

## RECOMMANDATION UIT-R P.1411-4

**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)

(1999-2001-2003-2005-2007)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation établit des directives en ce qui concerne la propagation à courte portée à l'extérieur de bâtiments pour la gamme de fréquences comprise entre 300 MHz et 100 GHz. Elle contient des informations concernant les modèles d'affaiblissement sur le trajet pour les environnements en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) et sans visibilité directe (NLoS, *non-line-of-sight*), l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments, les modèles à trajets multiples dans le cas de canyons urbains et dans le cas de la propagation par-dessus les toits, le nombre de composantes du signal, les caractéristiques de polarisation et les caractéristiques d'évanouissement.

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"> <li>– Véritables «canyons urbains», c'est-à-dire rues encaissées entre des bâtiments de plusieurs étages chacun</li> <li>– La propagation par-dessus les toits des bâtiments est peu probable à cause de leur hauteur</li> <li>– Les temps de propagation risquent d'être longs à cause de l'existence de rangées de bâtiments de grande hauteur</li> <li>– Les nombreux véhicules se déplaçant dans la zone sont autant d'obstacles qui réfléchissent les ondes et ajoutent un effet Doppler aux ondes réfléchies</li> </ul>
Urbain/suburbain faiblement élevé	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se caractérise par des rues larges</li> <li>– Risque de diffraction par-dessus les toits des bâtiments qui comptent en général moins de trois étages</li> <li>– Les véhicules en mouvement peuvent parfois donner lieu à des phénomènes de réflexion et d'occultation</li> <li>– Principales conséquences: temps de propagation importants et effet Doppler faible</li> </ul>

TABLEAU 1 (*fin*)

Milieu	Description et dégradations liées aux phénomènes de propagation entrant en jeu
Résidentiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Habitations de un ou deux étages</li> <li>– Les rues sont en général à deux voies et des voitures sont stationnées le long des bas-côtés</li> <li>– Possibilité de feuillage plus ou moins dense</li> <li>– Trafic automobile habituellement léger</li> </ul>
Rural	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Petites maisons entourées de grands jardins</li> <li>– Incidences de la topographie</li> <li>– Possibilité de feuillage plus ou moins dense</li> <li>– Trafic automobile parfois élevé</li> </ul>

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
Microcellule	0,05 à 1 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 en milieu urbain dense	0,05 à 0,5 km	En extérieur; installée au-dessous du niveau moyen des toits
Picocellule	Jusqu'à 50 m	En intérieur ou en extérieur (installée au-dessous du niveau des toits)

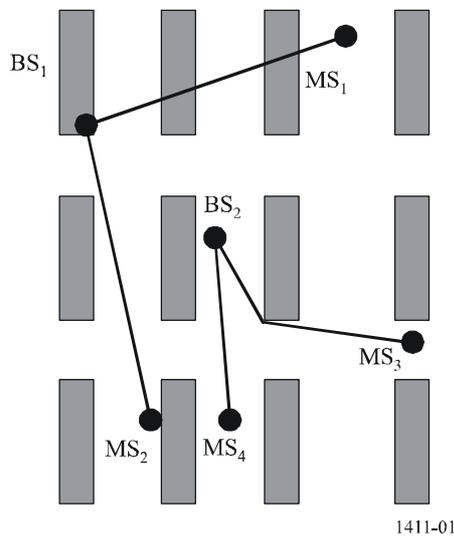
(Il est à noter que l'expression «microcellule en milieu urbain dense» n'est pas expressément définie dans les Recommandations de la Commission d'études 8 des radiocommunications.)

### 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 BS<sub>1</sub> est installée au-dessus du niveau des toits; la cellule correspondante est une microcellule: 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 BS<sub>2</sub> détermine un environnement microcellulaire urbain dense 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 BS<sub>2</sub>.

FIGURE 1  
Situations types de propagation en zones urbaines

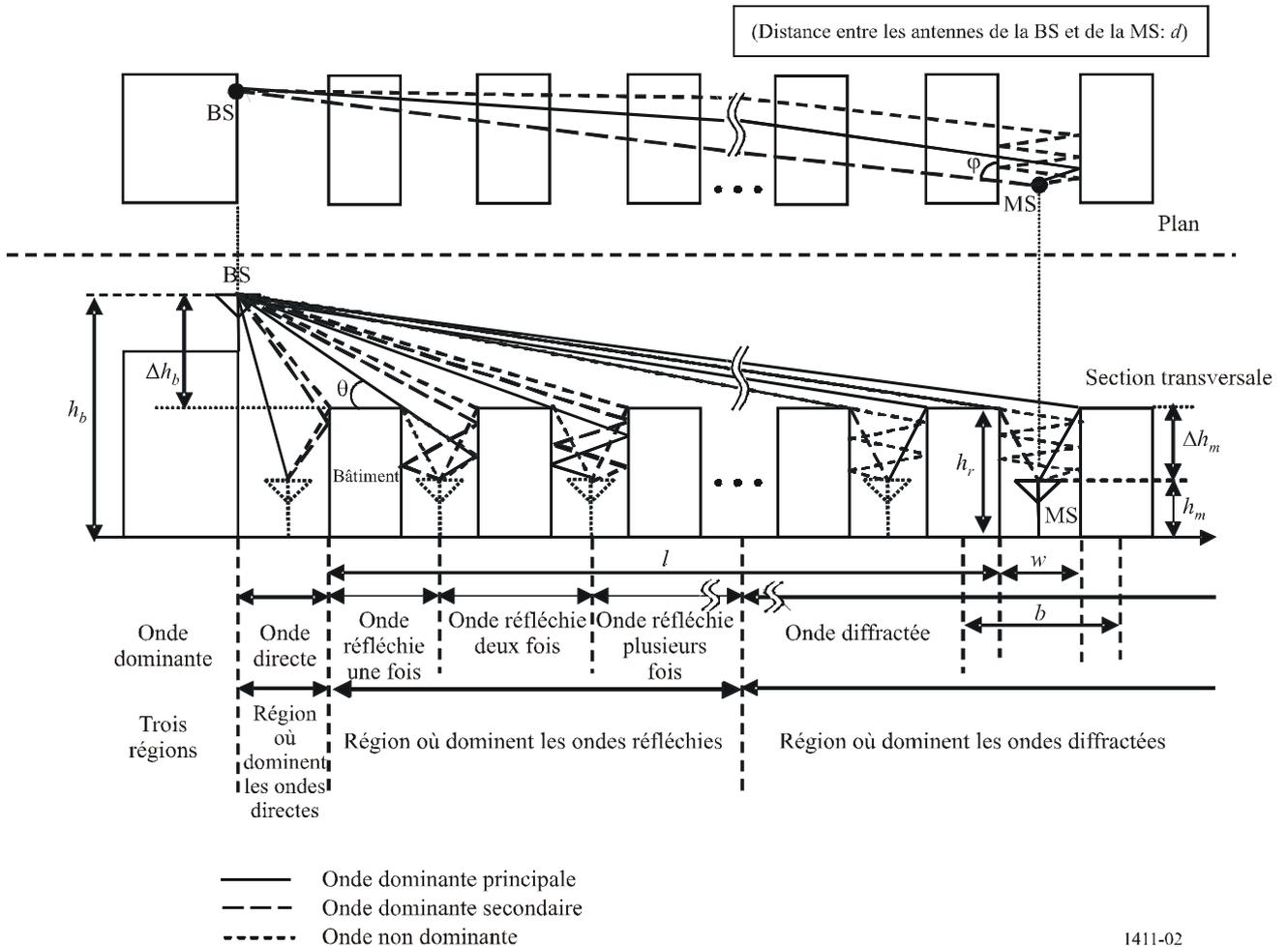


##### 3.1.1 Propagation par dessus les toits, sans visibilité directe (NLoS, *non-line-of-sight*)

Le cas type NLoS (liaison entre BS<sub>1</sub> et MS<sub>1</sub> 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



Les paramètres correspondant à cette situation sont:

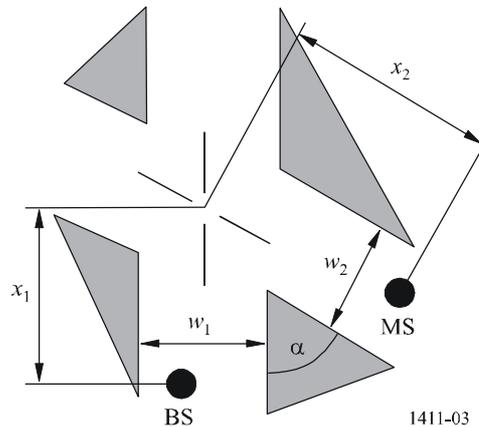
- $h_r$ : hauteur moyenne des bâtiments (m)
- $w$ : largeur de la rue (m)
- $b$ : distance moyenne entre les bâtiments (m)
- $\phi$ : angle (degrés) entre l'axe de la rue et le trajet direct (onde incidente)
- $h_b$ : hauteur de l'antenne de la BS (m)
- $h_m$ : hauteur de l'antenne de la MS (m)
- $l$ : 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 microcellules. 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  $\phi$  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 en milieu urbain dense (liaison entre BS<sub>2</sub> et MS<sub>3</sub> 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)
- $\alpha$ : 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 en milieu urbain dense 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 BS<sub>1</sub>-MS<sub>2</sub> et BS<sub>2</sub>-MS<sub>4</sub> 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:

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

où  $\lambda$  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 en zone urbaine*

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 5 000 MHz  
2 à 16 GHz pour  $h_b < h_r$  et  $w_2 < 10$  m (ou trottoir)
- $d$ : 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 en zone suburbaine*

Le modèle défini pour la situation décrite au § 3.1 ( $h_b > h_r$ ) est valable pour les paramètres suivants:

- $h_r$ : hauteur m quelconque
- $\Delta h_b$ : 1 à 100 m
- $\Delta h_m$ : 4 à 10 (inférieur à  $h_r$ ) m
- $h_b$ :  $h_r + \Delta h_b$  m
- $h_m$ :  $h_r - \Delta h_m$  m
- $f$ : 0,8 à 20 GHz
- $w$ : 10 à 25 m
- $d$ : 10 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. Le calcul de  $L_{msd}$  utilise la procédure suivante pour supprimer toute discontinuité entre les différents modèles utilisés lorsque la longueur des bâtiments est supérieure ou inférieure à la «distance de stabilisation».

Le modèle général de propagation par diffraction due à un effet d'écran multiple est donné par l'équation:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\operatorname{tg} h \left( \frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi} \right) \cdot (L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{pour } l > d_s \text{ et } dh_{bp} > 0 \\ \operatorname{tg} h \left( \frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi} \right) \cdot (L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{pour } l \leq d_s \text{ et } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{pour } dh_{bp} = 0 \\ L1_{msd}(d) - \operatorname{tg} h \left( \frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta} \right) \cdot (L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{pour } l > d_s \text{ et } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d) + \operatorname{tg} h \left( \frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta} \right) \cdot (L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{pour } l \leq d_s \text{ et } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

où:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low} \quad (18)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot \nu \quad (19)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2} \quad (20)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}) \quad (21)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (22)$$

et:

$$d_{bp} = |\Delta h_b| \sqrt{\frac{l}{\lambda}} \quad (23)$$

$$\nu = [0,0417]$$

$$\chi = [0,1]$$

où les affaiblissements de chacun des modèles,  $L1_{msd}(d)$  et  $L2_{msd}(d)$ , sont définis comme suit:

*Calcul de  $L1_{msd}$  pour  $l > d_s$*

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

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (24)$$

où:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{pour } h_b > h_r \\ 0 & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (25)$$

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

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{pour } h_b > h_r \text{ et } f > 2000 \text{ MHz} \\ 73 - 0,8\Delta h_b & \text{pour } h_b \leq h_r, f > 2000 \text{ MHz et } d \geq 500 \text{ m} \\ 73 - 1,6\Delta h_b d / 1000 & \text{pour } h_b \leq h_r, f > 2000 \text{ MHz et } d < 500 \text{ m} \\ 54 & \text{pour } h_b > h_r \text{ et } f \leq 2000 \text{ MHz} \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{pour } h_b \leq h_r, f \leq 2000 \text{ MHz et } d \geq 500 \text{ m} \\ 54 - 1,6\Delta h_b d / 1000 & \text{pour } h_b \leq h_r, f \leq 2000 \text{ MHz et } d < 500 \text{ m} \end{cases} \quad (26)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{pour } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (27)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{pour } f > 2000 \text{ MHz} \\ -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{pour des villes de taille moyenne et des agglomérations urbaines} \\ & \text{comptant une densité d'arbres moyenne et } f \leq 2000 \text{ MHz} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{pour des centres urbains et } f \leq 2000 \text{ MHz} \end{cases} \quad (28)$$

Calcul de  $L2_{msd}$  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:

$$L2_{msd}(d) = -10 \log_{10} (Q_M^2) \quad (29)$$

où:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left( \frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{pour } h_b > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{pour } h_b \leq h_r + \delta h_u \text{ et } h_b \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{pour } h_b < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (30)$$

et

$$\theta = \arctg \left( \frac{\Delta h_b}{b} \right) \quad (31)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \quad (32)$$

et:

$$\delta h_u = 10^{-\log \left( \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right) - \frac{\log(d)}{9} + \frac{10}{9} \log \left( \frac{b}{2,35} \right)} \quad (33)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923 \quad (34)$$

### 4.2.2 Propagation par-dessus les toits des bâtiments en zone suburbaine

Un modèle de propagation correspondant au cas NLoS1 utilisant l'optique géométrique (GO, *geometrical optics*) est représenté sur la Fig. 2. Cette Figure indique que la composition des ondes qui arrivent dans la MS varie en fonction de la distance entre la BS et la MS. Une onde directe ne peut arriver à la MS que lorsque la distance entre la BS et la MS est très courte. Les ondes réfléchies une, deux ou trois fois, qui ont un niveau relativement élevé, peuvent arriver à la MS si la distance qui sépare la BS et la MS est relativement courte. Si la distance est longue, les ondes réfléchies plusieurs fois ne peuvent pas arriver à destination et seules des ondes réfléchies à de nombreuses reprises, qui ont un niveau peu élevé hormis celui des ondes réfléchies par les toits des bâtiments, arrivent à la MS. Compte tenu de ces mécanismes de propagation, l'affaiblissement dû à la distance entre antennes isotropes peut se diviser en trois régions en fonction des ondes dominantes qui arrivent à la MS, à savoir la région où dominant les ondes directes, la région où dominant les ondes réfléchies et la région où dominant les ondes diffractées. L'affaiblissement dans chaque région est exprimé comme suit selon l'optique géométrique:

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{pour } d < d_0 \text{ (région où dominant les ondes directes)} \\ L_{0n} & \text{pour } d_0 < d \leq d_n \text{ (région où dominant les ondes réfléchies)} \\ 32,1 \cdot \log\left(\frac{d}{d_n}\right) + L_{d_n} & \text{pour } d > d_n \text{ (région où dominant les ondes diffractées)} \end{cases} \quad (35)$$

$$n = \begin{cases} 2 & (0,8 \text{ GHz} \leq f < 5 \text{ GHz}) \\ 3 & (5 \text{ GHz} \leq f < 20 \text{ GHz}) \end{cases}$$

où:

$$L_{0n} = \begin{cases} \text{lorsque } d_k < d \leq d_{k+1} & (k=0, \dots, n-1) & n = \begin{cases} 2 & (0,8 \text{ GHz} \leq f < 5 \text{ GHz}) \\ 3 & (5 \text{ GHz} \leq f < 20 \text{ GHz}) \end{cases} \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k) & & \end{cases} \quad (36)$$

$$d_k = \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \sqrt{B_k^2 + (h_b - h_m)^2} \quad (37)$$

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log\left\{ \frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda} \right\} \quad (38)$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \cdot \sqrt{A_k^2 + (h_b - h_m)^2} \quad (39)$$

$$A_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k+1)}{2 \cdot (h_r - h_m)} \quad (40)$$

$$B_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k+1)}{2 \cdot (h_r - h_m)} - k \cdot w \quad (41)$$

$$\varphi_k = \text{tg}^{-1} \left( \frac{B_k}{A_k} \cdot \text{tg} \varphi \right) \quad (42)$$

#### 4.2.3 Propagation à l'intérieur de canyons urbains dans la gamme de fréquences comprise entre 800 et 2 000 MHz

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).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} \left( 10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10} \right) \quad \text{dB} \quad (43)$$

où:

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

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (44)$$

où:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{dB} \quad (45)$$

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

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

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left( 90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (46)$$

$$D_a = \left( \frac{40}{2\pi} \right) \left[ \text{arctg} \left( \frac{x_2}{w_2} \right) + \text{arctg} \left( \frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{dB} \quad (47)$$

#### 4.2.4 Propagation à l'intérieur de canyons urbains dans la gamme de fréquences comprise entre 2 et 16 GHz

Le modèle de propagation pour les situations NLoS2 décrit dans le § 3.1.2 pour  $\alpha$  (angle à l'intersection des deux rues (rad)) =  $\pi/2$  rad a été établi à partir de mesures effectuées dans la gamme de fréquences comprises entre 2 et 16 GHz, où  $h_b < h_r$  et  $w_2$  (largeur de la rue (ou du trottoir) à l'emplacement de la MS) est inférieure ou égale à 10 m. Les caractéristiques d'affaiblissement sur le trajet peuvent se diviser en deux parties: la région d'affaiblissement à l'intersection des deux rues et la région NLoS. La région d'affaiblissement à l'intersection des deux rues, pour la distance  $d_{corner}$ , commence à partir d'un point situé à un mètre en contrebas du coin de la rue LoS et se prolonge dans la rue NLoS. L'affaiblissement à l'intersection des deux rues,  $L_{corner}$ , est exprimé comme étant l'affaiblissement additionnel sur la distance  $d_{corner}$ . La région NLoS se situe au delà de la région d'affaiblissement à l'intersection des deux rues, où un coefficient,  $\beta$ , s'applique. Cela est illustré par la courbe type de la Fig. 4. Pour des valeurs de  $x_1$ ,  $x_2$ , et  $w_1$  telles que représentées sur la Fig. 3, on obtient l'affaiblissement global sur le trajet,  $L_{NLoS2}$ , au delà de la région à l'intersection des deux rues ( $x_2 > w_1/2 + 1$ ) en utilisant les équations:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_c + L_{att}, \quad (48)$$

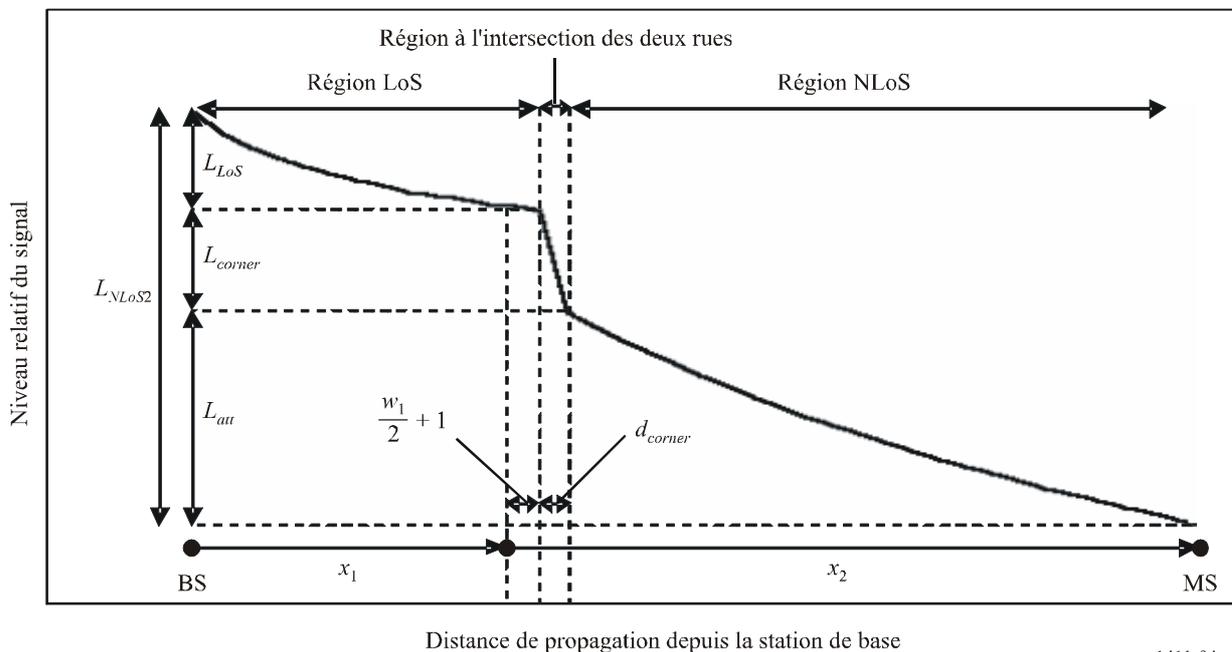
$$L_c = \begin{cases} \frac{L_{corner}}{1 - \log_{10}(1 + d_{corner})} \{1 - \log_{10}(x_2 - w_1/2)\} & x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{corner} \\ L_{corner} & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases} \quad (49)$$

$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta \log_{10} \left( \frac{x_1 + x_2}{x_1 + w_1/2 + d_{corner}} \right) & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \\ 0 & x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases} \quad (50)$$

où  $L_{LoS}$  est l'affaiblissement sur le trajet dans la rue LoS pour  $x_1$  ( $> 20$  m), calculé comme indiqué au § 4.1. Dans l'équation (49),  $L_{corner}$  est indiqué comme étant égal à 20dB dans un environnement urbain et à 30 dB dans un environnement résidentiel. Dans l'équation (50),  $\beta$  est indiqué comme étant égal à 6 et la distance  $d_{corner}$  est indiquée comme étant égale à 30 m dans les deux environnements.

FIGURE 4

Tendance type de la propagation le long de canyons urbains pour une antenne de station de base de faible hauteur dans la gamme de fréquences comprise entre 2 et 16 GHz



1411-04

Dans un environnement résidentiel, l'affaiblissement sur le trajet n'augmente pas de façon régulière avec la distance; en conséquence, le coefficient peut prendre une valeur plus petite que dans un environnement urbain, en raison de la présence d'allées et d'espaces entre les maisons.

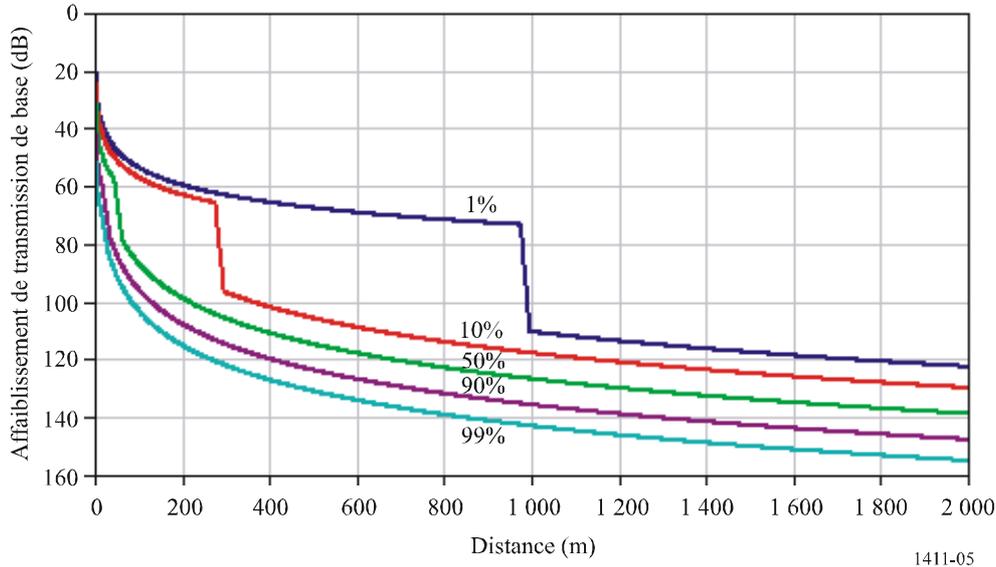
Avec une antenne de station de base de grande hauteur dans une macrocellule de petite taille, les effets de diffraction par-dessus les toits sont plus sensibles. En conséquence, les caractéristiques de propagation ne dépendent pas de l'affaiblissement à l'intersection des deux rues.

### 4.3 Propagation en ondes décimétriques entre terminaux situés au-dessous de la hauteur des toits

Le modèle décrit ci-dessous est destiné à calculer l'affaiblissement de transmission de base entre deux terminaux situés à une petite hauteur dans des environnements urbains. Il inclut à la fois les régions LoS et NLoS et il modélise la décroissance rapide du niveau du signal observée à l'intersection entre la région LoS et la région NLoS. Le modèle inclut les statistiques de variabilité d'emplacement dans les régions LoS et NLoS et offre un modèle statistique pour la distance

d'intersection entre les régions LoS et NLoS. La Fig. 5 indique les régions LoS, NLoS et à l'intersection des deux rues, ainsi que la variabilité statistique prévue par le modèle.

FIGURE 5  
 Courbes de l'affaiblissement de transmission de base non dépassé  
 pour 1, 10, 50, 90 et 99% des emplacements  
 (fréquence = 400 MHz, environnement suburbain)



Ce modèle est recommandé pour la propagation entre deux terminaux équipés d'antennes de faible hauteur se situant pratiquement au niveau de la rue, et bien au-dessous de la hauteur des toits, mais par ailleurs non spécifiés. Il s'applique aussi bien à l'émetteur qu'au récepteur et est valable pour les fréquences de la gamme 300-3 000 MHz. Le modèle est basé sur des mesures effectuées dans la bande des ondes décimétriques pour des hauteurs d'antenne comprises entre 1,9 et 3,0 m au-dessus du sol et des distances maximales de 3 000 m entre l'émetteur et le récepteur.

Les paramètres nécessaires sont la fréquence  $f$  (MHz) et la distance entre les terminaux  $d$  (m).

- 1) Calculer la valeur médiane de l'affaiblissement en LoS:

$$L_{LoS}^{median}(d) = 32,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} (d/1000) \quad (51)$$

- 2) Pour le pourcentage d'emplacements nécessaires,  $p$  (%), calculer la correction d'emplacement LoS:

$$\Delta L_{LoS}(p) = 1,5624 \sigma \left( \sqrt{-2 \ln(1 - p/100)} - 1,1774 \right), \text{ pour } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (52)$$

A défaut, les valeurs de la correction LoS pour  $p = 1, 10, 50, 90$  et  $99\%$  sont indiquées dans le Tableau 6.

- 3) Ajouter la correction d'emplacement LoS à la valeur médiane de l'affaiblissement LoS:

$$L_{LoS}(d, p) = L_{LoS}^{median}(d) + \Delta L_{LoS}(p) \quad (53)$$

- 4) Calculer la valeur médiane de l'affaiblissement NLoS:

$$L_{NLoS}^{median}(d) = 9,5 + 45 \log_{10} f + 40 \log_{10}(d/1000) + L_{urban} \quad (54)$$

$L_{urban}$  dépend de la catégorie d'environnement urbain; sa valeur est de 0 dB pour un environnement suburbain, de 6,8 dB pour un environnement urbain et de 2,3 dB pour un environnement urbain dense à bâtiments élevés.

- 5) Pour le pourcentage d'emplacements nécessaires,  $p$  (%), ajouter la correction d'emplacement NLoS:

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}(p/100), \text{ pour } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (55)$$

$N^{-1}(\cdot)$  est la fonction de distribution cumulative normale inverse. Une approximation de cette fonction, valable pour  $p$  compris entre 1 et 99%, est donnée par la fonction de variabilité d'emplacement  $Q_i(x)$  de la Recommandation UIT-R P.1546. A défaut, les valeurs de la correction d'emplacement NLoS pour  $p = 1, 10, 50, 90$  et 99% sont indiquées dans le Tableau 6.

- 6) Ajouter la correction d'emplacement NLoS à la valeur médiane de l'affaiblissement NLoS:

$$L_{NLoS}(d, p) = L_{NLoS}^{median}(d) + \Delta L_{NLoS}(p) \quad (56)$$

- 7) Pour le pourcentage d'emplacements nécessaires,  $p$  (%), calculer la distance  $d_{LoS}$  pour laquelle la fraction LoS  $F_{LoS}$  est égale à  $p$ :

$$\begin{aligned} d_{LoS}(p) &= 212[\log_{10}(p/100)]^2 - 64 \log_{10}(p/100) && \text{si } p < 45 \\ d_{LoS}(p) &= 79,2 - 70(p/100) && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (57)$$

Les valeurs de  $d_{LoS}$  pour  $p = 1, 10, 50, 90$  et 99% sont indiquées dans le Tableau 6. Ce modèle n'a pas été testé pour  $p < 0,1\%$ . Les statistiques ont été recueillies dans deux villes du Royaume-Uni et peuvent être différentes dans d'autres villes. A défaut, si l'on connaît la distance à l'intersection des deux rues dans un cas particulier, appliquer cette distance à  $d_{LoS}(p)$ .

- 8) L'affaiblissement sur le trajet à la distance  $d$  est alors donné comme suit:

- Si  $d < d_{LoS}$ , alors  $L(d, p) = L_{LoS}(d, p)$
- Si  $d > d_{LoS} + w$ , alors  $L(d, p) = L_{NLoS}(d, p)$
- Dans les autres cas, interpoler linéairement entre les valeurs  $L_{LoS}(d_{LoS}, p)$  et  $L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$ :

$$\begin{aligned} L_{LoS} &= L_{LoS}(d_{LoS}, p) \\ L_{NLoS} &= L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p) \\ L(d, p) &= L_{LoS} + (L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS})/w \end{aligned}$$

La largeur  $w$  est introduite pour créer une région de transition entre les régions LoS et NLoS. Cette région de transition apparaît dans les données et a généralement une largeur de  $w = 20$  m.

TABLEAU 6

Table des corrections de variabilité d'emplacement LoS et NLoS

$p$ (%)	$\Delta L_{LoS}$ (dB)	$\Delta L_{NLoS}$ (dB)	$d_{LoS}$ (m)
1	-11,3	-16,3	976
10	-7,9	-9,0	276
50	0,0	0,0	44
90	10,6	9,0	16
99	20,3	16,3	10

#### 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 7 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 7

**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 8 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 8

**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 en milieu urbain dense 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:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \quad (58)$$

et l'écart type étant donné par:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \quad (59)$$

où  $C_a$ ,  $\gamma_a$ ,  $C_\sigma$  et  $\gamma_\sigma$  dépendent de la hauteur d'antenne et de l'environnement de propagation. Le Tableau 9 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 9

#### 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				$a_s$		$\sigma_s$	
Zone	$f$ (GHz)	$h_b$ (m)	$h_m$ (m)	$C_a$	$\gamma_a$	$C_\sigma$	$\gamma_\sigma$
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
			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:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{dB} \quad (60)$$

où:

$P_0$ : puissance de crête (dB)

$\tau$ : 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  $\tau$  comme étant égal à:

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{ns} \quad (61)$$

Une relation linéaire entre  $\tau$  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 microcellules (définies au Tableau 3) ont été déterminées à partir de données mesurées à 1 920-1 980 MHz et 2 110-2 170 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:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \quad (62)$$

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  $\mu$ 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 10 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 10

Etalements quadratiques moyens types des retards<sup>(\*)</sup>

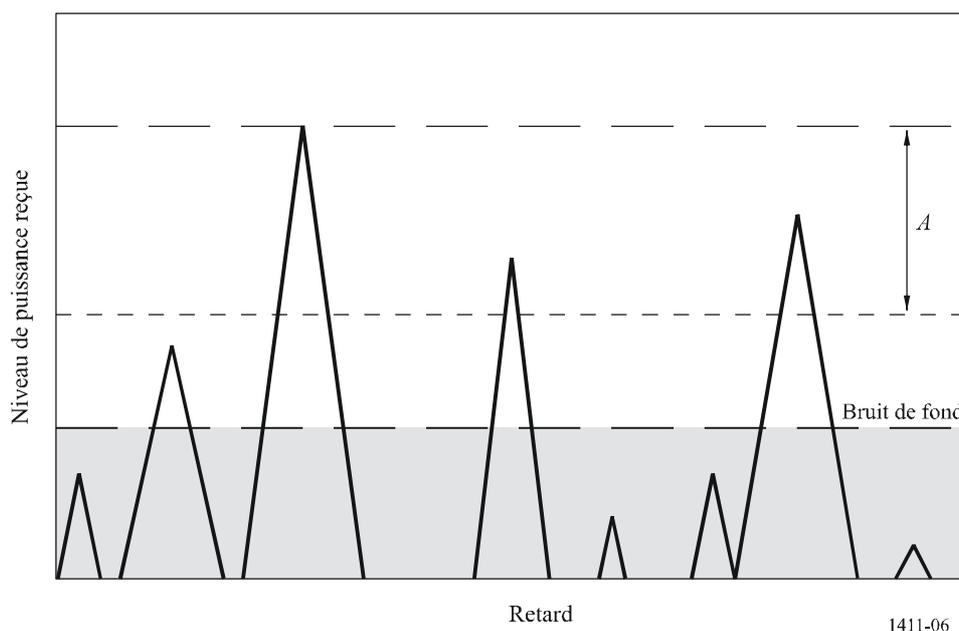
Conditions de mesure				Etalements quadratiques moyens des retards (ns)		
Zone	Fréquence (GHz)	Hauteur de l'antenne		Portée (m)	50%	95%
		$h_{BS}$ (m)	$h_r$ (m)			
Suburbaine	5,2	20	2,8	100-1 000	189	577

<sup>(\*)</sup> 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. 6, 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 6  
Définition pour la détermination du nombre de crêtes



On trouvera dans le Tableau 11 les résultats des mesures du nombre de composantes du signal effectuées dans différents scénarios pour différentes hauteurs d'antenne, différents environnements et différentes fréquences.

TABLEAU 11  
**Nombre maximal de composantes du signal**

Type d'environnement	Retard	Fréquence (GHz)	Hauteur d'antenne (m)		Portée (m)	Nombre maximal de composantes					
			$h_b$	$h_m$		3 dB		5 dB		10 dB	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Zone urbaine	200 ns	1,9-2,1	46	1,7	100-1 600	1	2	1	2	2	4
Zone suburbaine	175 ns	2,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	2	4
Zone urbaine	20 ns	3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
					0-1 000	2	3	2	4	5	9
			55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	13
Zone résidentielle	20 ns	3,35	4	2,7	0-480	2	2	2	2	2	3
Zone suburbaine	175 ns	3,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	1	5
Zone suburbaine	50 ns	3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5
Zone suburbaine	100 ns	5,8	12	1	200-1 500	1	2	3	5	4	5
Zone urbaine	20 ns	8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
					0-1 000	1	2	2	4	4	8
			55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	12
Zone urbaine	20 ns	15,75	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	5
					0-1 000	2	3	2	4	6	10

Pour les mesures décrites au § 6.2, la fenêtre de retard différentiel pour les 4 composantes les plus puissantes par rapport à la composante arrivant en premier, et l'amplitude relative de ces composantes, sont indiquées dans le Tableau 13.

TABLEAU 12

Type d'environnement	Antenne de la station de base	Fréquence (GHz)	Hauteur d'antenne (m)		Portée (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%
Urbain	Faiblement élevée	3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
					0-1 000	2	3	2	4	5	9
Urbain	Faiblement élevée	8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
					0-1 000	1	2	2	4	4	8
Urbain	Faiblement élevée	15,75	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	5
					0-1 000	2	3	2	4	6	10
Urbain	Elevée	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
Résidentiel	Faiblement élevée	3,35	4	2,7	0-480	2	2	2	2	2	3
Suburbain	Elevée	3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5

TABLEAU 13

Fenêtre de retard différentiel pour les 4 composantes les plus puissantes par rapport à la composante arrivant en premier et amplitude relative de ces composantes

Type d'environnement	Retard	Fréquence (GHz)	Hauteur d'antenne (m)		Portée (m)	Retard en excès (µs)							
			$h_b$	$h_m$		1ère		2ème		3ème		4ème	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%	80%	95%
Zone urbaine	200 ns	1,9-2,1	46	1,7	100-1 600	0,5	1,43	1,1	1,98	1,74	2,93	2,35	3,26
Puissance relative par rapport à la composante la plus puissante (dB)						0	0	-7,3	-9	-8,5	-9,6	-9,1	-9,8

## 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 en milieu urbain dense 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 en milieu urbain dense 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.

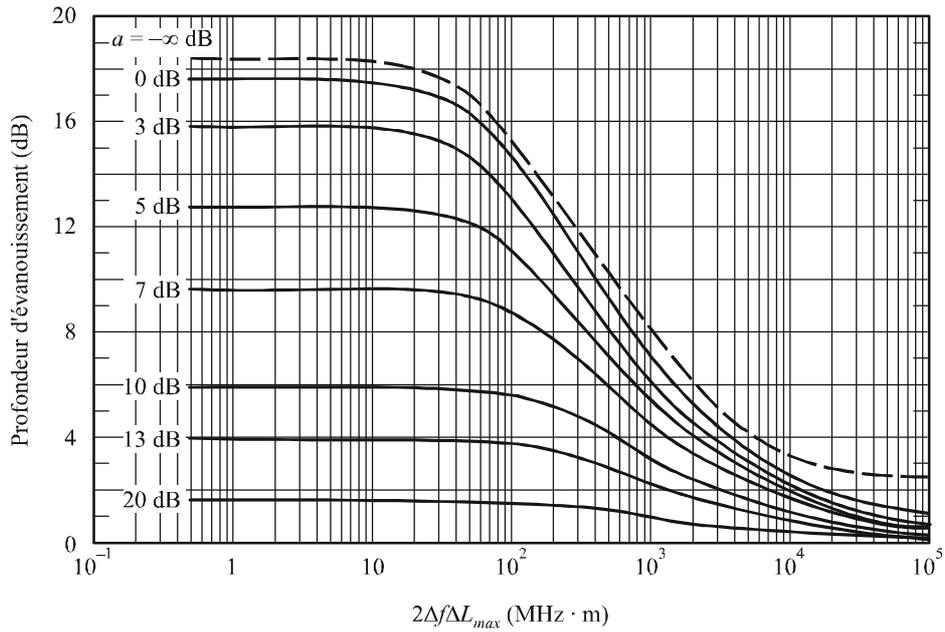
La valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire est en moyenne de 30° (écart type de 11°) dans une situation LoS et de 41° (écart type de 18°) dans une situation NLoS.

## 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  $\Delta L_{max}$  m, comme illustré dans la Fig. 7.  $\Delta L_{max}$  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. 8. 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 7

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

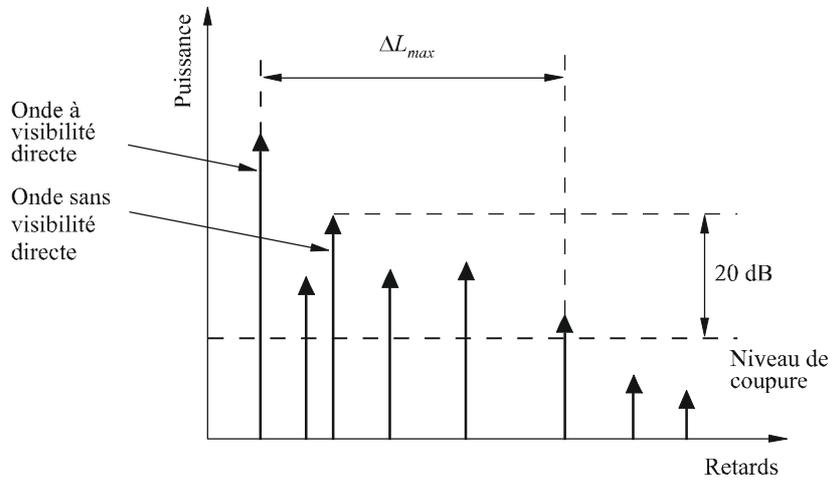


$a$ : Rapport de la puissance

1411-07

FIGURE 8

Modèle permettant de calculer  $\Delta L_{max}$



1411-08