

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.1406-2
(07/2015)

**Effets de la propagation relatifs au service
mobile terrestre de Terre et au service de
radiodiffusion dans les bandes d'ondes
métriques et décimétriques**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2016

© UIT 2016

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

RECOMMANDATION UIT-R P.1406-2

**Effets de la propagation relatifs au service mobile terrestre de Terre
et au service de radiodiffusion dans les bandes
d'ondes métriques et décimétriques**

(Question UIT-R 203/3)

(1999-2007-2015)

Domaine d'application

La présente Recommandation donne des informations sur divers aspects de la propagation susceptibles d'influer sur le service mobile terrestre de Terre et le service de radiodiffusion. Il convient de tenir compte de ces aspects pour la conception et la planification desdits services.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

a) qu'il est nécessaire de disposer d'informations sur les aspects de la propagation susceptibles d'influer sur le service mobile terrestre de Terre et le service de radiodiffusion,

notant

a) que la Recommandation UIT-R P.2040 fournit des orientations sur les effets des propriétés des matériaux de construction et des structures sur la propagation des ondes radioélectriques,

recommande

1 de tenir compte des informations contenues dans l'Annexe 1 pour la conception et la planification de ces services.

Annexe 1**1 Introduction**

La présente Recommandation donne des informations sur divers aspects de la propagation susceptibles d'influer sur le service mobile terrestre de Terre et le service de radiodiffusion. Il faudrait tenir compte de ces aspects pour la conception et la planification de ces services.

2 Affaiblissement dû à la couverture du sol

Ces affaiblissements risquent d'être très importants pour le service mobile terrestre. Ils dépendent de la nature du terrain, de l'étendue de la végétation ainsi que de l'emplacement, de la densité et de la hauteur des bâtiments. Le Tableau 1 résume l'applicabilité des diverses Recommandations UIT-R disponibles:

TABLEAU 1

Recommandations traitant de la couverture du sol

UIT-R P.	Applicabilité
1546	Corrections liées à la hauteur des antennes
452	Affaiblissements dus à des groupes d'obstacles
833	Affaiblissement dû à la végétation (notamment aux arbres)
1058	Bases de données topographiques
1146	Corrections liées à la hauteur des antennes
1812	Affaiblissements dus à la végétation et à des groupes d'obstacles
1238	Planification des système de radiocommunication en intérieur
2040	Effets des matériaux de construction et des structures

3 Variabilité de l'intensité du signal**3.1 Généralités**

L'intensité du signal reçu varie en fonction du temps et de l'emplacement. Le signal peut être constitué de composantes directe, diffractée, réfléchi et réfractée. La qualité de la réception dépend de plusieurs facteurs (environnement de réception, décalages de fréquence, retards, type de modulation, etc.). En outre, des signaux brouilleurs peuvent aussi être reçus en provenance d'autres sources utilisant en partage les mêmes fréquences que le signal utile ou utilisant des fréquences adjacentes. Il faut aussi tenir compte de ces signaux brouilleurs pour évaluer la qualité de service. La distance entre les émetteurs de ces signaux brouilleurs et le récepteur considéré peut être telle qu'il faille quantifier la variation temporelle créée par les diverses formes de propagation anormale. Il est alors possible de se trouver dans une situation où il faut accepter un certain risque de brouillage pendant un pourcentage de temps défini en divers emplacements de réception pour que le ou les réseaux puissent fonctionner.

En résumé, pour évaluer la qualité de réception et définir la zone de couverture du service, il faut analyser le signal utile et les signaux brouilleurs en fonction du temps et de l'emplacement et déterminer leur corrélation.

3.2 Modes d'évanouissements

Lorsque le récepteur est masqué par des arbres, des bâtiments ou par des obstacles de terrain ou encore par d'autres objets, il y a réduction de l'intensité du signal. Dans ce cas, avant son arrivée au récepteur, le signal a été diffracté sur ou autour de ces obstacles ou a été réfléchi sur d'autres objets. Si la taille et la forme des obstacles sont connues, on peut tenter de calculer, en théorie, l'affaiblissement supplémentaire sur le trajet que ces obstacles créent. Dans le cas contraire, si seules des informations générales sur l'environnement sont disponibles, on peut évaluer l'affaiblissement sur le trajet à partir de mesures faites dans des situations analogues. Dans tous les cas, à une échelle suffisamment petite, il est impossible de faire une évaluation théorique et il faut alors procéder à une évaluation sur la base de mesures. Une telle évaluation, qui doit être de nature statistique, consiste généralement à déterminer la valeur médiane de l'affaiblissement sur le trajet pour une zone spécifiée ainsi que sa variance.

Le signal peut varier explicitement en fonction du temps en raison des variations atmosphériques, mais sur des distances inférieures à environ 50 km, ce type de variation est relativement peu important. Un élément est plus important dans le service mobile terrestre: la variabilité spatiale, qui est considérée comme de la variabilité temporelle par les récepteurs en mouvement.

Il est utile de décomposer la variabilité spatiale en deux modes: un évanouissement rapide dû aux trajets multiples, qui se produit à l'échelle de quelques longueurs d'onde et un évanouissement plus lent dû aux variations du phénomène d'occultation. Lors de l'analyse des mesures, ces deux modes peuvent être séparés en réalisant un certain nombre de mesures à intervalles réguliers sur une distance de l'ordre de 40 longueurs d'onde et en trouvant une valeur médiane du niveau du signal ou de l'affaiblissement sur le trajet pour cette distance. Il faut environ 36 mesures de ce type pour obtenir une valeur médiane à 1 dB près avec une probabilité de 90%. L'intervalle entre deux mesures doit être d'au moins 0,8 fois la longueur d'onde afin que les mesures adjacentes ne soient pas corrélées, critère qui est satisfait dans les conditions qui viennent d'être indiquées. Cette procédure est répétée pour d'autres intervalles correspondant à une distance de 40 longueurs d'onde jusqu'à ce que la zone considérée soit entièrement couverte. L'expérience montre que ces valeurs médianes obéissent à une distribution log-normale; par conséquent cette distribution est caractérisée par la moyenne ou la médiane ainsi que l'écart type des valeurs. Il s'agit de la distribution des variations d'intensité du signal liées à l'occultation, la variation due aux trajets multiples étant exclue.

3.2.1 Occultation

Un certain nombre de mesures de distribution de la variabilité de l'intensité du signal liée à l'occultation ont été faites. Il est important de spécifier si la zone considérée est grande (c'est-à-dire si elle comprend tous les trajets d'une longueur donnée autour d'une station de base ou tous les trajets d'une longueur donnée dans une certaine région géographique) ou si elle est petite (c'est-à-dire si c'est une zone dont les dimensions sont de l'ordre de quelques centaines de mètres et dans laquelle le profil du trajet et l'environnement général du récepteur ne varient que dans de faibles proportions). Plus la zone sera grande, plus la variabilité de l'intensité du signal sera grande.

Dans les zones rurales, pour tous les trajets d'une longueur donnée, l'écart type, σ_L , de la distribution de la variabilité en fonction de l'emplacement peut être évalué par:

$$\begin{aligned}\sigma_L &= 6 + 0,69 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{1/2} - 0,0063 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right) && \text{dB} && \text{pour } \Delta h/\lambda < 3000 \\ \sigma_L &= 25 && \text{dB} && \text{pour } \Delta h/\lambda > 3000\end{aligned}\tag{1}$$

où:

Δh : variation de hauteur interdécile (m)

λ : longueur d'onde (m)

$\lambda = 300/f$

f : fréquence (MHz).

Dans les zones urbaines planes, l'écart type, dans le cas d'une grande zone, peut être évalué par:

$$\sigma_L = 5,25 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \tag{2}$$

cette formule étant valable entre 100 et 3000 MHz.

Dans le cas de petites zones, l'écart type de la variabilité en fonction de l'emplacement est moins bien connu. On pense qu'il dépend de la couverture du sol, mais cette dépendance n'est pas très claire. Il semble que l'écart type diminue à mesure que la distance à l'émetteur augmente, mais ce n'est pas toujours évident. La formule (3), dans laquelle la dépendance en fréquence de la formule (2) est conservée, résume approximativement certaines mesures faites dans les ondes décimétriques pour des distances allant jusqu'à 50 km et pour tous les types de couverture du sol:

$$\sigma_L = 2,7 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \tag{3}$$

La Recommandation UIT-R P.1546 contient une formule empirique différente pour ces évanouissements par occultation.

3.2.2 Evanouissements par trajets multiples

Sur une échelle de quelques longueurs d'onde, la variation du signal est fonction des effets de la propagation par trajets multiples. Comme on prévoit au minimum la présence d'une composante réfléchi par le sol, les effets de la propagation par trajets multiples seront toujours observés dans la pratique. Ces effets permettent généralement de déterminer si un canal est un canal de «Rayleigh» ou de «Rice».

Dans le premier cas, le signal reçu est la somme de nombreuses composantes associées aux évanouissements indépendants, et peut être représenté par la distribution de Rayleigh (voir la Recommandation UIT-R P.1057). Ce canal sera un canal type pour un service mobile cellulaire à bande étroite fonctionnant dans un environnement urbain comportant de nombreux obstacles, sans visibilité directe vers l'émetteur.

Le canal de Rice correspond à la situation dans laquelle l'une des composantes du signal reçu, par exemple celle associée à un trajet en visibilité directe vers l'émetteur, a une puissance constante sur l'échelle de temps des évanouissements par trajets multiples. En pareil cas, l'évanouissement global du signal peut être modélisé par la distribution de Nakagami-Rice (voir la Recommandation UIT-R P.1057). Cette distribution est souvent formulée en fonction du paramètre K (le «facteur de Rice»), qui est défini comme le rapport entre la puissance dans la partie constante du signal et la puissance dans la partie aléatoire. Pour $K = 0$, la distribution est une distribution de Rayleigh.

3.3 Réflexions locales

Les ondes radioélectriques arrivant à un récepteur mobile peuvent provenir d'une réflexion sur le sol ou sur des objets voisins (bâtiments, arbres, véhicules, etc.). L'onde provenant d'une réflexion sur le sol est cohérente avec l'onde directe et provoque une variation du signal reçu en fonction de la hauteur de l'antenne du récepteur. Quant aux ondes provenant d'une réflexion sur des objets voisins, elles ont des amplitudes et des phases aléatoires.

L'ensemble des interférences constructives et destructives entre l'onde directe et les diverses ondes réfléchies constitue un diagramme d'interférence dans lequel la distance entre minima est au moins égale à la moitié de la longueur d'onde.

Dans les zones urbaines ou boisées, il existe de nombreuses ondes réfléchies et le champ instantané mesuré sur des distances de quelques dizaines de longueurs d'onde suit approximativement une distribution de Rayleigh.

L'ensemble des interférences donne lieu à des évanouissements rapides dans les récepteurs en mouvement; par ailleurs, les réflexions sur des véhicules en mouvement peuvent causer des évanouissements, même dans les récepteurs stationnaires.

Des évanouissements d'au moins 30 dB au-dessous du niveau moyen sont courants.

Les réflexions locales peuvent aussi avoir comme effet utile de permettre la transmission de signaux dans des zones très masquées jusqu'à un certain degré.

3.4 Corrélation des signaux

La corrélation de la puissance moyenne reçue en provenance de différentes sources est importante pour les évaluations du rapport porteuse/brouillage, C/I .

Soit C la puissance de la porteuse utile (dB), C_m étant sa moyenne et σ_C son écart type et soit I la puissance (dB) provenant d'une source brouilleuse, I_m étant sa moyenne et σ_I son écart type. Le rapport C/I moyen $(C/I)_m$ s'exprime comme suit:

$$(C/I)_m = C_m - I_m \quad \text{dB} \quad (4)$$

ce rapport est indépendant du coefficient de corrélation.

L'écart type du rapport C/I , $\sigma_{C/I}$, s'exprime comme suit:

$$\sigma_{C/I} = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_I^2 - 2\rho\sigma_C\sigma_I} \quad (5)$$

où ρ est le coefficient de corrélation. Dans le cas où $\sigma = \sigma_I = \sigma_C$, la formule (5) devient:

$$\sigma_{C/I} = \sigma\sqrt{2(1-\rho)} \quad (6)$$

Des coefficients de corrélation déterminés à partir d'ensembles d'échantillons de données de puissance reçue indiquent que, pour la réception de signaux en provenance de deux sens opposés, il n'y a pas de forte corrélation. Lorsque la différence entre les angles d'incidence au niveau du mobile est faible, il existe de fortes corrélations. Les valeurs typiques de ρ pour des sources situées au même endroit sont comprises entre 0,8 et 0,9 dans les zones agricoles et très boisées. Dans les zones métropolitaines, la corrélation est généralement plus faible (ρ compris entre 0,4 et 0,8). Dans les zones montagneuses, la corrélation est généralement très faible. Toutefois, des valeurs de $\rho > 0,8$ sont observées dans des cas exceptionnels, même dans des zones montagneuses.

4 Étalement des retards

De nombreux types de systèmes radioélectriques, notamment ceux qui utilisent des techniques numériques, sont sensibles à la propagation des signaux par trajets multiples provoquée par les caractéristiques du trajet. Ce phénomène résulte de l'arrivée d'un certain nombre de signaux réfléchis après l'arrivée du signal direct. Sur la base des amplitudes et des retards des signaux réfléchis, on peut déterminer la réponse impulsionnelle du canal. Plusieurs paramètres décrivant le canal de propagation peuvent être extraits de cette réponse, voir la Recommandation UIT-R P.1407.

L'un des paramètres importants est la valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards, S , tel qu'il est donné dans les équations (3) et (4) de la Recommandation UIT-R P.1407. Une mesure utile relative à l'étalement des retards est l'étalement des retards dus aux trajets multiples, T_m , où

$$T_m = 2S \quad (7)$$

Le plus utile des deux paramètres susmentionnés pour la prévision de la qualité de fonctionnement du système dépend du type de modulation utilisé.

4.1 Incidence sur la qualité de fonctionnement du système

Suivant le rapport entre l'étalement des retards et la durée des symboles, des phénomènes différents sont responsables du taux d'erreur binaire. Les signaux se propageant par trajets multiples conduisent à une rapide variation de phase en fonction de l'emplacement et de la fréquence. Pour les modulations fondées sur un certain type de modulation angulaire (par exemple, la modulation par déplacement de phase différentielle (MDPD)), ces variations de phase sont responsables d'erreurs irréductibles, qui subsistent même pour les rapports signal/bruit élevés. Tant que l'étalement des retards est inférieur à la durée des symboles, les erreurs irréductibles dépendent plus de l'étalement des retards que de la forme exacte de la réponse impulsionnelle. Mais si l'étalement des retards dépasse la durée des

symboles, il se produit un brouillage intersymboles, qui dépend alors plus de la forme de la réponse impulsionnelle du canal.

4.2 Signaux retardés en raison de la présence de diffuseurs locaux

Des signaux à retard court sont souvent observés dans les zones où des diffuseurs locaux sont répartis uniformément. Ces signaux sont généralement rencontrés dans les zones urbaines ou suburbaines, dans lesquelles aucun des grands réflecteurs situés à des distances plus longues (montagnes, collines) n'est en visibilité directe. Si la distribution des signaux diffusés est uniforme, les réponses impulsionnelles sont généralement homogènes (voir aussi la Recommandation UIT-R P.1238). En plus de la portion homogène de la réponse impulsionnelle, de forts échos provenant de grands bâtiments sont parfois identifiés et se traduisent par une réponse impulsionnelle non homogène. Par ailleurs, des réponses impulsionnelles non homogènes sont observées aux intersections de rues.

Les valeurs quadratiques moyennes de l'étalement des retards observées dans les zones urbaines et suburbaines sont généralement comprises entre 0,8 et 3 μ s. Pour les systèmes à débit de données élevé, une connaissance plus précise de la réponse impulsionnelle peut être nécessaire. Le calcul détaillé correspondant de l'intensité des signaux se propageant par trajets multiples incorpore la technique de tracé de rayon ou de lancer de rayon et fait intervenir des données de bâtiments à haute résolution.

4.3 Signaux retardés en raison de la présence de grands diffuseurs distants

Des signaux à retard long sont généralement observés dans les zones où des montagnes sont proches d'une zone plane (par exemple une plaine ou une vallée). Cette observation est particulièrement manifeste lorsqu'une grande zone plane est bordée par une seule chaîne de montagnes, ce qui a pour conséquence de diminuer les éventuels effets de réduction dus à d'autres chaînes de montagnes. Des valeurs allant jusqu'à 25 μ s environ ont généralement été observées.

La puissance du signal direct doit être calculée par la méthode appropriée, déterminée par la Recommandation UIT-R P.1144, compte tenu des limites de validité définies dans cette Recommandation. La puissance des signaux provenant d'une réflexion peut être calculée à partir de la formule (8):

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r}{32 \pi^3} \left(\frac{\lambda}{r_1 r_2} \right)^2 \Gamma A \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \quad (8)$$

où:

- P_{rs} : puissance du signal reçu
- P_t : puissance en sortie de l'émetteur
- G_t : gain équivalent de l'antenne de l'émetteur (incluant les affaiblissements de ligne et dû au filtrage)
- G_r : gain équivalent de l'antenne du récepteur (incluant les affaiblissements de ligne et dû au filtrage)
- λ : longueur d'onde dans la même unité que r_1 et r_2
- r_1, r_2 : distances du plan de diffusion (surface de montagne) à l'émetteur et au récepteur
- Γ : réflectivité du plan de diffusion
- A : surface du plan de diffusion dans la même unité (au carré) que r_1 et r_2
- θ_1, θ_2 : angles aigus que la normale au plan de diffusion fait avec les rayons dirigés vers l'émetteur et vers le récepteur.

Dans la formule (8), il n'est pas tenu compte de l'angle dans le plan vertical mais il faut qu'il soit suffisamment précis pour l'ingénierie des systèmes radioélectriques mobiles terrestres. Il convient aussi de remarquer que cette formule sera moins précise en cas de propagation guidée ou d'autres phénomènes de réfraction. Dans des cas extrêmes, elle ne sera peut-être pas applicable du tout, si un réflecteur dont il serait normalement tenu compte ne se situe plus en visibilité directe ou, inversement, si un versant de montagne qui n'est normalement pas en visibilité directe se trouve alors en visibilité directe.

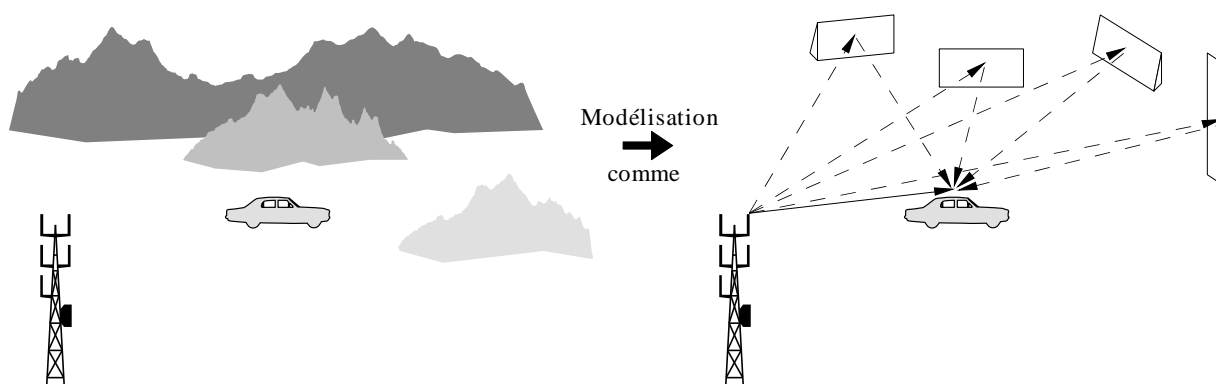
Dans un souci de simplicité et de rapidité de calcul, chaque chaîne de montagnes est considérée comme un seul plan de diffusion et on suppose que son orientation azimutale est celle du plus haut sommet de la chaîne. La surface, A , correspond à la surface de la portion de la chaîne qui est située à l'intérieur des largeurs de faisceaux à mi-puissance des antennes d'émission et de réception et qui est en visibilité directe des deux antennes. Les paramètres r_1 , r_2 , θ_1 et θ_2 sont calculés à partir du centre de la portion de la chaîne de montagnes susmentionnée.

Si une portion de chaîne de montagnes réfléchissante n'est pas complètement en visibilité directe de la station d'émission ou de la station de réception en raison de la présence d'une chaîne de montagnes plus proche et que la surface réfléchissante de la chaîne la plus éloignée se trouve séparée en sections, on fait le calcul en considérant les portions en visibilité directe comme des chaînes de montagnes distinctes. Ce concept est représenté sur la Fig. 1.

On a observé que la réflectivité, Γ , a des valeurs comprises entre 0,001 et 0,2 (-30 dB et -7 dB). Pour les montagnes boisées, il est peu probable que la réflectivité dépasse 0,05 (-13 dB). Pour les montagnes nues, il serait peu probable que la réflectivité dépasse 0,2 (-7 dB).

Les éventuels affaiblissements dus à des groupes d'obstacles pris en considération dans le calcul relatif au signal direct doivent aussi être pris en considération dans le calcul relatif aux signaux réfléchis.

FIGURE 1
Modélisation du signal direct et des signaux réfléchis



5 Effets liés aux antennes

5.1 Effets liés à la polarisation

5.1.1 Phénomènes de dépolarisation dans l'environnement mobile terrestre

Dans l'environnement mobile terrestre, une partie ou la totalité de l'énergie émise peut être dépolarisée en raison de la diffraction et de la réflexion des ondes radioélectriques. Il est utile de tenir compte de cet effet de dépolarisation en employant un facteur de discrimination de polarisation (XPD), tel qu'il est défini dans la Recommandation UIT-R P.310.

Des mesures de la XPD à 900 MHz montrent que:

- la XPD dépend peu de la distance;
- la valeur moyenne de la XPD est comprise entre 5 dB et 8 dB dans les zones urbaines et résidentielles et elle est supérieure à 10 dB dans les zones dégagées;
- la corrélation moyenne entre polarisations verticale et horizontale est nulle.

La XPD augmente à mesure que la fréquence diminue, pour atteindre environ 18 dB à 35 MHz.

La XPD obéit à une distribution log-normale, avec un écart type qui dépend quelque peu de la fréquence. Entre 30 MHz et 1 000 MHz, l'écart moyen entre les valeurs à 10% et à 90% est de l'ordre de 15 dB. On n'a observé qu'une légère différence entre le cas où la polarisation initiale est verticale et le cas où cette polarisation est horizontale.

On a constaté que l'effet de dépolarisation varie dans le temps de deux façons différentes. La première correspond à une variation lente due au fait que les propriétés électriques du sol évoluent en fonction des conditions météorologiques. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence est basse. La seconde résulte du mouvement des arbres, qui donne lieu à un phénomène de variation de la dépolarisation, dont l'amplitude atteint plusieurs décibels, même pour des vents de vitesse très modérée.

5.1.2 Diversité de polarisation

En raison de la forte diffusion qui se produit dans les zones urbaines et résidentielles et des faibles valeurs de XPD qui en résultent, la diversité de polarisation peut être une technique utile pour améliorer la réception. L'option la plus élémentaire consisterait à utiliser deux polarisations linéaires orthogonales au niveau de la station de base.

Comme autre solution, le recours à une polarisation circulaire au niveau de la station de base et à une polarisation linéaire au niveau du terminal mobile, malgré une perte de 3 dB due à la disparité de polarisation, peut permettre de tirer parti de la dépolarisation due à la diffusion et d'avoir un signal reçu de niveau plus constant dans l'environnement du terminal mobile.

5.2 Gain lié à la hauteur: station de base et terminaux mobiles

L'expression «gain lié à la hauteur» fait référence à la variation de l'intensité du signal reçu suivant la hauteur de l'antenne. Bien que le gain augmente habituellement avec la hauteur (gain lié à la hauteur, positif), il peut aussi décroître à mesure que la hauteur augmente (gain lié à la hauteur, négatif). En l'absence de groupes d'obstacles locaux, le signal direct peut interagir avec un rayon réfléchi sur le sol provenant du même émetteur. La variation de champ résultante, dans une direction verticale, correspond à une série de maxima et de minima étant donné que les deux signaux ont successivement la même phase et une phase différente du fait de la géométrie des trajets.

Dans la pratique, et en particulier avec les récepteurs mobiles, les signaux provenant de réflexions sur des groupes d'obstacles ou d'autres réflexions ont tendance à avoir pour effet de réduire au minimum ce phénomène à deux rayons, qui, au-dessus de 200 MHz, peut être négligé dans la plupart des cas. Par ailleurs, on constate généralement que le fait d'élever l'antenne a simplement pour effet de réduire l'affaiblissement équivalent dû à des groupes d'obstacles, ce qui se traduit par une augmentation de l'intensité du signal reçu en fonction de la hauteur. Compte tenu de cette relation qui existe entre la hauteur d'antenne et l'affaiblissement dû à des groupes d'obstacles, la forme de gain lié à la hauteur résultante peut être classée en termes de type de couverture du sol (voir la Recommandation UIT-R P.370). Dans les autres méthodes de prévision, notamment celles qui utilisent une base de données topographiques, la hauteur d'antenne est souvent liée directement au calcul de l'affaiblissement dû à des groupes d'obstacles.

Pour les stations de base fonctionnant à des fréquences inférieures à 200 MHz et situées dans des zones dégagées, on peut parfois observer un phénomène à deux rayons pouvant nécessiter un repositionnement de l'antenne de façon à éviter que le gain lié à la hauteur soit négatif. Un tel phénomène est difficile à prévoir de façon précise, car une connaissance détaillée du profil du terrain au niveau du point de réflexion est nécessaire. Au-dessus de 200 MHz, du fait que la longueur d'onde est plus courte, ce problème particulier tend à diminuer et il peut être ignoré pour les fréquences correspondant aux ondes décimétriques et supérieures.

5.3 Corrélation et diversité spatiale

La diversité spatiale est utile pour les antennes dont les coefficients de corrélation vont jusqu'à environ 0,7. En général, cette technique rend la réception en diversité par les terminaux portables et mobiles quasiment impossible. Dans le cas des stations de base, toutefois, un certain nombre de techniques peuvent permettre de réduire la corrélation entre les antennes. Les deux techniques les plus pratiques sont l'espacement vertical et l'espacement horizontal.

Pour ramener le coefficient de corrélation à une valeur de 0,7 ou à une valeur inférieure, la distance entre des antennes espacées verticalement doit être d'environ 17 longueurs d'onde ou plus. L'espacement horizontal peut être plus efficace, suivant l'orientation du plan des antennes par rapport à la direction de déplacement du terminal mobile. Si le plan vertical passant par les antennes est perpendiculaire à la direction de déplacement des terminaux mobiles, le coefficient de corrélation est approximativement le même que dans le cas de l'espacement vertical. Avec une orientation optimale, la distance entre des antennes espacées horizontalement peut être aussi courte que 8 longueurs d'onde. Il faut garder à l'esprit que les orientations quasi optimales ne peuvent être maintenues que dans des cas particuliers, par exemple pour des systèmes utilisant des antennes sectorielles.

5.4 Gain qu'il est possible d'obtenir avec une antenne de terminal mobile à bord d'un véhicule

Etant donné que les terminaux mobiles à bord de véhicules fonctionnent généralement dans un environnement à trajets multiples, il n'est pas surprenant que le gain des antennes de ces terminaux ne corresponde pas, dans la plupart des cas, au gain relevé sur les diagrammes. En outre, même dans des conditions de visibilité directe et sans trajets multiples, l'angle d'incidence dans le plan vertical n'est pas nécessairement nul par rapport à la direction horizontale. En réalité, il existe des cas, dans la pratique, où cet angle peut dépasser 10° , auquel cas un tel angle pourrait facilement ne correspondre à aucun lobe ou correspondre à un lobe secondaire, plutôt qu'au lobe principal du diagramme de rayonnement de l'antenne du terminal mobile dans le plan vertical.

Des mesures faites sur des antennes de terminaux mobiles dont le gain a été fixé à 3 dB et 5 dB par rapport à une antenne unipolaire verticale $\lambda/4$ ont montré que les valeurs de gain effectif mesurées correspondent rarement aux valeurs relevées sur les diagrammes de rayonnement. En cas de trajets multiples ou par temps clair avec des angles d'incidence élevés ($>2^\circ$), le gain effectif de l'une ou l'autre des antennes est approximativement de 1,5 dB par rapport à une antenne unipolaire verticale $\lambda/4$ sur des plages de distances allant jusqu'à 55 km au moins. Par temps clair avec de faibles angles d'élévation, il est possible d'obtenir le gain total.

6 Effets liés aux terminaux portables

6.1 Affaiblissement d'entrée dans les bâtiments

Les affaiblissements de propagation se produisant au moment de l'entrée dans un bâtiment peuvent varier considérablement suivant le type de bâtiment et les matériaux de construction. La fréquence du signal et son angle d'incidence ont également une importance. En conséquence, les valeurs d'affaiblissement peuvent aller de quelques dizaines à de nombreuses dizaines de décibels.

La Recommandation UIT-R P.2040 donne les informations sur les affaiblissements subis par les signaux radioélectriques au moment de l'entrée dans un bâtiment ou de la sortie d'un bâtiment. Une fois à l'intérieur des bâtiments, il peut se produire des affaiblissements supplémentaires, résultant de la construction interne et du contenu des bâtiments. Cet aspect est traité dans la Recommandation UIT-R P.1238.

6.2 Affaiblissement dû au corps humain

La présence d'un corps humain dans l'environnement immédiat d'un émetteur-récepteur portable, d'un téléphone cellulaire ou d'un récepteur de radiomessagerie peut entraîner une dégradation de la qualité de fonctionnement de l'antenne – plus l'antenne est proche du corps humain, plus la dégradation est grande. Cette dégradation dépend aussi de la fréquence, comme le montre la Fig. 2, qui est fondée sur une étude détaillée récente faite sur des émetteurs-récepteurs portables pour quatre fréquences utilisées couramment.

Il est impossible de parler exclusivement d'«affaiblissement dû au corps humain» dans le cas d'un récepteur de radiomessagerie car l'antenne d'un tel dispositif est intégrée au dispositif. C'est pourquoi la sensibilité d'un récepteur de radiomessagerie est habituellement spécifiée en termes de champ (généralement en $\mu\text{V/m}$). Toutefois, il est utile de connaître le gain d'une antenne intégrée typique lorsque le récepteur de radiomessagerie est porté au niveau de la hanche. Le Tableau 2 donne les valeurs de ce gain pour un récepteur donné à trois fréquences différentes.

FIGURE 2
Affaiblissement typique dû au corps humain-
Emetteur-récepteur portable

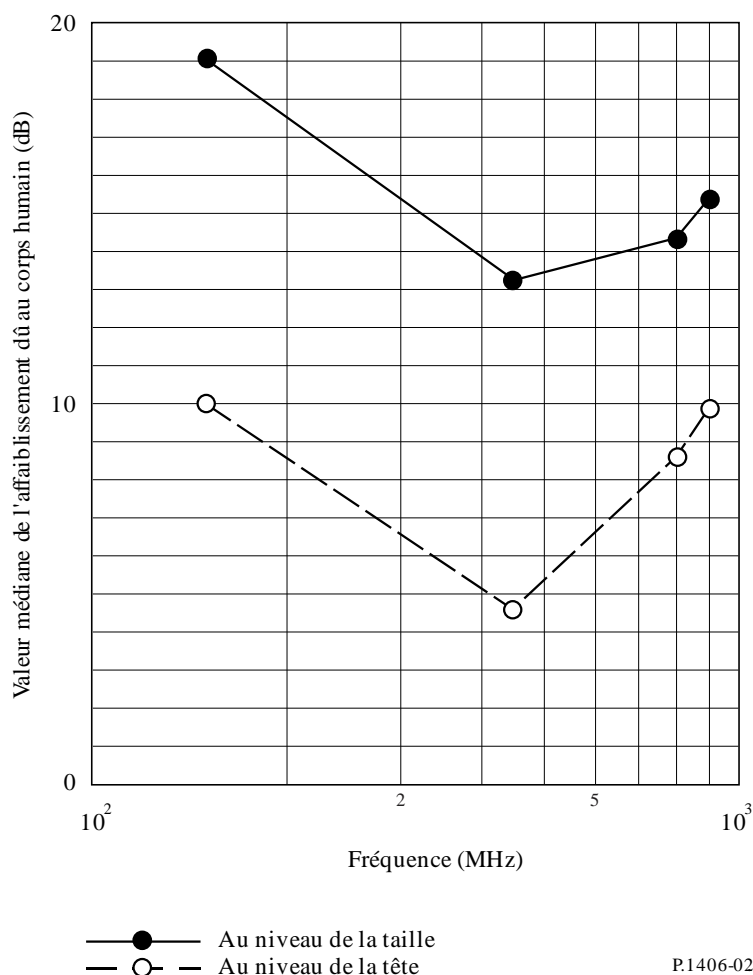


TABLEAU 2
Gain de l'antenne d'un récepteur de radiomessagerie

Fréquence (MHz)	Gain de l'antenne (dB)
160	-25
460	-22
930	-19

7 Propagation guidée

La propagation peut être qualifiée de «guidée» chaque fois qu'un front d'onde n'est pas libre de se propager dans les trois dimensions. Citons par exemple la propagation troposphérique guidée, les communications de type «rue-canyon» et les techniques des lignes de transmission, notamment les guides d'ondes.

Le § 7.1 traite de la propagation le long de tunnels dont il faut tenir compte lorsqu'un signal radioélectrique entre dans un tunnel par l'une des extrémités ou est lancé dans le tunnel par une antenne. Le § 7.2 porte sur les lignes avec fuites (câbles rayonnants), sujet qui est étroitement lié.

7.1 Propagation le long de tunnels

Des systèmes radioélectriques sont généralement nécessaires dans les tunnels routiers et ferroviaires pour la fourniture de services de radiodiffusion et de téléphonie mobile ainsi que dans les installations minières ou autres installations en sous-sol pour des raisons de sécurité et d'exploitation.

La propagation le long d'un tunnel présentant une certaine régularité peut être interprétée en termes de théorie des guides d'ondes. Suivant la fréquence, les ondes radioélectriques se propagent le long du tunnel en mode électrique transverse ou respectivement en mode magnétique transverse, dans lequel la composante électrique ou respectivement la composante magnétique est uniquement transverse par rapport à l'axe du tunnel. Pour chaque mode, il existe une fréquence critique au-dessous de laquelle le mode ne se propage pas. Au-dessus de sa fréquence critique, chaque mode se propage avec ses propres coefficients de propagation et de phase. La plus basse fréquence critique des deux modes est définie comme la fréquence de coupure du guide d'ondes, au-dessous de laquelle aucune propagation n'est possible dans la pratique. Pour un guide d'ondes rectangulaire, la fréquence de coupure correspond à une longueur d'onde valant le double de la largeur du côté le plus long. Pour un tunnel irrégulier, une longueur d'onde égale à la circonférence de la section transversale du tunnel constitue une approximation utile.

Dans le cas du transport ou des tunnels habitables normaux, les services radioélectriques utilisant les ondes métriques fonctionnent habituellement au-dessus de la fréquence de coupure et ceux qui utilisent les ondes décimétriques fonctionnent bien au-delà.

Aux fréquences situées bien au-delà de la fréquence de coupure, la propagation à l'intérieur d'un tunnel peut aussi être interprétée en termes de théorie des rayons, qui est généralement mieux adaptée étant donné que la longueur d'onde devient très petite par rapport à la section transversale du tunnel. La propagation dans un tunnel dont les côtés sont lisses par rapport à la longueur d'onde, sera caractérisée par des réflexions sur les murs aux angles rasants, pour lesquels la plupart des matériaux ont des coefficients de réflexion élevés. En raison de la grande variété de trajets réfléchis disponibles, le résultat présente des caractéristiques de trajets multiples, avec évanouissement de Rayleigh ou de Rice.

La présence d'obstacles dans un tunnel a pour conséquence que les ondes radioélectriques dont la fréquence est située bien au-delà de la fréquence de coupure sont diffusées, généralement, avec de grands angles et le processus des réflexions aux angles d'incidence rasants est alors interrompu. Un affaiblissement dû à la diffraction se produit immédiatement au-delà d'un obstacle en raison de l'occultation.

Les taux d'affaiblissement linéique relatifs à la propagation dans des tunnels varient dans une large mesure; les irrégularités et les changements de direction des tunnels ainsi que les obstacles, y compris le trafic, influent beaucoup sur ces taux. Dans un tunnel routier classique, les valeurs d'affaiblissement comprises entre 0,1 et 1 dB/m peuvent être considérées comme typiques, mais on peut facilement trouver des valeurs situées en dehors de cet intervalle. En raison de la coexistence de plusieurs modes au-dessus de la fréquence critique, les taux d'affaiblissement peuvent soit croître, soit décroître à mesure que la fréquence augmente, suivant les cas.

7.2 Lignes avec fuites (câbles rayonnants)

Les lignes avec fuites (câbles rayonnants), qui sont souvent utilisées en cas de présence d'obstacles à la propagation à l'intérieur d'un tunnel, constituent souvent la seule méthode, dans la pratique, qui permette d'assurer des services au-dessous de la fréquence de coupure (radiodiffusion en ondes hectométriques par exemple).

Si les services radioélectriques sont acheminés sur un câble coaxial placé dans la longueur du tunnel et quelque peu éloigné de ses côtés et si le conducteur extérieur du câble présente des trous, il y a fuite d'une partie de l'énergie à travers le conducteur extérieur sous forme d'ondes en mode électromagnétique transverse entre l'extérieur du câble coaxial et les murs du tunnel. Ce processus est appelé conversion de modes. La présence d'irrégularités dans le système câble coaxial/tunnel, y compris les montures des lignes d'alimentation, entraîne aussi une conversion de modes. Afin de contrôler cette conversion, certains systèmes utilisent des sections d'alimentation sans fuite intercalées avec des dispositifs de conversion de modes discrets.

La conception des systèmes à ligne d'alimentation avec fuites est très particulière. Dans la pratique, on rencontre le problème suivant: la perte par couplage entre une ligne d'alimentation avec fuites et des terminaux mobiles est grande lorsque la ligne d'alimentation est installée à proximité d'un côté du tunnel, tandis que, pour des questions de dégagement, il faut généralement éviter d'installer la ligne loin des côtés.

8 Variations en fonction du temps

La valeur du champ reçu varie en fonction du temps, en plus de l'emplacement et de la nature du terrain.

Le Tableau 3 donne les valeurs de σ_t , écart type de la variabilité en fonction du temps.

TABLEAU 3

Ecart-type σ_t

Bande	d (km)	σ_t (dB)			
		50	100	150	175
Ondes métriques	Terre et mer	3	7	9	11
Ondes décimétriques	Terre	2	5	7	
	Mer	9	14	20	

Dans certaines conditions radiométéorologiques, le phénomène de propagation guidée peut se produire et peut causer de fortes augmentations d'intensité du signal, pouvant conduire à des brouillages (voir la Recommandation UIT-R P.452). Ces effets sont intermittents et à court terme.