

RECOMMANDATION UIT-R P.1411-3

Données de propagation et méthodes de prévision pour la planification de systèmes de radiocommunication, à courte portée, destinés à fonctionner à l'extérieur de bâtiments et de réseaux locaux hertziens dans la gamme de fréquences comprises entre 300 MHz et 100 GHz

(Question UIT-R 211/3)

(1999-2001-2003-2005)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) le nombre élevé de nouvelles applications de télécommunications mobiles et de communications personnelles de courte portée (moins de 1 km) actuellement mises au point;
- b) la forte demande de réseaux locaux hertziens (RLAN) et de systèmes radio dans la boucle locale;
- c) les nombreux avantages que présentent les systèmes de courte portée, utilisant de très faibles puissances, lorsqu'il s'agit de fournir des services dans l'environnement mobile et dans la boucle locale radio;
- d) l'importance déterminante que revêt pour la conception de ces systèmes la connaissance des caractéristiques de propagation et des brouillages résultant de la présence de plusieurs utilisateurs dans une même zone;
- e) la nécessité de disposer aussi bien de modèles et d'avis généraux (c'est-à-dire indépendants par rapport aux sites) pour le travail initial de planification des systèmes et d'évaluation des brouillages que de modèles déterministes (ou propres à des sites particuliers) pour des évaluations détaillées,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R P.1238 établit des directives en ce qui concerne la propagation à l'intérieur de bâtiments pour la gamme de fréquences comprises entre 900 MHz et 100 GHz et qu'il faudrait la consulter pour les cas où les conditions s'appliquent tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de bâtiments;
- b) que la Recommandation UIT-R P.1546 établit des directives en ce qui concerne la propagation correspondant aux systèmes dont la portée est de 1 km et plus et à la gamme de fréquences comprises entre 30 MHz et 3 GHz,

recommande

- 1 d'adopter, si possible, les données et les méthodes définies dans l'Annexe 1 pour évaluer les caractéristiques de propagation des systèmes de radiocommunication, à courte portée, destinés à fonctionner à l'extérieur de bâtiments entre 300 MHz et 100 GHz.

Annexe 1

1 Introduction

Sur des distances inférieures à 1 km, la propagation est plus perturbée par les bâtiments et les arbres que par le relief: le rôle déterminant est joué par les bâtiments, la plupart des liaisons radioélectriques de courte portée étant utilisées dans des zones urbaines et suburbaines et le terminal mobile étant, très vraisemblablement, transporté par un piéton ou à bord d'un véhicule.

La présente Recommandation définit des catégories de trajets de propagation de courtes distances et fournit des méthodes d'estimation de l'affaiblissement et de l'étalement du temps de propagation sur ces trajets.

2 Environnements physiques et définition des types de cellule

Les environnements décrits dans la présente Recommandation sont classifiés uniquement du point de vue de la propagation des ondes radioélectriques, celle-ci étant en effet influencée par l'environnement, c'est-à-dire par la structure et la hauteur des bâtiments, par l'utilisation qui est faite du terminal mobile (piéton ou véhicule) et par l'emplacement des antennes. On a ainsi déterminé quatre milieux différents, considérés comme les plus typiques; on n'a pas, par exemple, pris en considération les «zones accidentées» qui sont moins typiques du milieu urbain. Le Tableau 1 présente les quatre environnements. Etant donné la grande diversité des environnements existant à l'intérieur de chaque catégorie, il n'est pas prévu de modéliser chaque cas possible, mais d'établir des modèles de propagation qui soient représentatifs des environnements les plus fréquents.

TABLEAU 1

Environnements physiques – Dégradations liées aux phénomènes de propagation

Milieu	Description et dégradations liées aux phénomènes de propagation entrant en jeu
Urbain élevé	<ul style="list-style-type: none"> – Véritables «canyons urbains», c'est-à-dire rues encaissées entre des bâtiments de plusieurs étages chacun – La propagation par-dessus les toits des bâtiments est peu probable à cause de leur hauteur – Les temps de propagation risquent d'être longs à cause de l'existence de rangées de bâtiments de grande hauteur – Les nombreux véhicules se déplaçant dans la zone sont autant d'obstacles qui réfléchissent les ondes et ajoutent un effet Doppler aux ondes réfléchies
Urbain/sub-urbain faiblement élevé	<ul style="list-style-type: none"> – Se caractérise par des rues larges – Risque de diffraction par-dessus les toits des bâtiments qui comptent en général moins de trois étages – Les véhicules en mouvement peuvent parfois donner lieu à des phénomènes de réflexion et d'occultation – Principales conséquences: temps de propagation importants et effet Doppler faible
Résidentiel	<ul style="list-style-type: none"> – Habitations de un ou deux étages – Les rues sont en général à deux voies et des voitures sont stationnées le long des bas-côtés – Possibilité de feuillage plus ou moins dense – Trafic automobile habituellement léger
Rural	<ul style="list-style-type: none"> – Petites maisons entourées de grands jardins – Incidences de la topographie – Possibilité de feuillage plus ou moins dense – Trafic automobile parfois élevé

Dans chacun de ces quatre environnements, on tient compte de deux scénarios possibles d'utilisation du terminal mobile, les usagers étant divisés en piétons et en automobilistes. Pour ces deux applications, la vitesse de déplacement du mobile est très différente, d'où des effets Doppler différents. Le Tableau 2 indique les vitesses types retenues pour ces scénarios.

TABLEAU 2

Environnements physiques – Vitesses types de déplacement du mobile

Milieu	Vitesse pour les piétons (m/s)	Vitesse pour les véhicules
Urbain élevé	1,5	Vitesse type en centre ville d'environ 50 km/h (14 m/s)
Urbain/suburbain faiblement élevé	1,5	Environ 50 km/h (14 m/s); voies rapides jusqu'à 100 km/h (28 m/s)
Résidentiel	1,5	Environ 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

Le type de mécanisme de propagation qui domine dépend, notamment, de la hauteur à laquelle se situe l'antenne de la station de base par rapport aux bâtiments environnants. Le Tableau 3 définit les types de cellule usuels pour une propagation sur une petite distance à l'extérieur de bâtiments.

TABLEAU 3

Définition des types de cellule

Type de cellule	Rayon de la cellule	Emplacement type de l'antenne de la station de base
Macrocellule de petite taille	0,5 à 3 km	En extérieur; installée au-dessus du niveau moyen des toits, certains bâtiments environnants pouvant être plus hauts que la hauteur d'antenne de la station de base
Microcellule	100 à 500 m	En extérieur; installée au-dessous du niveau moyen des toits
Picocellule	Jusqu'à 100 m	En intérieur ou en extérieur (installée au-dessous du niveau des toits)

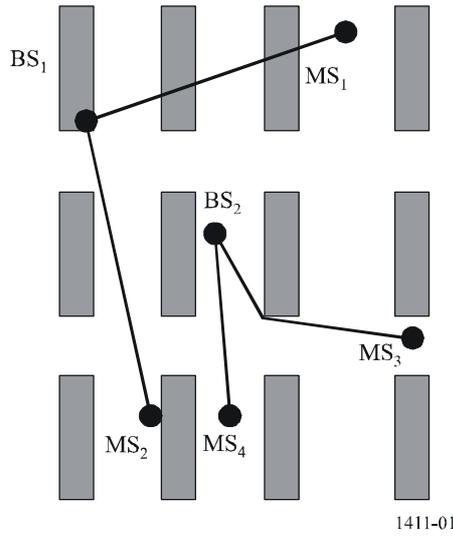
(Il est à noter que bien que la catégorie des «macrocellules de petite taille» ait une portée limite maximale de 3 km, la présente Recommandation s'applique à des distances maximales de 1 km.)

3 Catégories de trajets

3.1 Définition de situations de propagation

La Fig. 1 illustre quatre situations de propagation entre des stations de base (BS, *base station*) et des stations mobiles (MS, *mobile station*). La station de base BS₁ est installée au-dessus du niveau des toits; la cellule correspondante est une macrocellule de petite taille: à partir de cette station de base la propagation se fait principalement par dessus les toits. Installée quant à elle au-dessous du niveau des toits, la station de base BS₂ détermine un environnement microcellulaire ou picocellulaire; dans ces types de cellule, la propagation se fait principalement à l'intérieur de «canyons urbains». Pour les liaisons entre mobiles, on peut supposer que les deux extrémités de la liaison se situent au-dessous du niveau des toits, de telle sorte qu'on peut utiliser les modèles se rapportant à la station BS₂.

FIGURE 1
Situations types de propagation en zones urbaines

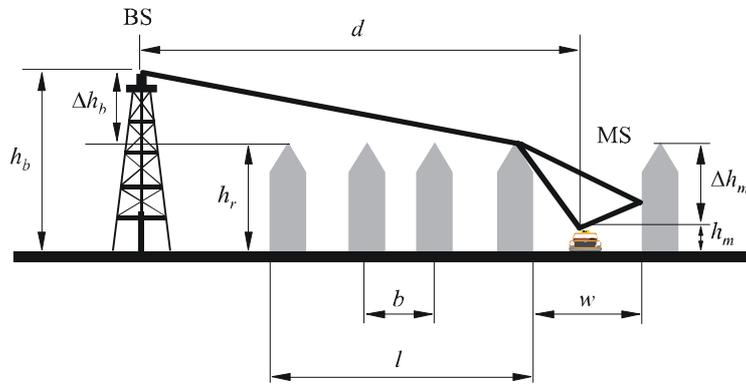


1411-01

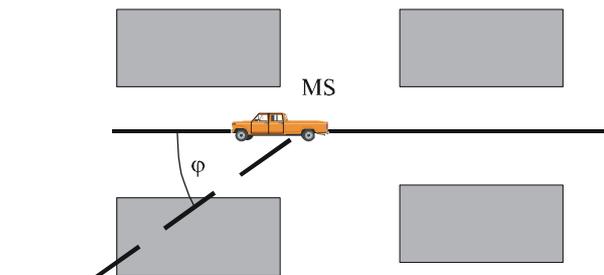
3.1.1 Propagation par dessus les toits, sans visibilité directe (NLoS, non-line-of-sight)

Le cas type NLoS (liaison entre BS₁ et MS₁ dans la Fig. 1) est illustré dans la Fig. 2; il est dénommé dans la suite du texte NLoS1.

FIGURE 2
Définition des paramètres correspondant au cas NLoS1



a)



Onde incidente

b)

1411-02

Les paramètres correspondant à cette situation sont:

h_r : hauteur moyenne des bâtiments (m)

w : largeur de la rue (m)

b : distance moyenne entre les bâtiments (m)

φ : angle (degrés) entre l'axe de la rue et le trajet direct (onde incidente)

h_b : hauteur de l'antenne de la BS (m)

h_m : hauteur de l'antenne de la MS (m)

l : longueur (m) du trajet couverte par des bâtiments

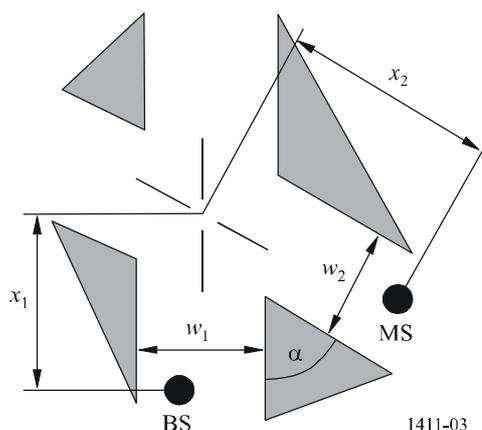
d : distance entre la BS et la MS.

Le cas NLoS1 se produit fréquemment dans des milieux résidentiels/ruraux pour tous les types de cellule et est prédominant dans les milieux urbains/suburbains où la hauteur des bâtiments est faible pour des macrocellules de petite taille. Les paramètres h_r , b et l peuvent être calculés à partir des données relatives aux bâtiments se trouvant sur la ligne reliant les antennes, mais pour déterminer w et φ il faut procéder à une analyse bidimensionnelle de la zone autour du mobile. A noter que l n'est pas nécessairement perpendiculaire à l'orientation du bâtiment.

3.1.2 Propagation, NLoS, le long de canyons urbains

La Fig. 3 illustre la situation correspondant à un cas type d'utilisation de microcellules NLoS (liaison entre BS₂ et MS₃ dans la Fig. 1); dans la suite du texte, ce cas est dénommé NLoS2.

FIGURE 3
Définition des paramètres correspondant au cas NLoS2



Les paramètres correspondant à cette situation sont:

w_1 : largeur de la rue à l'emplacement de la BS (m)

w_2 : largeur de la rue à l'emplacement de la MS (m)

x_1 : distance entre la BS et le centre du carrefour (m)

x_2 : distance entre la MS et le centre du carrefour (m)

α : angle à l'intersection des deux rues (rad).

Le type de trajet NLoS2 est celui que l'on rencontre le plus souvent en milieu urbain où la hauteur des bâtiments est élevée pour tous les types de cellule, mais il est également fréquent en milieu urbain où la hauteur des bâtiments est faible pour les types de microcellule et de picocellule. Pour déterminer tous les paramètres correspondant au cas NLoS2, il faut procéder à une analyse bidimensionnelle de la zone autour du mobile.

3.1.3 Trajets en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*)

Les trajets BS₁-MS₂ et BS₂-MS₄ dans la Fig. 1 sont des exemples de situation en LoS. Les mêmes modèles peuvent s'appliquer à l'un et l'autre types de trajet en LoS.

3.2 Données nécessaires

Pour les calculs propres à un site en milieu urbain, il est possible d'utiliser différents types de données. C'est à partir de données à haute résolution que l'on peut obtenir les informations les plus précises concernant:

- la structure des bâtiments;
- les hauteurs relatives et absolues des bâtiments;
- la végétation.

Les formats des données peuvent être du type matriciel ou vectoriel: la précision des données vectorielles devrait être, en ce qui concerne l'emplacement des stations, de l'ordre de 1 à 2 m alors que la résolution recommandée pour les données du type trame est de 1 à 10 m; dans l'un et l'autre cas, la précision pour la hauteur devrait être de l'ordre de 1 à 2 m.

En l'absence de données de haute résolution, il est recommandé d'utiliser les données de moindre résolution (50 m) des plans d'occupation des sols. Les paramètres nécessaires seront attribués selon la définition des différentes classes de ces plans (urbaine dense, urbaine, suburbaine, etc.). Par ailleurs, on peut utiliser ces données avec des informations vectorielles sur les rues pour calculer les angles que forment ces dernières les unes par rapport aux autres.

4 Modèles d'affaiblissement sur le trajet

En ce qui concerne les scénarios types en milieu urbain il est possible d'appliquer des algorithmes fermés. Ces modèles de propagation peuvent être utilisés pour des calculs se rapportant aussi bien à un site particulier qu'à un site général. Les situations de propagation correspondantes sont définies dans le § 3.1. Le type du modèle dépend en outre de la gamme de fréquences; il faut en effet appliquer des modèles différents pour une propagation en ondes décimétriques ou pour une propagation en ondes millimétriques: dans le premier cas on prendra en considération des situations en LoS et NLoS, alors que dans le deuxième on n'examinera que des situations en LoS. Dans la gamme des ondes millimétriques, il faut de plus prendre en considération le phénomène d'affaiblissement supplémentaire dû à l'oxygène et aux hydrométéores.

4.1 Situations en LoS dans les canyons urbains

Propagation des ondes décimétriques

Dans la gamme des ondes décimétriques, l'affaiblissement de transmission de référence, défini dans la Recommandation UIT-R P.341, peut être caractérisé par deux pentes et un seul point de rupture de pente. Une limite inférieure approchée est donnée par l'équation:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{pour } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{pour } d > R_{bp} \end{cases} \quad (1)$$

où R_{bp} , distance à laquelle se situe le point de rupture de pente, correspond à:

$$R_{bp} \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (2)$$

où λ est la longueur d'onde (m).

Une limite supérieure approchée est donnée par l'équation:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{pour } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{pour } d > R_{bp} \end{cases} \quad (3)$$

où L_{bp} est une valeur pour l'affaiblissement de transmission de référence au point de rupture de pente, égale à:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right| \quad (4)$$

Propagation des ondes centimétriques jusqu'à 15 GHz

Dans le cas des ondes centimétriques, pour des longueurs de trajet allant jusqu'à environ 1 km, le trafic routier aura une incidence sur la hauteur équivalente de la route et contribuera ainsi à déterminer la distance du point de rupture de pente. Cette distance, R_{bp} , est estimée par l'équation suivante:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_b - h_s)(h_m - h_s)}{\lambda} \quad (5)$$

où h_s est la hauteur équivalente de la route due à des objets tels que des véhicules sur la route ou des piétons à proximité de la chaussée; h_s dépend donc du trafic routier. Les valeurs de h_s indiquées dans les Tableaux 4 et 5 résultent de mesures diurnes et nocturnes correspondant respectivement à des conditions de trafic important et faible. Le terme «trafic important» correspond à un taux de couverture de la chaussée par les véhicules de 10% à 20% et à un taux d'occupation des trottoirs par les piétons de 0,2% à 1%. Le terme «trafic faible» correspondait à un taux de couverture de la chaussée par les véhicules de 0,1% à 0,5% et à un taux d'occupation des trottoirs par les piétons de moins de 0,001%. La largeur de la chaussée était de 27 m, compte tenu des 6 m de largeur de chacun des deux trottoirs.

TABLEAU 4

Hauteur équivalente de la route, h_s (trafic important)

Fréquence (GHz)	h_b (m)	h_s (m)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	1,3	(2)
	8	1,6	(2)
8,45	4	1,6	(2)
	8	1,6	(2)
15,75	4	1,4	(2)
	8	(1)	(2)

(1) Le point de rupture de pente est supérieur à 1 km.

(2) Il n'existe aucun point de rupture de pente.

TABLEAU 5

Hauteur équivalente de la route, h_s (trafic faible)

Fréquence (GHz)	h_b (m)	h_s (m)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	0,59	0,23
	8	(1)	(1)
8,45	4	(2)	0,43
	8	(2)	(1)
15,75	4	(2)	0,74
	8	(2)	(1)

(1) Aucune mesure effectuée.

(2) Le point de rupture de pente est supérieur à 1 km.

Lorsque $h_m > h_s$, on peut calculer les limites supérieure et inférieure approchées pour l'affaiblissement de transmission de référence dans la bande de fréquences des ondes centimétriques en utilisant les équations (1) et (3), avec L_{bp} donné par:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_b - h_s)(h_m - h_s)} \right\} \right| \quad (6)$$

Par ailleurs, lorsque $h_m \leq h_s$ il n'existe aucun point de rupture de pente. La zone proche de la BS ($d < R_s$) présente un affaiblissement de propagation de référence semblable à celui de la gamme des ondes décimétriques, alors que la zone distante de la station de base présente des caractéristiques de propagation pour lesquelles le coefficient d'affaiblissement est élevé au cube. Ainsi, la limite inférieure approchée pour $d \geq R_s$ est donnée par l'équation:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (7)$$

La limite supérieure approchée pour $d \geq R_s$, est donnée par l'équation:

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (8)$$

L'affaiblissement de propagation L_s est défini par:

$$L_s = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{2\pi R_s} \right) \right| \quad (9)$$

On a déterminé expérimentalement une valeur de 20 m pour R_s , présent dans les équations (7) à (9).

Propagation des ondes millimétriques

Aux fréquences supérieures à environ 10 GHz, la distance à laquelle se situe le point de rupture de pente R_{bp} (voir l'équation (2)) est nettement supérieure au rayon maximum prévu de la cellule (500 m), ce qui signifie que dans cette bande de fréquences aucune loi en puissance quatre ne s'applique. En conséquence, le taux de décroissance de la puissance en fonction de la distance suivra presque la loi de propagation en espace libre avec un exposant d'affaiblissement sur le trajet d'environ 2,2. L'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère et à la pluie doit également être pris en considération.

Les calculs de l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques et à la pluie peuvent s'inspirer, respectivement, des Recommandations UIT-R P.676 et UIT-R P.530.

4.2 Modèles pour les situations NLoS

Dans une situation NLoS, le signal peut atteindre la BS ou la MS grâce à des mécanismes de propagation par diffraction ou par trajet multiple, ces derniers combinant diffraction et réflexion. Le présent paragraphe concerne des modèles se rapportant aux premiers mécanismes nommés.

Propagation des ondes décimétriques et centimétriques

Les modèles définis pour les deux situations décrites dans le § 3.1 sont valables pour les paramètres suivants:

h_b : 4 à 50 m

h_m : 1 à 3 m

f : 800 à 2 000 MHz pour $h_b \leq h_r$
800 à 5 000 MHz pour $h_b > h_r$

d : 20 à 5 000 m.

(Il est à noter que, bien que le modèle soit valable jusqu'à 5 km, la présente Recommandation s'applique à des distances maximales de 1 km.)

Propagation des ondes millimétriques

Dans la bande des fréquences millimétriques, la couverture du signal n'est prise en considération que dans des situations en LoS à cause du fort affaiblissement par diffraction qu'entraîne la présence d'obstacles sur le trajet de propagation qui devient alors NLoS. Dans ce dernier cas, le signal se propage selon un mode qui, très vraisemblablement, associe réflexion multiple et diffusion.

4.2.1 Propagation par dessus les toits des bâtiments

Le modèle de propagation par diffraction due à un effet d'écran multiple présenté ci-dessous est valable si les toits des bâtiments sont tous à peu près à la même hauteur. A supposer que les hauteurs de toits ne diffèrent que d'une valeur inférieure au rayon de la première zone de Fresnel sur un

trajet de longueur l (voir la Fig. 2), la hauteur de toits à utiliser dans le modèle est la hauteur de toits moyenne. Si la différence est supérieure à ce rayon, il est préférable d'utiliser les bâtiments les plus élevés se trouvant sur le trajet pour calculer la propagation par diffraction sur une arête en lame de couteau (voir la Recommandation UIT-R P.526) en lieu et place du modèle à effet d'écran multiple.

Dans le modèle proposé pour calculer l'affaiblissement de transmission dans le cas NLoS1 (voir la Fig. 2) lorsque les toits des bâtiments sont à la même hauteur ou presque, la perte entre antennes isotropes est égale à la somme de l'affaiblissement en espace libre, L_{bf} , de l'affaiblissement par diffraction entre les toits et la rue, L_{rts} , et la réduction, L_{msd} , due à la diffraction par effet d'écran multiple à travers les différentes rangées de bâtiments.

Dans ce modèle L_{bf} et L_{rts} sont indépendants de la hauteur de l'antenne de la BS, alors que L_{msd} varie selon que cette antenne se situe à la hauteur des toits des bâtiments, au-dessous ou au-dessus.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{pour } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{pour } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

L'affaiblissement en espace libre est donné par l'équation:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} (d / 1000) + 20 \log_{10} (f) \quad (11)$$

où:

- d : longueur du trajet (m)
- f : fréquence (MHz).

Le terme L_{rts} décrit le couplage de l'onde se propageant le long d'un trajet à effet d'écran multiple dans la rue où se trouve la station mobile. Il tient compte de la largeur de la rue et de son axe.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10} (w) + 10 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (\Delta h_m) + L_{ori} \quad (12)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{pour } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{pour } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{pour } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

où:

$$\Delta h_m = h_r - h_m \quad (14)$$

L_{ori} est le facteur de correction de l'axe de la rue qui tient compte de l'effet de diffraction entre les toits et la rue dans les rues qui ne sont pas perpendiculaires au sens de la propagation (voir la Fig. 2b)).

L'affaiblissement par diffraction par écrans multiples à partir de la BS, dû à la propagation à travers des rangées de bâtiments, dépend de la hauteur relative de l'antenne de la BS par rapport à la hauteur des bâtiments et de l'angle d'incidence. Un critère pour l'incidence rasante est celui de la «distance de stabilisation», d_s :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2} \quad (15)$$

où (voir la Fig. 2a)):

$$\Delta h_b = h_b - h_r \quad (16)$$

Pour le calcul de L_{msd} , on compare d_s à la distance l couverte par les immeubles.

Calcul de L_{msd} pour $l > d_s$

(Il est à noter que ce calcul devient plus précis quand $l \gg d_s$.)

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (17)$$

où:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{pour } h_b > h_r \\ 0 & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (18)$$

est un terme d'affaiblissement dépendant de la hauteur de la BS,

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{pour } h_b > h_r \text{ et } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ 54 & \text{pour } h_b > h_r \text{ et } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{pour } h_b \leq h_r \text{ et } d \geq 500 \text{ m} \\ 54 - 1,6\Delta h_b d / 1000 & \text{pour } h_b \leq h_r \text{ et } d < 500 \text{ m} \end{cases} \quad (19)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{pour } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (20)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{pour } f > 2000 \text{ MHz} \\ -4 + 0,7(f / 925 - 1) & \text{pour des villes de taille moyenne et des centres urbains} \\ -4 + 1,5(f / 925 - 1) & \text{pour des centres urbains et } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \end{cases} \quad (21)$$

Calcul de L_{msd} pour $l < d_s$

Dans ce cas, il convient de procéder à une autre distinction selon les hauteurs relatives de la BS et des toits.

$$L_{msd} = -10 \log_{10}(Q_M^2) \quad (22)$$

où:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{pour } h_b > h_r \\ \frac{b}{d} & \text{pour } h_b \approx h_r \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{pour } h_b < h_r \end{cases} \quad (23)$$

et

$$\theta = \arctg \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right) \quad (24)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \quad (25)$$

4.2.2 Propagation à l'intérieur de canyons urbains

En ce qui concerne les situations NLoS2 où les deux antennes sont au-dessous du niveau des toits, il faut prendre en considération les ondes diffractées et réfléchies aux coins des intersections des rues (voir la Fig. 3).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} \left(10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10} \right) \quad \text{dB} \quad (26)$$

où:

L_r : affaiblissement sur le trajet dû au phénomène de réflexion, défini par:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (27)$$

où:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{dB} \quad (28)$$

où $0,6 < \alpha \text{ [rad]} < \pi$.

L_d : affaiblissement sur le trajet dû au phénomène de diffraction, défini par:

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (29)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi} \right) \left[\arctg \left(\frac{x_2}{w_2} \right) + \arctg \left(\frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{dB} \quad (30)$$

4.3 Paramètres par défaut à utiliser pour les calculs relatifs à un site général

Si les données concernant la structure des bâtiments et des rues ne sont pas connues (situations relatives à un site général), il est recommandé d'utiliser les valeurs par défaut ci-dessous:

$$h_r = 3 \times (\text{nombre d'étages}) + \text{hauteur du toit (m)}$$

hauteur du toit = 3 m pour les toits en pente

= 0 m pour les toits plats

$$w = b/2$$

$$b = 20 \text{ à } 50 \text{ m}$$

$$\varphi = 90^\circ.$$

4.4 Incidence de la végétation

Les effets de la propagation au travers de la végétation (principalement des arbres) jouent un rôle important dans les prévisions de propagation sur de courts trajets à l'extérieur de bâtiments. Deux grands mécanismes de propagation peuvent être déterminés, à savoir:

- la propagation au travers des arbres (ni autour, ni au-dessus);
- la propagation par dessus les arbres.

Le premier mécanisme prédomine dans le cas où les deux antennes sont au-dessous de la cime des arbres et où la distance au travers des arbres est petite; le deuxième prédomine dans le cas où une seule antenne dépasse la cime des arbres. L'affaiblissement est fortement influencé par l'effet de diffusion par trajet multiple auquel donne lieu la diffraction de l'énergie du signal aussi bien au-dessus qu'au travers de la structure des arbres. En ce qui concerne la propagation au travers

d'arbres, l'affaiblissement linéique dû à la végétation fait l'objet de la Recommandation UIT-R P.833. Lorsque la propagation se fait par dessus les arbres, la diffraction est le principal mode de propagation par-delà le contour des arbres les plus proches de l'antenne implantée en position basse. Ce mode de propagation peut être modélisé très simplement en utilisant un modèle idéal de diffraction sur des arêtes en lame de couteau (voir la Recommandation UIT-R P.526), bien que ce modèle puisse sous-estimer la puissance du champ étant donné qu'il ignore l'effet de diffusion multiple dû à la cime des arbres, mécanisme qui peut être modélisé selon la théorie du transfert radiatif.

5 Affaiblissement de pénétration dans des bâtiments

L'affaiblissement de pénétration dans des bâtiments est le surcroît d'affaiblissement dû à la présence d'un mur (y compris fenêtres et autres éléments) d'une construction. Cet affaiblissement est défini par la différence entre les niveaux des signaux à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment, et ce à la même hauteur. Il faut également tenir compte de l'angle d'incidence. (Lorsque la longueur du trajet est inférieure à environ 10 m, il doit être tenu compte de la différence d'affaiblissement en espace libre due à la variation de longueur de trajet entre les deux mesures pour déterminer l'affaiblissement de pénétration dans des bâtiments. Pour des antennes situées à proximité du mur, il peut également être nécessaire d'étudier les effets de champ proche. Des affaiblissements supplémentaires interviendront lorsque le signal entrera à l'intérieur du bâtiment (voir la Recommandation UIT-R P.1238). On estime que, de façon générale, le mode de propagation dominant est celui où les signaux entrent dans un bâtiment à peu près à l'horizontale en passant au travers de la façade (ainsi que par les fenêtres) et que pour un bâtiment de construction uniforme l'affaiblissement de pénétration dans la structure est indépendant de la hauteur.

Il faut prendre en considération cet affaiblissement de pénétration lorsqu'on évalue la couverture radioélectrique entre un système se trouvant à l'extérieur d'un bâtiment et un terminal se trouvant à l'intérieur. Cet affaiblissement est également important pour étudier les problèmes de brouillage entre des systèmes situés à l'extérieur de bâtiments et des systèmes situés à l'intérieur.

Les résultats expérimentaux indiqués au Tableau 6 ont été obtenus à 5,2 GHz, le signal passant au travers de la façade d'un bâtiment réalisée en briques et en ciment et comportant des fenêtres vitrées; l'épaisseur du mur était de 60 cm et le rapport des fenêtres aux murs était d'environ de 2:1.

TABLEAU 6

Exemple d'affaiblissement de pénétration dans un bâtiment

Fréquence	Résidentiel		Bureau		Commercial	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
5,2 GHz			12 dB	5 dB		

Le Tableau 7 donne les résultats des mesures effectuées à 5,2 GHz à travers un mur extérieur constitué de blocs de pierre, pour des angles d'incidence compris entre 0° et 75°. Le mur avait une épaisseur de 400 mm, avec deux couches de blocs de 100 mm d'épaisseur séparées par un espace vide. S'agissant en particulier des angles d'incidence plus grands, l'affaiblissement dû au mur était extrêmement sensible à la position du récepteur, comme le montre la valeur importante de l'écart type.

TABLEAU 7

**Affaiblissement dû au mur de blocs de pierre,
pour différents angles d'incidence**

Angle d'incidence (degrés)	0	15	30	45	60	75
Affaiblissement dû au mur (dB)	28	32	32	38	45	50
Ecart type (dB)	4	3	3	5	6	5

Des informations complémentaires relatives à l'affaiblissement de pénétration dans un bâtiment et établies en premier lieu pour les systèmes à satellites peuvent être trouvées dans la Recommandation UIT-R P.679; elles peuvent être adaptées à l'estimation de la pénétration dans un bâtiment dans le cas de systèmes de Terre.

6 Modèles à trajets multiples

La Recommandation UIT-R P.1407 fournit une description de la propagation à trajets multiples et une définition de certains termes.

6.1 Modèles à trajets multiples dans le cas de canyons urbains

Les caractéristiques de l'étalement des retards dû aux trajets multiples, dans le cas en LoS dans un milieu urbain à bâtiments élevés en présence de microcellules et de picocellules (voir le Tableau 3), ont été définies sur la base de données mesurées à des fréquences comprises entre 2,5 GHz et 15,75 GHz pour des distances comprises entre 50 et 400 m. La valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards, S , à la distance d suit une distribution normale, la valeur moyenne étant donnée par:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \quad (31)$$

et l'écart type étant donné par:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \quad (32)$$

où C_a , γ_a , C_σ et γ_σ dépendent de la hauteur d'antenne et de l'environnement de propagation. Le Tableau 8 donne certaines valeurs types des coefficients pour des distances comprises entre 50 et 400 m, établies sur la base de mesures faites dans des zones urbaines ou résidentielles.

TABLEAU 8

Valeurs types des coefficients pour des caractéristiques de distance associées à la valeur quadratique moyenne de l'étalement du temps de propagation

Conditions de mesure				a_s		σ_s	
Zone	f (GHz)	h_b (m)	h_m (m)	C_a	γ_a	C_σ	γ_σ
Urbaine	2,5	6,0	3,0	55	0,27	12	0,32
	3,35-15,75	4,0	2,7	23	0,26	5,5	0,35
			1,6	10	0,51	6,1	0,39
	3,35-8,45	0,5					
Résidentielle	3,35	4,0	2,7	2,1	0,53	0,54	0,77
	3,35-15,75		1,6	5,9	0,32	2,0	0,48

D'après les données mesurées à 2,5 GHz la forme moyenne du profil des retards était la suivante:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{dB} \quad (33)$$

où:

P_0 : puissance de crête (dB)

τ : facteur de décroissance

et t est exprimé en ns.

A partir des données mesurées, pour une valeur quadratique moyenne d'étalement des retards S , il est possible d'estimer τ comme étant égal à:

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{ns} \quad (34)$$

Une relation linéaire entre τ et S est valable uniquement dans le cas en LoS.

A partir du même ensemble de données mesurées, on a caractérisé en outre les propriétés instantanées du profil des retards. L'énergie arrivant dans les 40 premières ns a une distribution de Rice avec un facteur K d'environ 6 à 9 dB, alors que l'énergie arrivant plus tard a une distribution soit de Rayleigh, soit de Rice avec un facteur K de 3 dB environ au minimum. (Voir la Recommandation UIT-R P.1057 pour la définition des distributions de probabilité.)

6.2 Modèles à trajets multiples dans le cas de la propagation par dessus les toits

Les caractéristiques de l'étalement des retards dû aux trajets multiples en LoS et en NLoS dans un milieu urbain à bâtiments élevés en présence de macrocellules de petites tailles (définies au Tableau 3) ont été déterminées à partir de données mesurées à 1920-1980 MHz et 2110-2170 MHz avec des antennes omnidirectionnelles. Dans cet environnement, la valeur médiane de la valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards S est donnée par:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \quad (35)$$

où $A = 0,038$, $B = 2,3$, L étant l'affaiblissement sur le trajet (dB).

A l'aide de ces mesures, on a comparé les valeurs quadratiques moyennes de l'étalement des retards en chaque emplacement dans différentes bandes de fréquences (espacées de 190 MHz). Dans plus de 10% des emplacements, on a observé des variations de plus de 300 ns pour la valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards avec un seuil à 25 dB et de plus de 2 μ s pour l'intervalle de retard avec un seuil à 15 dB.

Des mesures ont permis d'obtenir les distributions des retards dus aux trajets multiples pour la bande des 5,2 GHz dans un environnement suburbain avec une hauteur d'antenne de station de base de 20 m, et une hauteur d'antenne de station mobile de 2,8 m. Dans le Tableau 9 sont énumérés les étalements quadratiques moyens des retards mesurés pour la bande des 5,2 GHz dans les cas où la probabilité cumulative est de 50% et de 95%.

TABLEAU 9
Étalements quadratiques moyens types des retards^(*)

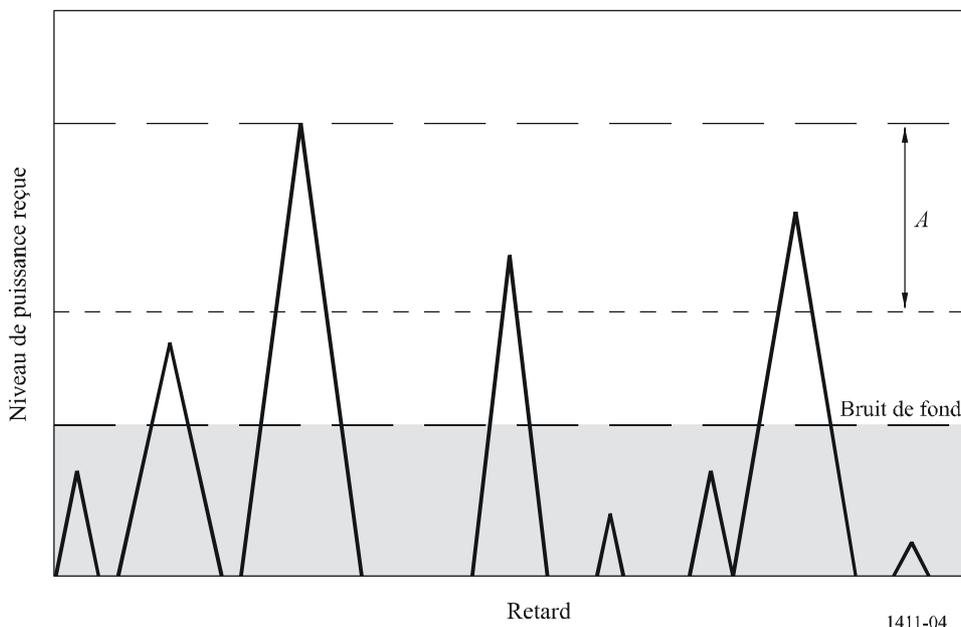
Conditions de mesure					Étalements quadratiques moyens des retards (nsec)	
Zone	Fréquence (GHz)	Hauteur de l'antenne		Portée (m)	50%	95%
		h_{BS} (m)	h_r (m)			
Suburbaine	5,2	20	2,8	100-1 000	189	577

^(*) On a employé une valeur de seuil de 30 dB pour le calcul des étalements quadratiques moyens des retards.

7 Nombre de composantes du signal

Pour la conception de systèmes à haut débit de données s'appuyant sur des techniques de séparation et de synthèse à trajet multiple, il est important d'évaluer le nombre de composantes du signal (c'est-à-dire, la composante principale plus les composantes à trajet multiple) parvenant au récepteur. Comme le montre la Fig. 4, on peut représenter le nombre de composantes du signal à partir du profil des retards comme étant le nombre de crêtes dont les amplitudes se trouvent à moins de A dB de la crête la plus haute et dépassent le bruit de fond.

FIGURE 4
Définition pour la détermination du nombre de crêtes



On trouvera dans les Tableaux 10 à 12 les résultats des mesures pour trois scénarios différents (antenne de station de base de faible hauteur (BS) en zone urbaine; antenne de station de base de grande hauteur en zone urbaine; antenne de station de base de faible hauteur en zone résidentielle). La résolution temporelle des mesures était de 20 ns. Les résultats des mesures effectuées avec une antenne de station de base de grande hauteur en milieu suburbain sont présentés dans le Tableau 13. La résolution temporelle de ces mesures était de 50 ns. Les tableaux suivants indiquent le nombre maximal de composantes du signal observées pour 80% ou 95% des emplacements de l'antenne, pour chacun des scénarios.

TABLEAU 10

Nombre maximal de composantes du signal (mesures faites avec une antenne de station de base de faible hauteur, en zone urbaine)

Fréquence (GHz)	Hauteur de l'antenne (m)		Distance (m)	Nombre maximal de composantes du signal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
			0-1 000	2	3	2	4	5	9
8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
			0-1 000	1	2	2	4	4	8
15,75	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	5
			0-1 000	2	3	2	4	6	10

TABLEAU 11

Nombre maximal de composantes du signal (mesures faites avec une antenne de station de base de grande hauteur, en zone urbaine)

Fréquence (GHz)	Hauteur de l'antenne (m)		Distance (m)	Nombre maximal de composantes du signal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	13
8,45	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	12

TABLEAU 12

Nombre maximal de composantes du signal (mesures faites avec une antenne de station de base de faible hauteur, en zone résidentielle)

Fréquence (GHz)	Hauteur de l'antenne (m)		Distance (m)	Nombre maximal de composantes du signal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	4	2,7	0-480	2	2	2	2	2	3

TABLEAU 13

Nombre maximal de composantes du signal (mesures faites avec une antenne de station de base de grande hauteur, en zone suburbaine)

Fréquence (GHz)	Hauteur d'antenne (m)		Distance (m)	Nombre maximal de composantes du signal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5

8 Caractéristiques de polarisation

La discrimination de polarisation croisée (XPD), telle qu'elle est définie dans la Recommandation UIT-R P.310, diffère selon que la zone soit LoS ou NLoS en présence de microcellules exploitées en ondes centimétriques. Les mesures indiquent respectivement une valeur médiane de discrimination de polarisation croisée et un écart type de 13 dB et 3 dB sur les trajets LoS et de 8 dB et 2 dB sur les trajets NLoS dans la gamme des ondes centimétriques. Ces valeurs médianes

sont compatibles avec celles qui sont indiquées respectivement dans la Recommandation UIT-R P.1406 pour la propagation des ondes décimétriques dans les zones dégagées ou dans les zones urbaines.

9 Caractéristiques de la direction d'arrivée

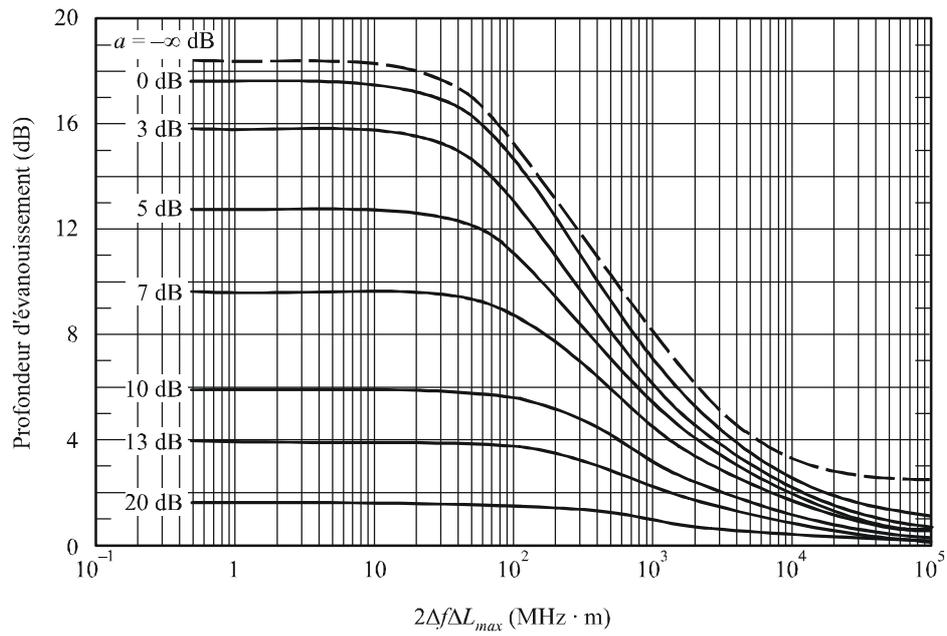
La valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire (défini dans la Recommandation UIT-R P.1407) dans la direction de l'azimut en présence de microcellules ou de picocellules dans un milieu urbain a été déterminée sur la base de mesures faites à 8,45 GHz. La station de base réceptrice était équipée d'une antenne parabolique avec une ouverture de faisceau à mi-puissance de 4°. La hauteur d'antenne de la station mobile émettrice était de 2,7 m et celle de la station de base réceptrice de 4,4 m.

La valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire est en moyenne de 30° (écart type de 11°) dans une situation LoS et de 41° (écart type de 18°) dans une situation NLoS.

10 Caractéristiques d'évanouissement

La profondeur de l'évanouissement, qui est définie comme la différence entre la valeur de 50% et celle de 1% pour la probabilité cumulative des niveaux de signaux reçus, s'exprime comme une fonction du produit ($2\Delta f\Delta L_{max}$ MHz·m) de la largeur de bande des signaux reçus $2\Delta f$ MHz et de la différence maximale des longueurs des trajets de propagation ΔL_{max} m, comme illustré dans la Fig. 5. ΔL_{max} est la différence maximale des longueurs des trajets de propagation entre composantes dont le niveau dépasse le seuil, qui est inférieur de 20 dB au niveau le plus élevé des ondes sans visibilité directe, comme représenté dans la Fig. 6. Dans cette Figure, a (dB) est le rapport de la puissance des ondes à visibilité directe à celle de la somme des ondes sans visibilité directe, $a = -\infty$ dB correspondant à une situation sans visibilité directe. Lorsque $2\Delta f\Delta L_{max}$ est inférieur à 10 MHz·m, les niveaux des signaux reçus à visibilité directe et sans visibilité directe suivant les distributions de Rayleigh et Nakagami-Rice, correspondent à une région d'évanouissement de bande étroite. Lorsque le produit est supérieur à 10 MHz·m, cela correspond à une région d'évanouissement de large bande, tandis que la profondeur de l'évanouissement devient plus petite et que les niveaux des signaux reçus ne suivent ni la distribution de Rayleigh ni celle de Nakagami-Rice.

FIGURE 5

Relation entre la profondeur de l'évanouissement et $2\Delta f\Delta L_{max}$  a : Rapport de la puissance

1411-05

FIGURE 6

Modèle permettant de calculer ΔL_{max}
