10 dB en valeurs médianes).

Du côté «occulté» de l'obstacle, à mesure que le récepteur s'éloigne de l'émetteur, les valeurs de champ augmentent progressivement. Ce comportement du champ au voisinage des irrégularités du relief, en fonction de la distance à l'émetteur, a été expliqué par Ott [44], et antérieurement prévu par Wait [59], comme étant le résultat d'une interférence additive entre un rayon diffracté direct et un rayon diffracté se propageant le long de la surface.

Poursuivons notre analyse: la chute de signal suivante a été mesurée à une distance de 109,5 km; elle est due à un second obstacle, moins important, qui n'est pas très élevé (hauteur =  $\lambda/4$ , avec  $\lambda = 221$  m), mais qui se trouve à proximité immédiate du récepteur. La courte distance entre l'obstacle et l'emplacement du récepteur apparaît comme un paramètre très important. La pente du côté éloigné de l'irrégularité (vers le récepteur) est un facteur qui a une incidence majeure sur l'affaiblissement le long du trajet, affaiblissement qui a toutes les chances de se produire lorsque la distance irrégularité-récepteur est courte.

L'affaiblissement du champ dû à l'obstruction causée par un obstacle de taille significative dépend essentiellement de deux paramètres [67]:

- la distance  $d$  entre l'obstacle et l'emplacement du récepteur;
- la hauteur  $h$  de l'obstacle au-dessus de la ligne de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur.

Pour un emplacement du récepteur donné, avec obstacle, le champ décroît d'autant plus que l'obstacle est élevé et que la distance entre l'obstacle et le récepteur est courte. Ainsi, des valeurs d'affaiblissement significatives ont été observées pour des obstacles supérieurs à  $\lambda/2$ . Les obstacles de hauteur inférieure à  $\lambda/2$  qui se trouvent à proximité du récepteur aussi peuvent être à l'origine d'une diminution considérable du champ.

L'affaiblissement supplémentaire du champ dû à l'irrégularité du relief dans la bande des ondes hectométriques suit une loi logarithmique positive en fonction de la hauteur de l'obstacle,  $h$ , et une loi logarithmique négative en fonction de la distance,  $d$ , comme le montre l'équation ci-dessous.

$$L_{Irr}(dB) = (-17,2 \cdot \log_{10}(d) + 25,1) \cdot (\log_{10}(2,84 \cdot h)) \quad (44)$$

où:

$L_{Irr}$ : affaiblissement dû aux irrégularités du relief (dB)

$d$ : distance entre l'obstacle et le récepteur (km)

$h$ : hauteur de l'obstacle au-dessus de la ligne de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur (en nombre de longueurs d'onde).

L'affaiblissement dû aux irrégularités du relief ( $L_{Irr}$ ) doit être soustrait de la valeur du champ obtenue en appliquant les méthodes décrites dans les parties précédentes du Manuel. On veillera à ne pas prendre en compte les valeurs inférieures à 1 dans l'argument des logarithmes. Lorsque  $d$  est supérieur à 25 km et que les hauteurs de l'obstacle,  $h$ , sont inférieures à  $2\lambda$ ,  $L_{Irr}$  peut être négligé.

Si le profil du trajet contient plusieurs irrégularités significatives (par rapport à la longueur d'onde), seule la valeur maximale d'affaiblissement, due à l'obstacle le plus important, doit être prise en compte. Cette démarche est analogue à celle adoptée dans de nombreuses méthodes simples de calcul de l'affaiblissement dû à la diffraction par de multiples arêtes, comme celles d'Epstein-Peterson, de Deygout, de Bullington et de Giovanelli.

## 15 Effets locaux dans les zones bâties

Lorsqu'une onde de surface rencontre une zone bâtie, ses caractéristiques de propagation sont modifiées par la présence de grandes structures partiellement conductrices ou qui font obstacle à la propagation normale. Ces structures, de grande dimension, mais électriquement petites par rapport à la longueur d'onde, ont pour effet de réduire de façon importante le champ des signaux qui se trouvent dans leur environnement. Les variations locales ont une incidence sur la qualité du service au point qu'il peut être impossible d'atteindre les objectifs de couverture satisfaisante et de bonne réception, en particulier dans le cas des services de radiodiffusion numérique, dont la qualité peut se dégrader très rapidement jusqu'à l'extinction du signal. Ces phénomènes jouent un rôle dans la planification. Les responsables de la planification des systèmes ont donc absolument besoin de connaître les caractéristiques de ces variations locales afin de calculer l'augmentation de la puissance d'émission nécessaire pour compenser les différentes dégradations de la réception.

Les mesures réalisées dans des lieux dégagés, des zones et de larges rues en milieu urbain ont montré qu'il se produisait, outre une diminution importante du niveau moyen du signal de 5 dB environ (par rapport à un district rural situé à la même distance de l'émetteur), une augmentation de l'écart type du champ. L'écart type varie selon l'emplacement dans la ville: il s'échelonne de 1,7 à 5 dB, avec une moyenne  $\sigma = 3,5$  dB.

### 15.1 Mesures réalisées dans des zones à forte densité de construction

Des mesures de signaux, émis par des émetteurs ruraux, ont été effectuées à l'intérieur de cours entourées de bâtiments élevés, dans des zones urbaines à forte densité de construction. Les résultats font apparaître une diminution rapide du signal de 15 à 20 dB; cela étant, les mesures de ce type ne sont pas suffisamment nombreuses pour tirer des conclusions statistiquement significatives. On peut seulement estimer que l'écart type est au moins égal à 6-8 dB.

Les Figures 30 à 33 illustrent la variabilité du champ dans des zones bâties pour quatre fréquences. Les mesures ont été effectuées sur un itinéraire traversant la ville de Moscou et sa banlieue. Dans tous les cas, le niveau de signal relevé en milieu urbain varie de façon désordonnée. Aux fréquences basses, l'écart type de l'étalement du signal est compris entre 3 et 4 dB, tandis qu'aux fréquences élevées de la bande des ondes hectométriques, il varie de 7 à 10 dB (voir les Figures 32 et 33, dans lesquelles l'étalement des mesures effectuées dans la zone bâtie est matérialisé par une ligne en pointillé).

La Figure 34 montre des résultats analogues obtenus à Sao Paulo [60].

En pourcentage, la distance touchée par cette diminution locale en réception mobile dépend beaucoup de l'environnement de réception, surtout en milieu urbain. Des pourcentages allant de 10% (Madrid, Espagne) à 18% (Delhi, Inde) ont ainsi été observés en réception urbaine. Dans le cas de la réception mobile en milieu rural, les pourcentages peuvent être de 3% ou moins.

Pour déterminer les caractéristiques de la propagation en milieu urbain, il est nécessaire d'identifier et de quantifier les causes qui sont à l'origine des variations spatiales du champ à long terme et à court terme. A cet effet, il faut éliminer de l'analyse l'incidence de la distance à l'émetteur ainsi que les caractéristiques du profil d'élévation.

Une analyse approfondie a été menée à partir de données recueillies au cours de quatre campagnes de mesures visant à évaluer le système DRM (Digital Radio Mondiale) en réception mobile [61]. Ces campagnes, réalisées sur l'ensemble de la bande des ondes hectométriques (666, 810, 1 060 et 1 260 kHz), ont été réalisées dans différents environnements de réception urbains: Mexico (Mexique), New Delhi (Inde) et Madrid (Espagne). Ces villes, qui présentent des caractéristiques urbaines assez différentes, reflètent des types d'environnement urbain particulièrement intéressants. Pour assurer une analyse globale et représentative des effets urbains, 96 itinéraires aléatoires couvrant plus de 500 km ont été mesurés et analysés.



FIGURE 30

Variabilité du champ dans des zones bâties à 171 kHz

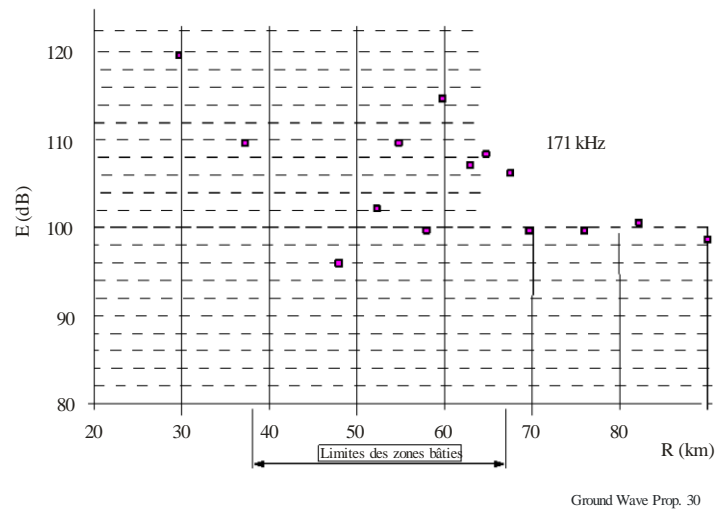


FIGURE 31

Variabilité du champ dans des zones bâties à 549 kHz

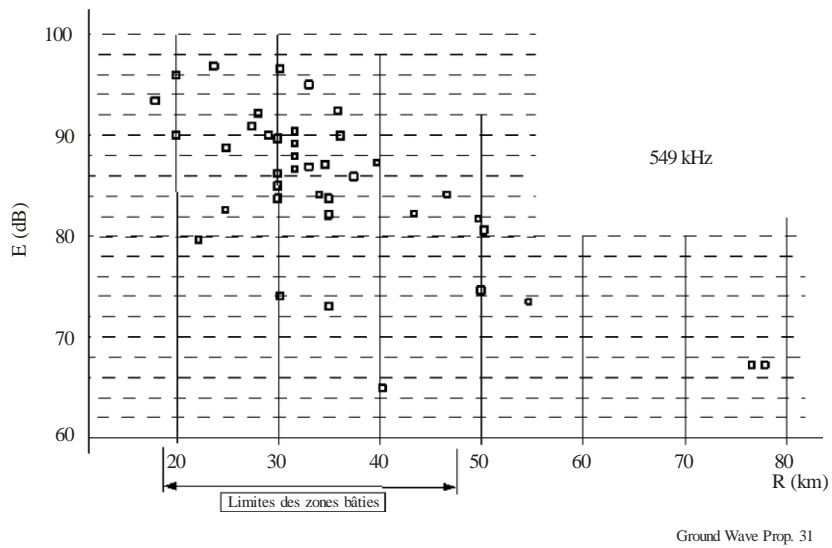
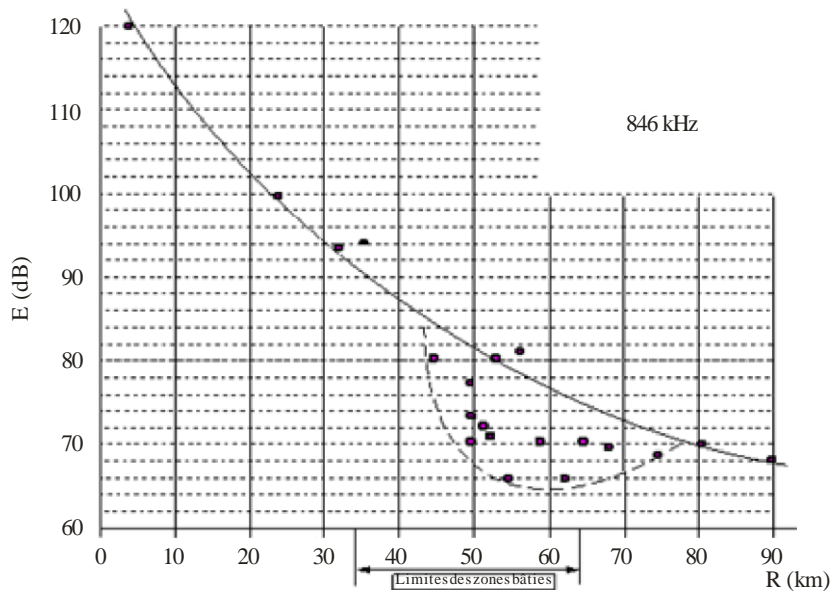


FIGURE 32

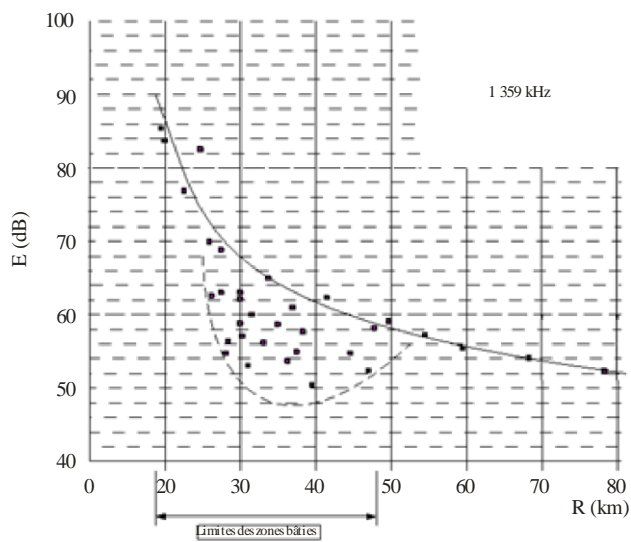
Variabilité du champ dans des zones bâties à 846 kHz



Ground Wave Prop. 32

FIGURE 33

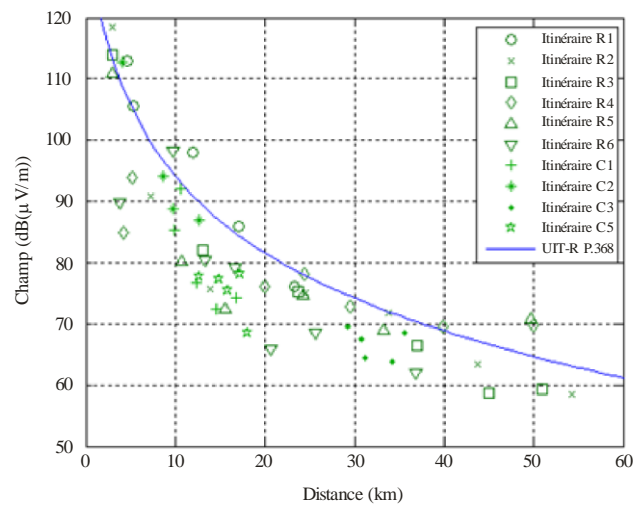
Variabilité du champ dans des zones bâties à 1 359 kHz



Ground Wave Prop. 33

FIGURE 34

Mesures effectuées à 1 210 kHz le long de 10 itinéraires à Sao Paulo, comparées avec les valeurs prévues par la Recommandation UIT-R P.368



Ground Wave Prop. 34

Des mesures ont aussi été réalisées en ondes décamétriques (voir les Figures 35 à 38). Dans chaque cas, la partie supérieure représente la variation du champ en fonction de la distance, tandis que la partie inférieure montre l'écart type des mesures. Malheureusement, dans la plupart des cas, les propriétés directionnelles de l'antenne n'étaient pas connues précisément et des corrections de gain ont été appliquées secteur par secteur.

A de courtes distances, entre 100 et 700 m environ, le champ varie quasiment comme l'inverse de la distance, alors qu'entre 700 m et 10 km, la relation de dépendance est très proche d'une loi quadratique inverse; à l'approche des limites de la ville (à 10-24 km de l'émetteur), la courbe de dépendance redevient moins accentuée.

FIGURE 35

Variation du champ en fonction de la distance à l'approche d'une ville, 14 MHz

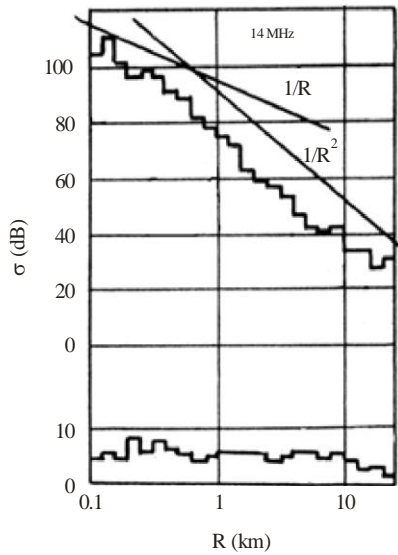
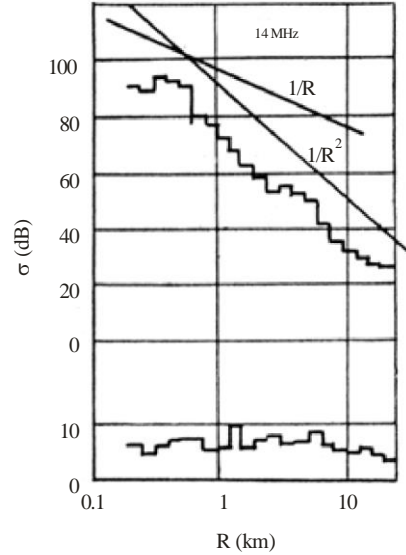


FIGURE 36

Variation du champ en fonction de la distance à l'approche d'une ville, 14 MHz



Ground Wave Prop. 35

FIGURE 37

Variation du champ en fonction de la distance à l'approche d'une ville, 7 MHz

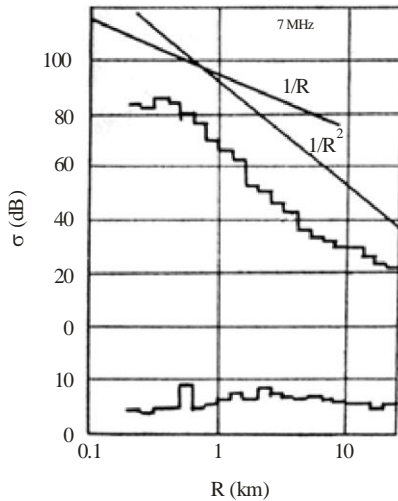
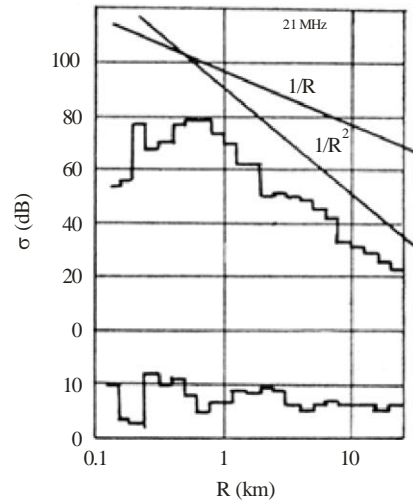


FIGURE 38

Variation du champ en fonction de la distance à l'approche d'une ville, 21 MHz



Ground Wave Prop. 37

## 15.2 Incidence de la fréquence d'émission en milieu urbain

Certains auteurs ont souligné le lien étroit entre la fréquence d'émission et les variations du champ dans les services de radiodiffusion en milieu urbain [62]; pourtant, cette question n'a pas fait l'objet d'une description empirique. Les Figures 28 et 30 à 33 montrent les différences, en décibels, entre les valeurs moyennes du champ relevées dans les mêmes conditions d'émission et de réception. Par exemple, pour deux fréquences d'émission différentes (810 kHz et 1 260 kHz), dans tous les cas, les valeurs du champ à 810 kHz sont supérieures à celles relevées à 1 260 kHz à chaque emplacement de réception.

On a calculé que les différences se situent entre 6 et 28 dB, le plus souvent entre 6 et 16 dB, selon les caractéristiques urbaines spécifiques des zones mesurées. Les cas où les différences sont supérieures à 20 dB correspondent à des sites de réception caractérisés par des bâtiments élevés.

### 15.3 Fortes variations du champ

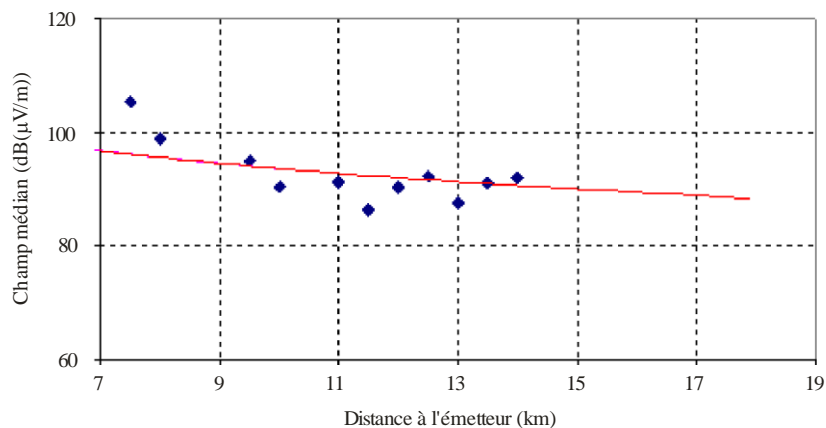
Les variations de la composante spatiale à long terme sont dues à des éléments urbains dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que la valeur optimale de la fenêtre de moyennage  $2L$  donnée par la méthode généralisée de Lee. D'après les résultats décrits dans un paragraphe précédent, la longueur de la fenêtre de moyennage dans le cas de la réception en milieu urbain correspond à la longueur d'onde; dans la bande de radiodiffusion en ondes hectométriques, elle est donc comprise entre 221 m (1 359 kHz) et 370 m (810 kHz).

On a constaté que les variations de grande échelle étaient essentiellement causées par les changements de la largeur des rues pendant la réception du signal ([63] et [64]). Pour quantifier les affaiblissements du champ dus à la réception en milieu urbain, un processus en trois étapes a été défini. Dans un premier temps, les résultats des essais sur le terrain ont été classés en fonction de la largeur des rues et les valeurs locales moyennes ont été calculées. Ensuite, les valeurs moyennes des rues les plus larges ont été comparées aux courbes de propagation figurant dans la Recommandation UIT-R P.368. Enfin, on a calculé les affaiblissements supplémentaires dus à la réception dans des rues étroites.

Les avenues comportant plus de huit voies ont été choisies comme référence pour quantifier les occurrences de variation à long terme. La Figure 39 illustre les valeurs médianes locales calculées à partir des résultats de mesure obtenus lors des essais sur le terrain menés à Madrid, à 1 260 kHz. On observe que les valeurs de champ relevées pour ce scénario sont proches des courbes de propagation théoriques figurant dans la Recommandation UIT-R P.368.

FIGURE 39

**Valeurs médianes du champ local moyen relevé dans des avenues, comparées aux courbes de la Recommandation UIT-R P.368**



Ground Wave Prop. 39

L'affaiblissement supplémentaire de la composante à long terme dus à la réception dans des rues étroites a été calculé. Le Tableau 4 présente les différences moyennes entre les scénarios de réception de référence (avenues contenant plus de huit voies) et la réception dans les rues plus étroites.

Les valeurs de l'affaiblissement supplémentaire ont été mises en relation avec le degré d'hétérogénéité de l'environnement urbain d'une part, et avec la fréquence d'émission d'autre part. Comme on peut le voir, la ville de Madrid, qui présente l'environnement le plus hétérogène, donne les valeurs d'affaiblissement les plus élevées; en outre, à 1 260 kHz, l'effet est quasiment deux fois plus important qu'à 810 kHz.

TABLEAU 4

Variation spatiale pour différents scénarios de réception  
par rapport aux courbes de la Recommandation UIT-R P.368

Ville – fréquence (kHz)	Rues de largeur moyenne moy ± écart type (dB)	Rues étroites moy ± écart type (dB)
Delhi – 666	4 ± 1	Non défini
Madrid – 810	6 ± 4	12 ± 6
Mexico – 1 060	3 ± 3	9 ± 5
Madrid – 1 260	11 ± 6	19 ± 8
Madrid – 1 359	Non disponible	Non disponible

## 16 Variation spatiale du champ à petite échelle

La présence de lignes électriques, de grands bâtiments ou de constructions métalliques peut être à l'origine d'une augmentation de la valeur du champ jusqu'à 10 dB par rapport à la valeur obtenue dans un environnement sans obstacle; à l'inverse, dans de rares cas, ce type d'infrastructures peut provoquer une réduction de 15 à 20 dB. Ce paradoxe peut s'expliquer par la disposition des différents éléments les uns par rapport aux autres: émetteur, constructions métalliques et récepteur de mesure.

On trouve dans le Tableau 5 des valeurs médianes empiriques de la profondeur des évanouissements occasionnels causés par la présence de grandes structures à proximité du récepteur. Ces mesures ont été réalisées au moyen d'une antenne verticale à champ électrique. Les variations du champ se produisent sur une certaine distance, ce qui constitue un évanouissement spatial; il s'agit de la distance sur laquelle la réception mobile est modifiée; vu d'un véhicule en mouvement, ce phénomène s'apparente à un évanouissement temporel.

TABLEAU 5

Profondeur d'évanouissement et longueur d'évanouissement des variations du champ

Structure	Largeur (m)	Profondeur d'évanouissement (dB)
Autoroute ou pont routier	18-24	23,1
	14-16	12,6
	10-12	9,8
	6-9	8,3
	Toutes	9,1 (valeur moyenne)
Passerelle	2-3	6,5
Portique de signalisation	–	5,1

## 17 Propagation à l'intérieur des bâtiments

Les signaux hertziens qui pénètrent dans des bâtiments et s'y propagent subissent des affaiblissements, qui ont une forte incidence sur la qualité de fonctionnement des systèmes radioélectriques. Ces affaiblissements font fréquemment l'objet d'une modélisation dans le but de calculer la valeur d'affaiblissement supplémentaire des niveaux des signaux extérieurs. Il faut aussi décrire la variabilité spatiale des signaux qui se propagent à l'intérieur des bâtiments afin de quantifier les variations des signaux autour de leur valeur médiane.

Pour caractériser la réception, aux heures du jour, de signaux hertziens à l'intérieur de bâtiments dans la bande des ondes hectométriques, on a recours à une grande base de données contenant des informations sur divers emplacements en intérieur dans plusieurs villes du nord de l'Espagne, pour six fréquences différentes (612, 639,

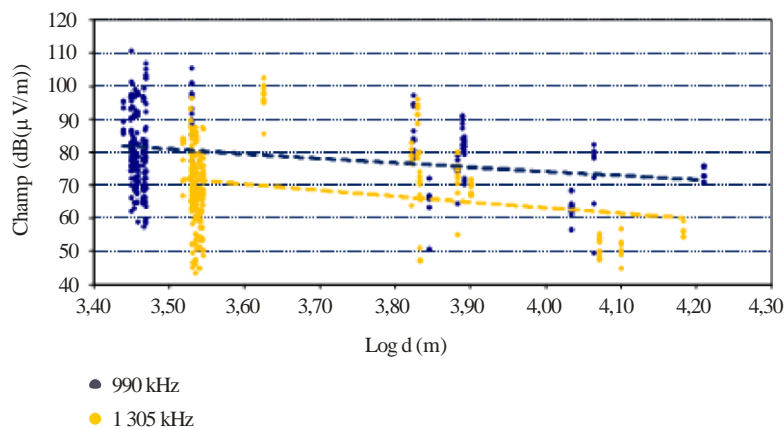
990, 1 197, 1 305 et 1 602 kHz) [65]. Des mesures ont été effectuées à l'intérieur de 21 bâtiments, en 360 emplacements au total. Pour quantifier les affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments, 110 mesures en extérieur ont également été réalisées le long du périmètre des bâtiments, cela pour chaque étage.

Les mesures sur le terrain ont été effectuées sur des émissions de radio commerciales existantes en modulation d'amplitude (MA). Cela étant, les résultats devraient être directement applicables aux systèmes numériques; en effet, des canaux BBGA (bruit blanc gaussien additif) ont été pris en compte pour la propagation de l'onde de sol en ondes hectométriques, pendant les heures du jour, sans dispersion temporelle ni fréquentielle, de sorte que la voie est censée être plate.

A l'instar de nombreux autres programmes de mesure menés en extérieur dans des bandes de fréquences plus élevées, on a observé une grande variabilité spatiale à l'intérieur des bâtiments, même pour des emplacements espacés de quelques mètres seulement. La Figure 40 montre, à titre d'exemple, les niveaux de champ médian obtenus en de nombreux emplacements à l'intérieur de différents bâtiments, en fonction de la distance, à 990 kHz et 1 305 kHz.

FIGURE 40

**Niveaux de champ médian mesurés en divers emplacements à l'intérieur de bâtiments à 990 et 1 305 kHz**



Ground Wave Prop. 40

On peut voir que la variabilité spatiale est importante, avec des différences atteignant 50 dB entre les emplacements de réception minimale et maximale à l'intérieur d'un même bâtiment. En fait, on a observé que le niveau de champ médian en intérieur, dans la bande des ondes hectométriques, suit une distribution log-normale d'écart type élevé, à savoir  $\sigma = 11,8$  dB.

On observe également que le niveau du champ à l'intérieur des bâtiments décroît avec la distance à l'émetteur et avec la fréquence d'émission. Les écarts types en temps étant inférieurs à 1 dB, on pourrait ne pas tenir compte de la variabilité temporelle.

Pour quantifier les affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments dans la bande des ondes hectométriques, on a calculé, pour chaque étage de deux bâtiments situés au nord de l'Espagne, la différence entre, d'une part, la valeur médiane du champ mesuré en plusieurs emplacements à l'extérieur du périmètre des bâtiments et, d'autre part, la valeur médiane du champ mesuré au niveau de tous les emplacements retenus à l'intérieur du bâtiment à la même hauteur.

Des mesures ont également été réalisées à Moscou, à l'intérieur de plusieurs bâtiments, dans une entrée et dans un ascenseur. Ces mesures font apparaître des affaiblissements supplémentaires du signal atteignant jusqu'à 8 dB et 20 dB, et, dans les cabines métalliques des ascenseurs, jusqu'à 40 dB [67].

La variabilité spatiale en extérieur et en intérieur étant très élevée, les affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments font apparaître de grandes différences selon les étages et les fréquences, sans qu'il en ressorte une tendance nette. En effectuant la moyenne (pour tous les étages et toutes les fréquences) des calculs de

l'affaiblissement dû à la pénétration dans les deux bâtiments de Madrid ayant fait l'objet de cette étude, on obtient respectivement 5,9 dB et 7,5 dB; il est donc proposé de prendre la valeur moyenne de 6,7 dB comme valeur de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments dans la bande des ondes hectométriques.

Les niveaux de signal à l'intérieur des bâtiments pourraient être calculés par soustraction: «valeurs de champ théoriques en extérieur – affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments». Toutefois, il est aujourd'hui proposé d'utiliser un autre modèle de prévision, de façon à prendre comme référence les niveaux de champ figurant dans la Recommandation UIT-R P.368 qui sont applicables à la propagation de l'onde de sol en l'absence d'obstacle.

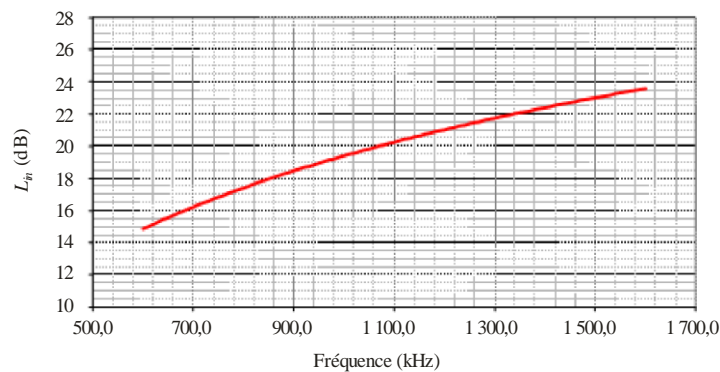
Pour chaque emplacement, on a calculé les affaiblissements à l'intérieur des bâtiments, qui viennent s'ajouter à ceux donnés par les courbes de propagation de l'onde de sol figurant dans la Recommandation UIT-R P.368. Des régressions linéaires ont ensuite été appliquées. On a ainsi obtenu la formule suivante, qui permet de prévoir les affaiblissements à l'intérieur des bâtiments en fonction de la fréquence, dans la bande des ondes hectométriques [66]:

$$L_{intérieure} (dB) = -42,1 + 20,5 \cdot \log(f (kHz)) \quad (45)$$

En appliquant cette formule, on prévoit que l'affaiblissement  $L_{intérieure}$  par rapport aux courbes de l'onde de sol figurant dans la Recommandation UIT-R P.368 est compris entre 15 dB à 600 kHz et 24 dB à 1 600 kHz environ, comme le montre la Figure 41 sous forme graphique.

FIGURE 41

**Affaiblissement à l'intérieur des bâtiments par rapport aux courbes de propagation de l'onde de sol figurant dans la Recommandation UIT R P.368**



Ground Wave Prop. 41

A des fins de validation, la formule de prévision de  $L_{intérieure}$  a été appliquée à quelques mesures de signaux DRM dans sept bâtiments de la ville de Madrid; on a ainsi constaté une erreur de prévision moyenne de 1,2 dB, ce qui est relativement faible.

Par conséquent, il est recommandé de calculer la valeur médiane du champ à l'intérieur des bâtiments, dépassée pour 50% des emplacements, en retranchant la valeur correspondante de  $L_{intérieure}$  de la valeur de champ figurant dans la Recommandation UIT-R P.368, soit:

$$E_{intérieure} (dB\mu V / m) = E_{UIT-R P.368} (dB\mu V / m) + 42,1 - 20,5 \cdot \log(f (kHz)) \quad (46)$$

Pour calculer les niveaux de champ médian à l'intérieur des bâtiments, dépassés pour d'autres pourcentages des emplacements, il convient d'appliquer la distribution log-normale en prenant pour écart type  $\sigma = 11,8$  dB.



## PARTIE 5

### 18 Méthodes de mesure

#### 18.1 Mesureur de champ

Les techniques de mesure de champ sont examinées dans la Recommandation UIT-R SM.378. On en trouve une description plus détaillée dans le Manuel UIT sur le contrôle du spectre. D'après cette Recommandation, toute mesure individuelle est associée à une incertitude, la précision de la mesure étant de  $\pm 2$  dB.

Il est préférable d'effectuer les mesures au moyen d'une antenne-cadre, car, dans les environnements imparfaits, les mesures du champ magnétique sont moins perturbées (voir le § 12). Le plus souvent, les instruments du commerce destinés à ce type de mesure sont étalonnés pour convertir le champ magnétique en champ électrique.

Ce principe ne s'applique pas lorsque les mesures sont destinées à évaluer, dans des environnements comportant des obstacles, la qualité de fonctionnement de systèmes de réception équipés d'antennes à champ électrique (autoradios par exemple).

Il convient d'attacher une attention particulière au choix de l'emplacement où seront réalisées les mesures: le meilleur emplacement est représentatif de l'environnement à l'étude et, dans la mesure du possible, dépourvu d'arbres, de structures conductrices verticales, de bâtiments et de câbles aériens. Pour remédier à la variabilité du champ à petite échelle, on pourra effectuer plusieurs mesures en des emplacements voisins et retenir la valeur médiane.

Dans le cas d'un instrument de mesure portable muni d'une antenne-cadre, le plus efficace sera éventuellement de faire pivoter l'antenne jusqu'à obtention d'un signal nul, puis de faire subir à l'antenne une rotation de  $90^\circ$  à partir de cette position pour obtenir le relevé maximal. On veillera à ce que le rapport valeur de crête/valeur minimale soit au moins égal à 20 dB, une valeur inférieure étant probablement le signe d'un problème concernant l'emplacement choisi pour la mesure. Aux emplacements les plus favorables, on pourra atteindre un rapport de 40 dB.

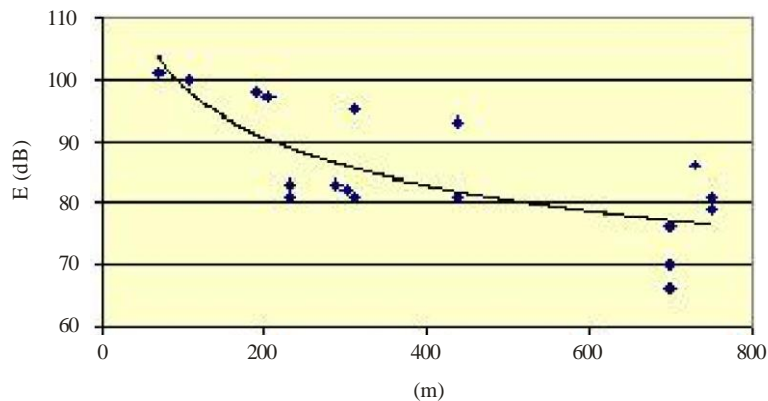
#### 18.2 Mesure de la puissance rayonnée

Le champ peut être mesuré à une distance légèrement supérieure à celle à laquelle les effets du champ proche peuvent se révéler importants, à 1 km environ de l'antenne d'émission. Comme il est difficile de trouver de bons emplacements dans les zones habitées, il conviendra de procéder à plusieurs mesures et d'en calculer la valeur médiane. Si ces emplacements ne sont pas situés à la même distance de l'émetteur, les mesures devront être corrigées conformément à la relation exprimant le champ en fonction de l'inverse de la distance. La mesure médiane sera ensuite comparée à la valeur 109,5 dB ( $1\mu\text{V}/\text{m}$ ) à 1 km (c'est-à-dire 300 mV/m à 1 km), qui correspond à la valeur pour une p.a.r.v. de 1 kW.

Dans les zones à forte densité de construction, l'effet d'écran dû aux bâtiments proches est relativement important. La Figure 42 fournit un exemple de mesures effectuées dans ces conditions, à 1 200 kHz, l'antenne d'émission étant placée entre deux bâtiments élevés. Ces mesures présentent un écart type de 6,6 dB [67].

FIGURE 42

**Exemple de mesures effectuées à proximité d'un émetteur  
dans une zone à forte densité de construction**



Ground Wave Prop. 42

### 18.3 Mesure de la conductivité équivalente du sol

#### 18.3.1 Méthode de l'affaiblissement

Une fois déterminée la puissance rayonnée, des mesures peuvent être effectuées à des distances croissantes par rapport à l'émetteur. Il convient ensuite de normaliser ces mesures par rapport à une p.a.r.v. de 1 kW et de comparer la tendance des résultats avec les courbes figurant dans la Recommandation UIT-R P.368 (ou avec celles tirées du programme GRWAVE) afin de déterminer la conductivité équivalente. Si la courbe fait apparaître une discontinuité nette, la méthode de Millington pourra être appliquée.

Compte tenu des variations locales affectant les mesures et des effets de la géologie sous-surfacique sur la propagation, il semble difficile d'appliquer cette technique pour déterminer les fluctuations de la conductivité équivalente à petite échelle.

DeMinco *et al.* [68] décrivent une méthode consistant à utiliser les mesures de propagation de l'onde de surface de Norton entre deux antennes unipolaires pour déterminer les caractéristiques du sol au niveau du site de mesure. Leur rapport contient les équations simplifiées de l'onde de surface de Norton. Les antennes utilisées, de type unipolaire, sont installées sur un plan de masse, les groupements d'antennes, dans leur totalité, étant situés directement sur le sol de sorte que seule l'onde de surface est émise. Des mesures ont été réalisées dans la bande de fréquences 30-915 MHz sur un site d'essai dans le but de déterminer la conductivité et la permittivité diélectrique.

#### 18.3.2 Méthode du coefficient de réflexion

Dans un rapport ultérieur, DeMinco [69] décrit une méthode permettant de déterminer les caractéristiques du sol, la Terre étant modélisée comme un empilement de couches. Cette méthode repose sur la mesure du coefficient de réflexion et sur une analyse multicouches. Les deux rapports fournissent les données de mesure ainsi que les équations et les graphiques relatifs à la profondeur de pénétration du champ électrique dans le sol et à ses effets sur la propagation de l'onde de sol.

En outre, le rapport [69] examine dans quelle mesure l'affaiblissement de propagation est sensible à la conductivité et à la constante diélectrique du sol. Dans ce cadre, une étude reposant sur le modèle de champ non perturbé de l'ITS (Institute for Telecommunication Sciences) [27] a été menée pour déterminer la relation entre, d'un côté, l'affaiblissement de propagation et, de l'autre, les fluctuations de la conductivité et de la permittivité relative. La hauteur des antennes d'émission et de réception a été fixée à zéro. L'analyse et les mesures ont porté sur des distances comprises entre 2 et 250 m et des fréquences comprises entre 30 et 915 MHz. A ces courtes distances et dans cette gamme de fréquences, il existe toujours une onde de surface importante, même à 915 MHz. Il est ressorti de cette étude que pour de faibles valeurs de la conductivité, l'affaiblissement dépend fortement de la valeur de la permittivité relative, tandis que pour des conductivités

plus élevées, cette dépendance est moindre, en particulier dans le cas des fréquences inférieures à 150 MHz. En outre, il est apparu qu'aux fréquences inférieures à 150 MHz environ, l'affaiblissement varie en fonction de la conductivité. Au-dessus de 150 MHz, la conductivité a un effet négligeable sur l'affaiblissement de propagation, tandis que l'effet de la permittivité relative est assez important.

### 18.3.3 Méthode de l'inclinaison de l'onde

La méthode de mesure de l'inclinaison de l'onde est difficile à mettre en oeuvre. Elle consiste à mesurer, au moyen d'une antenne tige convenablement installée, l'angle d'inclinaison vers l'avant,  $\alpha$ , du grand axe du vecteur champ électrique ainsi que le rapport,  $a$ , du petit axe au grand axe de l'ellipse. Selon Eaton, qui décrit cette méthode dans [70], les mesures doivent être effectuées avec une grande rigueur et le relief doit être uniforme et parfaitement plat.

## 19 Phase de l'onde de surface [71]

### 19.1 Introduction

La stabilité de la phase de l'onde de surface joue un rôle important dans certains systèmes de radionavigation.

Il est commode de définir la phase de l'onde de sol,  $\Phi$ , comme la somme d'une phase primaire et d'une phase secondaire,  $\Phi_s$ . A une distance,  $d$ , d'un émetteur, la phase de l'onde de sol peut être représentée par:

$$\Phi = nk d + \Phi_s$$

où  $n$  est la valeur, au voisinage du sol, de l'indice de réfraction de l'atmosphère et  $k = 2\pi/\lambda$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde en espace libre. Dans cette équation, la phase secondaire,  $\Phi_s$ , est exprimée en radians.

Toutefois, dans la plupart des applications, on l'exprime en microsecondes sous forme de temps de propagation de phase; on a, entre les deux, la relation:

$$t_s = \frac{\Phi_s \lambda}{2\pi \cdot 300} = \frac{\Phi_s \cdot 10^6}{2\pi f_{\text{Hz}}}$$

où:

- $t_s$ : temps de propagation de phase secondaire ( $\mu\text{s}$ )
- $\Phi_s$ : phase secondaire (rad)
- $\lambda$ : longueur d'onde (m)
- $f_{\text{Hz}}$ : fréquence (Hz).

### 19.2 Propagation au-dessus d'un terrain régulier et homogène

Le point de départ essentiel du calcul de la phase secondaire est la théorie de la propagation de l'onde de sol au-dessus d'une Terre régulière et homogène [72], conjuguée à des méthodes identiques à celles qui ont servi à calculer l'amplitude de l'onde de sol. Pour permettre l'application de cette méthode fondamentale à des cas plus généraux, il est utile d'exprimer les résultats des calculs sous la forme d'une impédance de surface générale [73].

### 19.3 Perturbations de la phase secondaire

Aux fréquences inférieures à 3 MHz environ, on peut utiliser la théorie de la Terre régulière et homogène pour calculer la phase de l'onde de sol avec la précision exigée pour les systèmes de navigation, notamment sur des trajets maritimes caractérisés, dans certains cas, par la présence de grosses vagues. Sur les trajets terrestres en revanche, la phase secondaire est modifiée par les variations des caractéristiques électriques le long du trajet, par les irrégularités du terrain et par les couches au-dessous de la surface du sol [74]. Diverses méthodes ont été mises au point pour la prévision de la perturbation de la phase secondaire due à ces facteurs [75].

#### 19.4 Trajets non homogènes

Lorsque les caractéristiques électriques ou l'impédance du sol le long d'un trajet varient, par exemple, à la limite entre la terre et la mer, on observe une variation brusque de l'amplitude et de la phase de l'onde de sol. Dans ce cas, la phase peut être calculée au moyen de la méthode de Millington-Pressey [76]. Cette méthode est tout à fait analogue à celle imaginée par Millington pour calculer l'amplitude de l'onde de sol sur des trajets non homogènes. La phase d'un signal d'onde de sol pour un trajet à deux sections peut se calculer à partir de la méthode de Millington, à condition de remplacer les amplitudes des formules par les phases correspondantes applicables à une Terre homogène.

Lorsque les caractéristiques électriques du sol diffèrent selon la direction, le front de l'onde se courbe vers la zone de conductivité la plus faible. Ce phénomène peut être une source de difficultés dans les systèmes de radiogoniométrie.

#### 19.5 Irrégularités du terrain

Lorsque le terrain est très irrégulier, il est plus efficace d'utiliser la méthode de l'équation intégrale pour calculer la phase de l'onde de sol et obtenir la précision que nécessitent les applications de navigation.

Une comparaison des méthodes de calcul et des mesures expérimentales [59] est présentée à la Figure 43. Le trajet indiqué traverse la Vallée de la mort (Californie), située à 100 m au-dessous du niveau de la mer, ainsi que la chaîne de montagnes de la Sierra Nevada. Les points mesurés sont représentés par le symbole (I). La courbe en trait plein a été calculée au moyen de la méthode faisant appel à l'équation intégrale. La courbe en tirets a été calculée au moyen de la méthode de Millington-Pressey en prenant un modèle d'impédance équivalente pour une Terre lisse à deux couches.

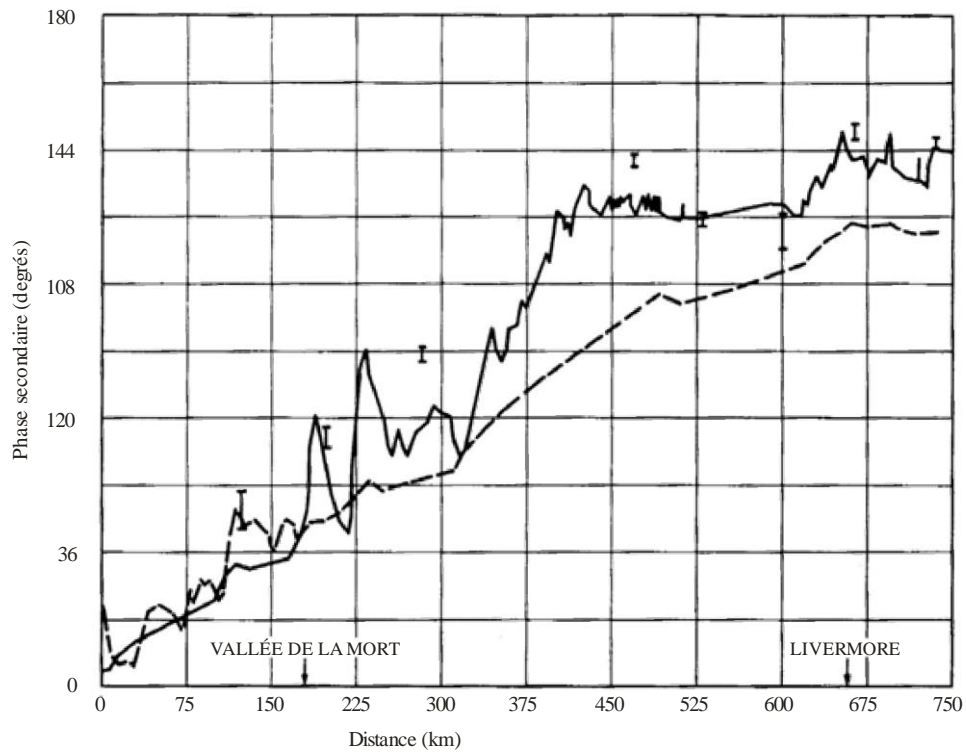
A 100 kHz, une phase secondaire de  $36^\circ$  correspond à  $1 \mu\text{s}$  (voir le § 19.1 ci-dessus).

#### 19.6 Effets météorologiques

Plusieurs travaux portant sur la stabilité des signaux du système Loran-C ont révélé l'existence de variations de phase correspondant à des variations de l'instant d'arrivée atteignant  $\pm 0,5 \mu\text{s}$  ([77] et [78]). Ces variations présentent une caractéristique diurne et une caractéristique à long terme et sont en corrélation avec les variations du gradient du terme «sec» de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Les variations à long terme sont associées au passage d'un front météorologique le long du trajet mesuré.

FIGURE 43

Comparaison de la phase mesurée et de la phase calculée pour le système Loran-C sur la côte ouest des Etats-Unis d'Amérique



## ANNEXE 1

### La méthode de Lee généralisée

La méthode de Lee ([79], [80]) est une technique de référence qui sert à déterminer les valeurs moyennes locales de la composante à long terme de la variabilité du signal. Cette méthode est décrite dans la Recommandation UIT-R SM.1708 et dans un rapport de la CEPT [81].

Les valeurs moyennes locales sont calculées en appliquant une moyenne glissante à une série de mesures instantanées du champ,  $r(x)$ . Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer les valeurs appropriées de trois paramètres:

- la fenêtre d'intégration  $2L$  ou distance à prendre en compte autour du point  $x$  (point où la valeur moyenne du champ est calculée);
- le nombre minimal d'échantillons indépendants,  $N$ , dans chaque intervalle  $2L$  qui est nécessaire au calcul de la moyenne locale pour obtenir un niveau de confiance donné;
- une distance minimale,  $d$ , entre deux échantillons consécutifs garantissant que les échantillons ne sont pas corrélés.

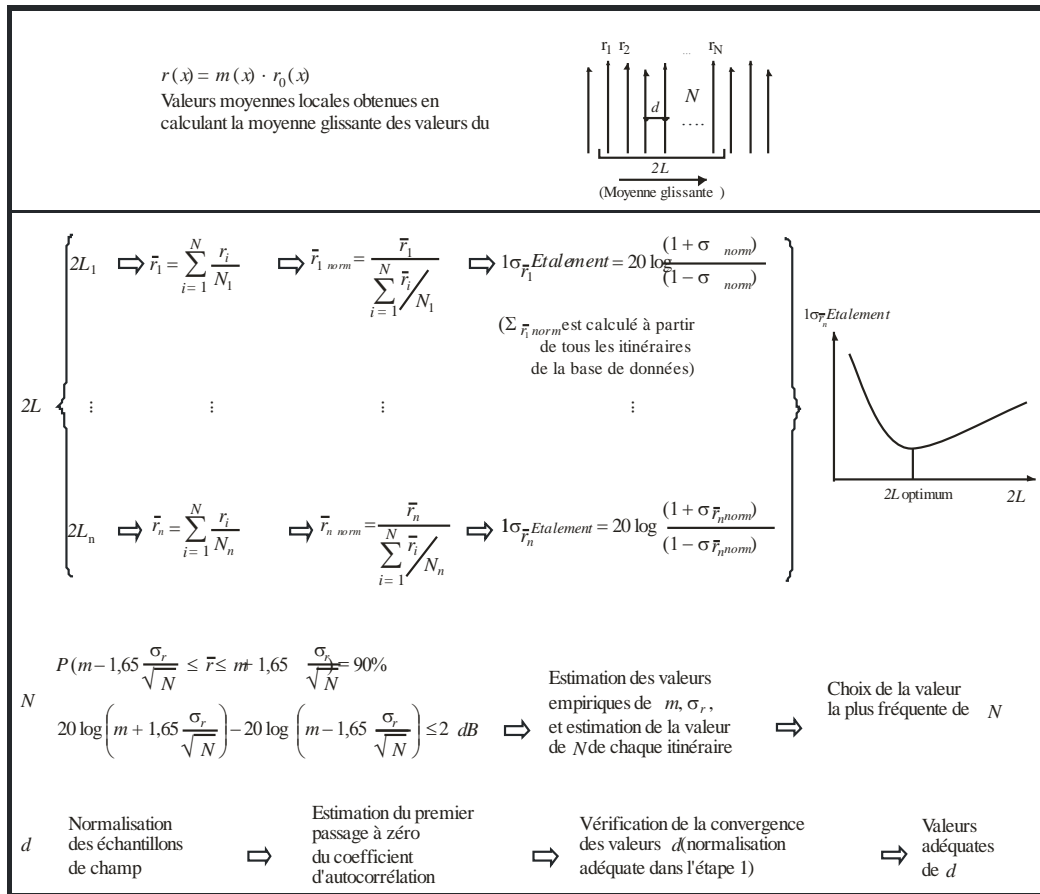
Les moyennes locales sont évaluées en calculant la moyenne, dans une fenêtre d'intégration  $2L$ , d'un nombre minimal de  $N$  échantillons non corrélés, deux échantillons consécutifs étant séparés d'une distance  $d$ .

Lee ([79], [80], [82]) et, ultérieurement, Parsons [83] ont calculé, de façon théorique, les valeurs adéquates de ces paramètres dans le cas d'un canal de propagation de Rayleigh et des ondes décimétriques (avec quelques mentions particulières pour les ondes métriques [80]). A noter toutefois que ni les valeurs obtenues ni la méthode ayant permis de les calculer ne peuvent être généralisées à d'autres conditions de réception.

Une méthode appelée «méthode de Lee généralisée» a donc été conçue [84] pour déterminer la valeur de ces paramètres quelles que soient les conditions de réception (bande de fréquences, environnement de réception et facteurs de propagation). Cette méthode est résumée à la Figure A1.

FIGURE A1

Résumé de la méthode de Lee généralisée



Ground Wave Prop. A1

Valeurs des paramètres de la méthode pour la bande des ondes hectométriques

Pour appliquer la méthode de Lee généralisée, il convient de bien choisir les valeurs des paramètres susmentionnés ( $2L$ ,  $N$  et  $d$ ) pour la bande de fréquences et l'environnement de réception à l'étude. Plusieurs campagnes de mesures ([85], [86]) ont permis de déterminer les valeurs de ces paramètres dans le cas de signaux reçus dans la bande des ondes hectométriques ([72], [87], [88] et [89]). Le Tableau A1 récapitule les résultats obtenus pour trois types d'environnement: rural, urbain et suburbain.

TABLEAU A1

Valeurs de référence des paramètres de la méthode de Lee généralisée pour la bande des ondes hectométriques et différents environnements de réception

Paramètre	Environnement de réception		
	Rural	Rural	Rural
$2L$	$0,9\lambda - 2,1\lambda$	$0,9\lambda - 2,1\lambda$	$\lambda$
$d$	$0,17\lambda$	$0,14\lambda - 0,16\lambda$	$0,05\lambda$
$N^{(1)}$	8	11	20

<sup>(1)</sup> Les valeurs de  $N$  ont été obtenues pour une erreur maximale de 1 dB par rapport à la moyenne réelle et un niveau de confiance de 90%.

Dans tous les cas, il est possible de prendre un nombre minimal d'échantillons,  $N$ , dans la fenêtre d'intégration  $2L$  en respectant la contrainte relative à la distance  $d$  séparant deux échantillons non corrélés ( $N \cdot d \leq 2L$ ). L'utilisation de ces valeurs garantit que le calcul de la moyenne des variations locales du champ est correct.

## 20 Références bibliographiques

- [1] Sommerfeld, A.: 'The propagation of waves in wireless telegraphy', *Ann. Phys.*, 1909, 28, p.665.
- [2] Norton, K.A.: 'The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 1', *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1936, 24. pp. 1367-1387.
- [3] Norton, K.A.: 'The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 2', *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1937, 25. pp. 1203-1236.
- [4] Van Der Pol, B., and Bremmer, H.: 'The diffraction of electromagnetic waves from an electrical point source round a finitely conducting sphere', *Philos. Mag. Ser. 7*, 1937, 24, pp. 141-176 and pp. 825-864; 1938, 25, pp. 817-834; and 1939, 26, pp. 261-275.
- [5] Norton, K. A.: 'The calculation of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical Earth', *Proc. Inst. Radio Eng.*, 1941, 29, pp. 623-639.
- [6] Millington, G., 1949, 'Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth', *Proc. IEE*, 96, 53.
- [7] Hufford, G.A. 1952, «An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface', *Quart. Appl. Math*, 9, 391.
- [8] Ott, R.H., and L.A. Berry, 1970, 'An alternative integral equation for propagation over irregular terrain', *Radio Sci.*, Part 1, 5(5), pp. 767-771.
- [9] Hill D.A. «Ground-wave propagation over Forested and Built-up Terrain» NTIA Report 82-114, Dec 1982.
- [10] DeMinco, N. «Automated Performance Analysis for Ground-Wave Communication Systems,» NTIA-Report 86-209, Dec. 1986.
- [11] DeMinco, N «Ground-Wave Analysis Model for MF Broadcast Systems,» NTIA-Report 86-203, Sept. 1986.
- [12] Kissick, W.A., *et al.*, «Measurements of LF and MF Radio Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain,» NTIA-Report 78-12, Nov. 1978.
- [13] Hoffman J. R., *et al.*, «DGPS Field Strength Measurements at a GWEN Site,» NTIA-Report 98-346, April 1998.
- [14] Ott, R. H. *et al.*, «Ground Wave Propagation Over Irregular, Inhomogeneous Terrain: Comparisons of Calculations and Measurements,» NTIA Report 79-20, May 1979.
- [15] Adams, J. E., *et al.*, «Measurements and Predictions of HF Ground Wave Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain, »NTIA-Report 84-151, July 1984.
- [16] DeMinco, N, «Medium Frequency Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling for Intelligent Transportation Systems (ITS) Broadcast Applications,» NTIA-Report 99-368, Aug. 1999.
- [17] DeMinco, N, «Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling (150 to 1705 kHz) for Intelligent Transportation Systems (ITS), *IEEE AP Magazine*, AP Vol. 42, No. 4, Aug. 2000, pp. 9-34.
- [18] Rotheram, A.S.: 'Ground-wave propagation. Part 1 Theory for short distances', *IEE Proc. F*, 1981, 128, pp. 275-284.
- [19] Rotheram, A.S.: 'Ground-wave propagation. Part 2 Theory for medium and long distances and reference propagation curves', *IEE Proc. F*, 1918, 128, pp. 285-295.
- [20] Rotheram, A.S.: 'Ground-wave propagation', *Marconi Rev.*, 1982, 45, (1), pp. 18-48.
- [21] Causebrook, J.H., 1977, 'Groundwave propagation at medium frequency in built-up areas'. BBC Engineering Research Department Report RD 1977/25.



- [22] Causebrook, J.H., 1978, 'Medium-wave propagation in built-up areas', Proc. IEE, Vol. 125, 9, pp. 804-808.
- [23] Bremmer, H.: 'Terrestrial Radio Waves' Elsevier, 1949.
- [24] Picquenard, A. «Radio Wave Propagation», New York: John Wiley and Sons, 1974, p. 80.
- [25] Craig K.H. «Clear Air Characteristics of the Troposphere», in «Propagation of radio waves» 2<sup>nd</sup> ed, ed Barclay L W, 2003 ISBN 0 85296 102 2, Chapter 7.
- [26] «Ground wave propagation in an exponential atmosphere», CCIR Report 714-2, 1990.
- [27] DeMinco, N «Propagation Loss Prediction Considerations for Close-In Distances and Low Antenna Height Applications,» NTIA-Report TR-07-449, July 2007.
- [28] Кашпровский В.Е., Кузубов Ф.А., «Распространение средних радиоволн земным лучом» (Kashprovsky V.E., Kuzubov F.A., «Propagation of medium waves by terrestrial ray»), «Svyaz», 1971, 220 pages.
- [29] Feinberg, E.L., «Propagation of radiowaves along a terrestrial surface» Iss AS USSR M 1961, p.546.
- [30] Millington G, 1949, Nature 163 p. 128.
- [31] Millington G. and Isted G.A. 1950 «Ground-wave propagation over an inhomogeneous Earth, Part 2 Experimental evidence and practical implications», Proc. IEE, 97, 209.
- [32] Hoffman, J.R., *et al.*, «Field Strength Measurements of DGPS and FAA Beacons in the 285 to 315 kHz Band», NTIA-Report 97-337, June 1997.
- [33] Damboldt Th. 1981 «HF ground-wave field strength measurements on mixed land-sea paths», IEE 2<sup>nd</sup> Int Conf Antennas and Propagation, Heslington, York, UK; IEE Conf Proc No. 195.
- [34] Barrick, D.E., (1971a), «Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, The Effective Surface Impedance For A Slightly Rough Highly Conducting Medium At Grazing Incidence», Rad. Sci, V6, pp 517-526.
- [35] Barrick, D.E., (1971b), «2. Application to HF and VHF propagation over the sea», Rad. Sci., V6 pp 527-533.
- [36] Phillips, O.M. (1957): «On the generation of surface waves by turbulent wind», J. Fluid Mech., Vol.2, pp. 417-445.
- [37] Furutsu, K. Radio Science vol 17 pp 1037-1050, 1982.
- [38] J.M. Pielou, J.D. Milsom and R N Herring «HF ground wave propagation from a cliff top site» IEE Conf ICAP87, p103, 1987
- [39] Chernov Yu. A., Zhiltsov A.U. «The Statistical characteristics of a terrestrial wave in a range LF-MF», «Radiotekhnika», 1997, № 2, PP. 41-45.
- [40] Stratton G.A., «The Theory of electromagnetism», «Gostekhizdat», 1948.
- [41] Chernov Yu. A. «Distribution of average radiowaves in urban environment», Trudy NIIR, 2004, PP. 131-136.
- [42] Buchatskaja G.B. «An experimental research of distribution of a field HF-waves in city for a transmitter, located within the limits of this city», Trudy NIIR, 1989, № 4, PP. 14-19.
- [43] Bown, R. Martin, D.K. and Potter, R.K. «Some Studies in Radio Broadcast Transmission» 1924, Proc IRE V12 pp. 57-131.
- [44] Bown, R and Gillett, G.D., «Distribution of radio Waves From Broadcasting Stations Over City Districts» 1924, Proc IRE V12 pp. 395-409.
- [45] Barfield, R.H. and Munro, G.H. «The Attenuation of Wireless waves Over Towns», 1929, Proc IEE, V67, pp. 253-270.
- [45] Naismith, R. «Field Strength Measurements on Daventry 5XX», 1931, Proc IEE V69 pp. 881-890.
- [47] Causebrook, J.H «Medium-wave propagation in built-up areas», 1978, Proc. IEE, V125, pp. 804-808.

- [48] Luo Lichen, «A New MF and HF Ground-wave Model for Urban Areas», 2000, IEEE Antennas and Prop. Mag, V42, pp. 21-32.
- [49] Gracely, F.R. « Temperature Variations of Ground-Wave Signal Intensity at Standard Broadcast Frequencies », Proc. I.R.E., April, 1949, pp. 360-363.
- [50] Gerber W. and A. Werthmüller, Ueber die vegetabile Absorption der Bodenwelle, Techn. Mitt.T.T., Sw., 1945, №1, 12-19.
- [51] Chernov Yu. A. «Seasonal changes of a field intensity of a ground wave in day time in LF and MF bands» Trudy NIIR, 2005, pp. 109-115.
- [52] Захаренко В.Н., «Влияние вариаций электропроводности подстилающей поверхности на амплитуду напряженности земной волны диапазонов СВ и ДВ», Электросвязь, 1992, №1, pp. 34-35. [V.N. Zakharenko, «Influence of variations in electroconductivity of a ground surface on amplitude of intensity of a ground wave signal in the MF and LF bands», Elektrosvyaz, 1992, №1, pp. 34-35.
- [53] Recommendation ITU-R P.1321-3.
- [54] Чернов, Ю.А, Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность. *Часть 2. Длинные и средние волны. Темное время суток*, Электросвязь, 2012, №2. (Yu. Chernov, Digital broadcasting up to 30 MHz: illusions and reality. Part 2. LW and MW. Dark time of day, Elektrosvyaz, 2012, № 2.).
- [55] Causebrook J H and Tait B, 1979, «Ground Wave propagation in a realistic terrain» BBC Research Dept Report RD 1979/19.
- [56] ERC Recommendation (00)08, 2000, «Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations» <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>.
- [57] Ott, R.H. 1971, «An alternative integral equation for propagation over irregular terrain», Radio Sci., Part 2, 6 (4), pp. 429-435.
- [58] de la Vega, D *et al.*, «Analysis of the Attenuation Caused by Orography Influence in the Medium Wave Band», 2007 IEEE 65<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference - VTC2007.
- [59] Wait J R 1962, «Electromagnetic Waves in Stratified Media,» Oxford, Pergamon.
- [60] Almeida, M.P.C.; David, R.P.; Souza, R.S.L.; Castellanos, P.V.G. ; Cal Braz, J.A.; Lima, M.V.; Lima, F.F.; Silva Mello, L.A.R.; «Medium wave DRM field trials in Brazil - some daytime and night-time results in urban environment», Measurement (London. Print), v. 45, p. 1-9, 2012.
- [61] Report ITU-R BS.2144. «Planning parameters and coverage for Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting at frequencies below 30 MHz», May 2009.
- [62] Causebrook, J.H., 1977, «Ground Wave Propagation at Medium Frequency in Built-up Areas» BBC Research Dept Report 1977/25.
- [63] Gil, U, *et al.*, 2009, «Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments», 3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation 2009.
- [64] Gil, U, *et al.*, 2010, «Empirical Analysis of Medium Wave Field Strength Prediction in Urban Environments», IEEE Int Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Shanghai 2010.
- [65] Fernandez, I, *et al.*, 2011, «Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio» IEEE Trans Broadcasting.
- [66] Fernandez, I, *et al.*, 2011, «Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio» IEEE Trans Broadcasting.
- [67] Chernov Yu, «Distribution of terrestrial wave signal levels in a service zone at medium frequencies» Trans NIIR, 2006, pp. 81-90.
- [68] DeMinco, N., *et al.*, «Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Surface Wave Propagation Between Two Monopole Antennas,» NTIA-Report TR-12-484, January 2012.
- [69] DeMinco, N., *et al.*, «Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Measured Reflection Coefficient at Normal Incidence and Multilayer Analysis,» NTIA-Report TR-13-494, February 2013.

- [70] Eaton J L 1976 «The wave tilt method of measuring electrical ground constants in the lf and mf bands» BBC Research Report RD 1976/15. [www.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1976-15.pdf](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1976-15.pdf).
- [71] CCIR Report 716-3, 1990.
- [72] Johler, J.R., Kellar, W.J. and Walters, L. C. 1956, «Phase of the low radio-frequency ground wave». NBS Circular 573, <http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2302.pdf>.
- [73] Hill, D.A. and Wait, J. R., 1980, «Ground-wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance». *Radio Sci.* Vol. 15, 3.
- [74] Johler, J.R. and Horowitz, S. 1974 «Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground». Paper 28, AGARD Conf. Proc. No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media, ed A. N. Ince. NTIS Accession Number AD A008583, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, USA.
- [75] Samaddar, S.N. 1979, «The theory of Loran-C ground-wave propagation - A review». *Navigation*, Vol. 26, 3.
- [76] Pressey, B.G., Ashwell, G.E. and Fowler, C.S. 1953, «The measurements of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path». *Proc. IEE*, 100, Pt. III.
- [77] Doherty, R.H. and Johler, J. R. 1975, «Meteorological influences on Loran-C ground-wave propagation». *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, pp. 1117-1124.
- [78] Samaddar, S. N. 1980 «Weather effects on Loran-C propagation». *Navigation*, Vol. 27, 1.
- [79] Lee, W C Y, 1986, «Mobile Communications Design Fundamentals», Howard W. Sams and Co.
- [80] Lee, W C Y, 1985, «Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal», *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. VT-34, N° 1.
- [81] ERC Recommendation (00)08, 2000, «Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations» <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>.
- [82] Lee, W C Y, 1982, «Mobile Communications Engineering», Ed. McGraw-Hill Book Company.
- [83] J. D. Parsons, 2000, «The Mobile Radio Propagation Channel», 2<sup>nd</sup>. Ed, John Wiley & Sons Ltd, 2000, ISBN 0 471 98857 X.
- [84] de la Vega, D, *et al.*, 2009 «Generalization of the Lee Method for the Analysis of Signal Variability», *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. 58, N° 2, pp. 506-516.
- [85] Gil, U, *et al.* 2008, «DRM Field Trials for Urban Coverage in Spain», *EBU Technical Review 2008-Q2*.
- [86] Gil, U, *et al.* 2008, «DRM 20 kHz Simulcast Field Trials in the Medium Wave Band in Mexico D.F.» *IEEE Trans Broadcasting*, Vol. 54, N° 1, pp. 58-61.
- [87] de la Vega, D, *et al.*, 2008, «Evaluation of the Lee Method for the Analysis of the Long-Term and Short-Term Variations in the Digital Broadcasting Services in the MW Band», *IEEE Int Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Las Vegas, USA, March 2008.
- [88] de la Vega, D, *et al.*, 2008, «Empirical Analysis of the Sample Correlation for the Planning of Field Trials in the Digital Broadcasting Services at MF Band,» *Proc IEEE Int Instrumentation and Measurement Technology Conference - I<sup>2</sup>MTC 2008*, pp. 2201-2204, Victoria BC, Canada, May 2008.
- [89] Gil, U, *et al.*, 2010, «Statistical Characterization of the Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments Using the Generalized Lee Method» *Proc. 4<sup>th</sup> European Conf on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, April 2010.
-





Union internationale des télécommunications  
Division des ventes et du marketing  
Place des Nations  
CH-1211 Genève 20  
Suisse  
Fax: +41 22 730 5194  
Tél.: +41 22 730 6141  
E-mail: [sales@itu.int](mailto:sales@itu.int)  
Web: [www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)

ISBN 978-92-61-14642-9      SAP id  
3 8 9 8 1



9 7 8 9 2 6 1 1 4 6 4 2 9

Imprimé en Suisse  
Genève, 2015

Crédits photos: Shutterstock