

RECOMMANDATION UIT-R P.1410-4

**Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires
pour la conception de systèmes d'accès radioélectrique
de Terre à large bande fonctionnant entre 3 et 60 GHz**

(Question UIT-R 203/3)

(1999-2001-2003-2007)

Domaine de compétence

L'accès radioélectrique à large bande est une méthode importante de fourniture d'un accès à large bande aux particuliers et aux petites entreprises. La présente Recommandation porte sur les systèmes fonctionnant entre 3 et 60 GHz et donne des indications concernant la couverture en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) et les mécanismes de propagation importants en l'absence de LoS. Pour les systèmes affectés par la pluie, elle donne des méthodes permettant d'évaluer l'amélioration due à la diversité résultant du choix de la meilleure station de base parmi deux stations et d'évaluer la réduction de la couverture durant les précipitations. Elle donne aussi des indications concernant la distorsion à large bande.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes d'accès radioélectrique de Terre à large bande, il est nécessaire que l'on dispose de méthodes de prévision et de données appropriées en matière de propagation;
- b) que les Recommandations élaborées pour la conception des liaisons ne traitent pas des aspects relatifs à la zone,

recommande

1 que les données de propagation et les méthodes de prévision décrites dans l'Annexe 1 soient appliquées pour la conception des systèmes d'accès radioélectrique de Terre à large bande fonctionnant entre 3 et 60 GHz.

Annexe 1**1 Introduction**

La fourniture, par l'intermédiaire de réseaux d'accès locaux, de services à large bande à domicile et à de petites entreprises suscite un intérêt croissant. On envisage de plus en plus d'utiliser pour la fourniture des systèmes radioélectriques, ceux-ci étant actuellement disponibles sur le marché. Plusieurs systèmes sont actuellement étudiés et mis en service, notamment le système de distribution multipoint locale (LMDS, *local multipoint distribution system*), le système de communication multipoint locale (LMCS, *local multipoint communications system*) et le système point à multipoint (P-MP). On peut désigner ces systèmes sous la dénomination générique de systèmes d'accès hertzien à large bande (BWA, *broadband wireless access*). Des normes internationales sont en cours d'élaboration, par exemple la norme WiMAX fondée sur les normes IEEE802.16 et HiperMAN.

Les planificateurs, opérateurs et fabricants de réseaux ainsi que les organes de réglementation ont besoin de bonnes orientations en matière de conception en ce qui concerne les questions de propagation des ondes radioélectriques.

2 Couverture de zone

Lorsqu'un système cellulaire est planifié, l'opérateur doit choisir soigneusement l'emplacement et la hauteur au-dessus du sol de la station de base pour pouvoir fournir des services au nombre voulu d'utilisateurs à l'intérieur d'une zone. La taille des cellules peut varier selon la topographie et selon le nombre d'utilisateurs pour lesquels le service de radiocommunication est offert. On trouvera dans le présent paragraphe un modèle statistique de l'occultation par les bâtiments fondé sur une caractérisation très simple des bâtiments dans une zone ainsi que des orientations fondées sur des calculs détaillés. On trouvera également un modèle d'affaiblissement dû à la végétation et quelques règles simples de conception.

2.1 Occultation par les bâtiments

Le meilleur moyen d'évaluer la probabilité d'occultation par les bâtiments est de recourir à des techniques de tracé de rayons qui utilisent des données réelles provenant de bases de données détaillées sur les bâtiments et le terrain. Les conditions nécessaires aux techniques de tracé de rayons sont brièvement décrites au § 2.1.1. Toutefois, dans de nombreuses zones, il n'existe pas de bases de données appropriées et il est recommandé d'utiliser le modèle statistique décrit au § 2.1.4.

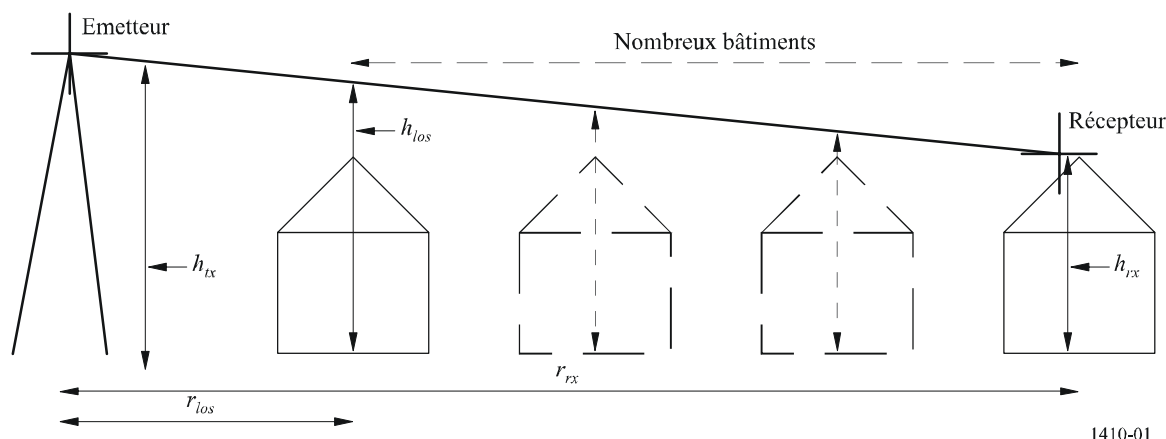
2.1.1 Conditions nécessaires pour le tracé de rayons

On peut obtenir une prévision de couverture précise en utilisant des techniques de tracé de rayons dans des zones pour lesquelles une base de données de couverture des terres est disponible. Compte tenu des fréquences élevées et des longueurs de trajet faibles concernées, on peut faire l'approximation de l'optique géométrique de propagation en ligne droite.

Pour une approximation de premier ordre en termes d'estimation de couverture, une détermination optique en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) de 60% du dégagement de la première zone de Fresnel est suffisante pour garantir un affaiblissement additionnel négligeable (voir la Fig. 1). L'affaiblissement dû à la diffraction dans les cas de non LoS est important. La précision de la base de données des bâtiments limite la précision de la prévision par rayons et cette base de données doit comprendre une représentation précise du terrain et des bâtiments situés le long du trajet. La courbure de la Terre doit également être prise en compte pour les trajets supérieurs à 2 km. Les bâtiments et la végétation doivent être considérés comme des éléments opaques pour cette procédure.

FIGURE 1

Chaque bâtiment doit être situé sous le trajet en visibilité directe reliant l'émetteur et le récepteur



1410-01

Les mesures des caractéristiques du signal, comparées aux modèles de tracé de rayons, ont montré une concordance statistique satisfaisante, mais elles ont également montré des variations de signal considérables en fonction de la position et de l'heure pour des trajets en non LoS. En conséquence, compte tenu de la précision limitée des bases de données de bâtiments réels, des prévisions de qualité de service pour des trajets spécifiques en quasi LoS ne sont pas possibles.

La végétation, notamment les grands arbres et les arbustes, peut causer d'importantes dégradations de service et il convient, dans l'idéal, d'inclure les données relatives dans la base de données.

Des mesures ont indiqué que, pour une fourniture de service dans une zone urbaine/suburbaine typique, les utilisateurs gênés par des effets de réflexion dus à des trajets multiples sont nettement moins nombreux que ceux gênés par des bâtiments ou des éléments de végétation, du fait de la faible ouverture de faisceau de l'antenne, et il n'est par conséquent pas nécessaire de calculer les réflexions (voir le § 4.2.1).

La base de données utilisée pour l'évaluation au moyen du tracé de rayons peut être une base de données orientée objet détaillée comprenant l'altitude du terrain, les contours des différents bâtiments avec des informations relatives à la hauteur et à la forme du toit, ainsi que des renseignements relatifs à la végétation représentée sous la forme d'arbres individuels ou de bouquets d'arbres. On peut également, à titre de solution de rechange pour la détermination du trajet en LoS, utiliser une base de données ligne par ligne de points de cote (altitude), comme celle générée par un système de mesure utilisant un radar à ouverture synthétique (SAR, *synthetic aperture radar*) aéroporté (voir le Tableau 1).

TABEAU 1

Caractéristiques minimales de la base de données

Objet	Format	Résolution horizontale (m)	Résolution verticale (m)
Terrain	Grille de point de cote (altitude)	50	1
Bâtiments	Image ligne par ligne orientée objet ou haute résolution	1	1
Végétation			

2.1.2 Examen des réflexions et de la diffusion

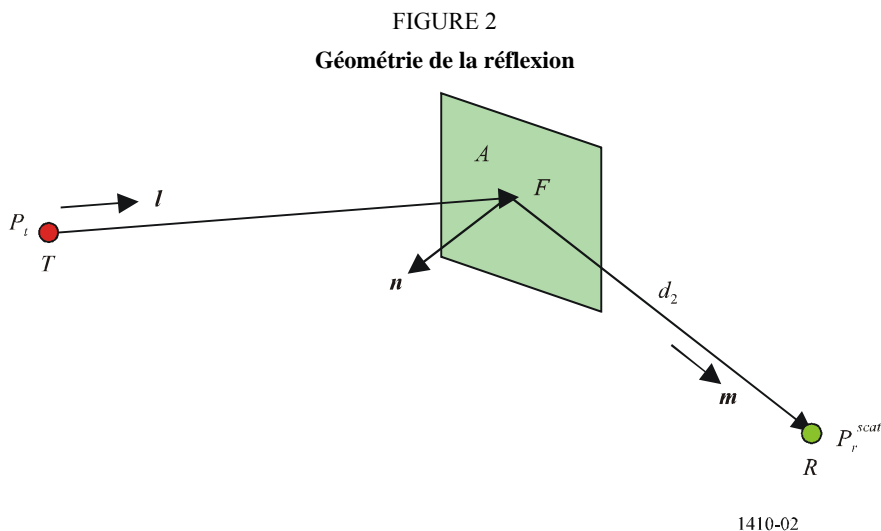
Dans un environnement urbain, les réflexions sur les bâtiments voisins constituent le mécanisme de propagation dominant en l'absence de visibilité directe. Les méthodes efficaces de calcul des réflexions fondées sur des bases de données volumineuses ont fait l'objet de nombreuses recherches et de nombreuses publications. Lors de l'examen de réflexions et de diffractions multiples, le problème devient ardu pour tous les scénarios hormis les plus simples. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser un modèle de réflexion à un seul bond, chacun des trajets en direction et en provenance du réflecteur étant assujéti à ses propres pertes par diffractions verticale et horizontale.

Modèle de diffusion sur une surface rugueuse

Pour éviter que les calculs ne soient trop complexes, il est proposé d'utiliser le modèle simple donné ici. C'est un modèle scalaire de diffusion incohérente sur une surface rugueuse. Autrement dit, seule la puissance diffusée est prise en considération, les effets de phase et de polarisation étant ignorés.

Géométrie

Considérons une facette rugueuse F de surface A . Soient T et R un émetteur et un récepteur. $\vec{\mathbf{l}}$ et $\vec{\mathbf{m}}$ sont les vecteurs unitaires dans les sens TF et FR et $\vec{\mathbf{n}}$ est le vecteur unitaire normal à la facette (Fig. 2).



P_t et P_r^{scat} sont les puissances diffusées respectivement émise en T et reçue en R et, sans perte de généralité, on suppose que les antennes en T et en R sont omnidirectionnelles.

Propagation de T à F

Dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre, la puissance surfacique S (pfd) (W/m^2) à la distance d_1 de T vaut:

$$S = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 P_t \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde. La puissance P_{fr} affectant F est alors donnée par:

$$P_{fr} = SA |\vec{\mathbf{l}} \cdot \vec{\mathbf{n}}| \quad (2)$$

Pour ce résultat, on suppose que toute dimension de $A \ll d$ de sorte que la pfd soit constante sur toute la facette. Cette hypothèse n'est pas contraignante: en principe, on peut prendre une facette A

aussi petite que nécessaire pour que cette hypothèse soit vérifiée. Toutefois, dans ce modèle, on suppose que F est en réalité une face entière de bâtiment (ou au moins la partie illuminée d'une face de bâtiment) et on suppose que cette hypothèse est satisfaite. Le point de référence pour la diffusion est le centre de la facette.

Modèle de diffusion sur une surface rugueuse

Dans ce modèle, utilisé pour représenter la diffusion diffuse en infographie, on suppose que la puissance incohérente diffusée par la surface rugueuse F est lambertienne. Autrement dit, la puissance est rerayonnée dans toutes les directions (dans le demi-plan) avec une intensité qui varie en $\cos \theta$, où θ est l'angle entre le rayonnement et la normale. Cette variation annule exactement la dépendance en $1/\cos \theta$ de la pfd émise (en raison du terme de projection $|m.n|$), ce qui donne un rayonnement omnidirectionnel avec le même gain dans toutes les directions. Cela correspond à ce qui est observé dans la pratique pour la diffusion optique. La puissance incohérente émise par F est donnée par:

$$P_{ft} = 2\rho_{nonspec}P_{fr} \quad (3)$$

Le facteur 2 correspond au fait que toute la puissance est émise dans un hémisphère. $\rho_{nonspec}$ correspond à la fraction de la puissance cohérente affectant F qui est réémise par diffusion non spéculaire.

Propagation de F à R

Dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre et d'une antenne omnidirectionnelle, la puissance diffusée reçue en R vaut:

$$P_r^{scat} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_{ft} \quad (4)$$

Bilan de liaison complet

La combinaison des équations (1) et (2) donne:

$$P_r^{scat} = 2\rho_{nonspec} \frac{4\pi A |\vec{\mathbf{l}} \cdot \vec{\mathbf{n}}|}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_t \quad (5)$$

Les termes $(\lambda/4\pi d)^2$ sont les termes de propagation en espace libre et peuvent généralement être remplacés par les termes de propagation réelle. Les diagrammes de gain d'antenne en T et en R peuvent aussi être inclus. La seule hypothèse requise est celle de l'incidence de l'onde plane sur F .

Pertes par diffusion

Il peut être utile de calculer les «pertes» par diffusion incohérente sur surface rugueuse. Il s'agit de l'affaiblissement additionnel sur le trajet induit par la diffusion en plus de l'affaiblissement sur le trajet obtenu si la facette était un miroir parfait, c'est-à-dire une réflexion spéculaire avec un coefficient de réflexion de 1. Pour ce calcul, il faut partir de l'hypothèse d'une propagation en espace libre sur les trajets TF et FR . La puissance reçue en R en provenance d'un émetteur en T dans l'hypothèse d'une réflexion parfaite, P_r^{LoS} , vaut:

$$P_r^{LoS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_1 + d_2)} \right)^2 P_t \quad (6)$$

Les pertes par diffusion L_{scat} sont alors données par (elles sont définies de telle sorte que $L_{scat} > 1$):

$$\frac{1}{L_{scat}} = \frac{P_r^{scat}}{P_r^{LoS}} = \frac{|\vec{\mathbf{I}} \cdot \vec{\mathbf{n}}|}{2\pi} \rho_{nonspec} \frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \quad (7)$$

Tous les termes de cette expression sont strictement < 1 mis à part le dernier terme, qui peut devenir > 1 si la surface A est trop grande par rapport à d_1 et d_2 . Toutefois, comme indiqué plus haut, le modèle n'est valable que si toute dimension de $A \ll d_1$. Ainsi, pour pouvoir appliquer l'équation (7), la condition suivante doit être vérifiée:

$$\frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \leq 1 \quad (8)$$

Cette condition ne sera transgressée que si l'émetteur et le récepteur sont extrêmement proches de F .

L'équation (7) montre que les pertes par diffusion non spéculaire augmentent rapidement à mesure que le point de réception s'éloigne de la surface de diffusion. Lorsque $d_1 \rightarrow \infty$, les pertes (en décibels) $\rightarrow 10 \log(d_2^2 / A)$. Ainsi, pour une face de bâtiment de 100 m^2 , les pertes dues à ce terme seul sont de 20 dB à 100 m et de 40 dB à 1 km du bâtiment.

Définition de $\rho_{nonspec}$

En définissant ρ_{spec} et ρ_{trans} respectivement comme la fraction de la puissance cohérente affectant F qui est réfléchi par réflexion (cohérente) spéculaire et celle qui est transmise à travers la facette, on pourrait s'attendre à ce qu'un modèle cohérent du processus de diffusion complet conserve l'énergie, à savoir:

$$\rho_{spec} + \rho_{trans} + \rho_{nonspec} = 1 \quad (9)$$

Malheureusement, notre modèle semi-empirique n'est pas cohérent, et différentes hypothèses sont faites pour chaque mécanisme:

- ρ_{spec} : le modèle le plus fondé sur la théorie est celui de la diffusion spéculaire. Pour une facette lisse, la puissance réfléchi est déterminée par les coefficients de réflexion de Fresnel (qui dépendent de l'angle de réflexion spéculaire et des propriétés électriques de la facette). Toutefois, il n'existe pas d'extension simple pour la diffusion sur surface *rugueuse*, et le modèle utilise un terme semi-empirique qui modifie (réduit) le coefficient de réflexion de Fresnel sur surface lisse. Il est proposé de définir ρ_{spec} comme le facteur de réduction de puissance dû au seul effet de la surface rugueuse; autrement dit, ce facteur ne tient pas compte de la variation de puissance réfléchi due à la variation de coefficient de Fresnel. Cette dernière dépend de l'angle de réflexion et de la polarisation, ce qui serait donc aussi le cas de la puissance diffusée non spéculaire; il y aurait alors incompatibilité avec l'hypothèse lambertienne.
- ρ_{trans} : en principe, la composante transmise peut aussi être calculée à partir de la théorie de Fresnel pour une surface lisse et une seule interface. Toutefois, dans la pratique, la situation est trop compliquée à modéliser (surface rugueuse, interfaces et réflexions multiples) et il convient d'utiliser une valeur empirique déterminée expérimentalement pour ρ_{trans} .

En principe, chaque ρ doit satisfaire la condition $0 \leq \rho \leq 1$. Il n'y a pas de raison de penser que l'équation (9) sera satisfaite, et si cette équation est utilisée pour déterminer $\rho_{nonspec}$ à partir de ρ_{spec} et de ρ_{trans} , il est possible que $\rho_{nonspec}$ devienne négatif, ce qui est impossible physiquement. Il est donc proposé de déterminer la fraction non spéculaire directement à partir de la fraction spéculaire, en ignorant la composante transmise:

$$\rho_{nonspec} = 1 - \rho_{spec} \quad (10)$$

Dans la pratique, ρ_{trans} devrait être relativement petit (par exemple pour un affaiblissement de pénétration dans les bâtiments de 10 dB, $\rho_{trans} = 0,1$).

Calcul de ρ_{spec}

ρ_{spec} est le facteur de réduction de *puissance* appliqué au coefficient de réflexion spéculaire pour tenir compte de l'effet de la rugosité de la surface sur la réflexion spéculaire. Il est donné par:

$$\rho_{spec} = \rho_s^2 \quad (11)$$

Lors du calcul du coefficient de réflexion spéculaire, le coefficient de réflexion effectif R est obtenu en multipliant le coefficient de Fresnel R_F par ρ_s :

$$R = \rho_s R_F \quad (12)$$

ρ_s peut être calculé comme suit:

$$\rho_s = \max\left[\exp\left(-\frac{1}{2}g^2\right), 0,15\right] \quad (13)$$

où:

$$g = \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos \varphi \quad (14)$$

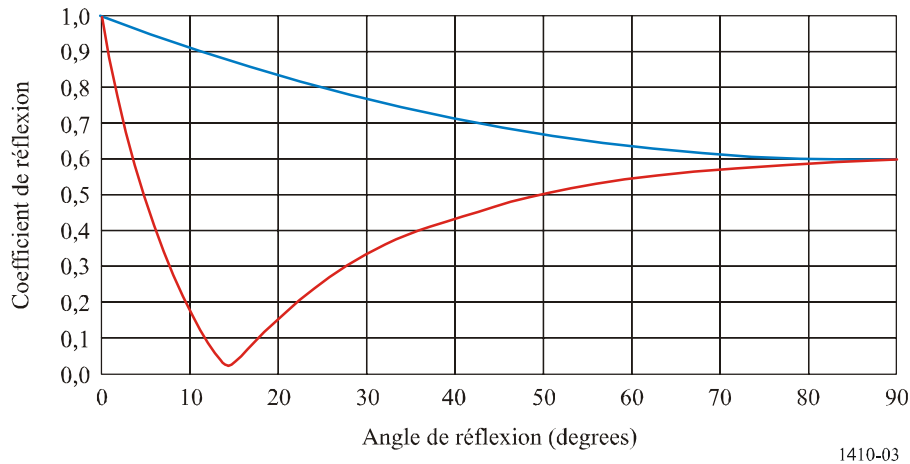
σ est l'écart type de la hauteur de rugosité de la surface autour de la moyenne locale dans la première zone de Fresnel et φ est l'angle d'incidence par rapport à la normale à la surface. La limite à 0,15 dans l'équation (13) a pour objet d'éviter que ρ_s devienne trop petit. (Le terme exponentiel a tendance à sous-estimer la diffusion pour les surfaces très rugueuses.)

Le calcul du coefficient de réflexion spéculaire dans l'équation (13) est compliqué. Le coefficient de Fresnel dépend de l'angle, des constantes électriques et de la *polarisation*. La dépendance vis-à-vis de la polarisation signifie qu'il faut généralement calculer à la fois les coefficients de réflexion de Fresnel parallèle et perpendiculaire et il faut tenir compte de la rotation de la polarisation dans la géométrie du trajet des rayons lorsqu'il s'agit de calculer le signal au niveau du récepteur.

Compte tenu de la nature empirique du modèle, si la modélisation concerne uniquement les puissances de signal (et que la phase peut être ignorée), on peut procéder à une simplification en calculant toutes les réflexions spéculaires uniquement sur la base du coefficient de Fresnel parallèle. Lorsque le vecteur électrique est situé dans le plan des rayons incident et réfléchi (courbe supérieure (bleue) sur la Fig. 3), la valeur numérique du coefficient est toujours plus grande que lorsque le vecteur électrique est perpendiculaire à ce plan (courbe inférieure (rouge)). Dans une base de données à trois dimensions, les deux composantes de polarisation seront généralement mélangées et la composante parallèle aura tendance à masquer le «zéro» de la composante perpendiculaire.

FIGURE 3

Coefficient de réflexion de Fresnel R_F parallèle (bleu) et perpendiculaire (rouge) en fonction de l'angle (3,5 GHz, surface sèche moyenne)



1410-03

Calcul de ρ_{trans}

ρ_{trans} est la fraction de la puissance incidente transmise à travers le mur. Dans cette application, on suppose que la valeur de ρ_{trans} est une constante indépendante de l'angle de transmission par rapport à la facette et que la facette ne modifie pas l'angle du rayon lorsque celui-ci traverse la facette.

Points à noter

- 1 Les pertes par diffusion sur surface rugueuse sont données par l'équation (10), la fraction de puissance non spéculaire étant définie par le biais des équations (11), (13) et (14).
- 2 L_{scat} ne dépend pas explicitement de λ , seul ρ_{nonpec} dépend de la fréquence. Cela correspond à ce qui était prévu – il s'agit d'un modèle de puissance scalaire et le modèle de source lambertienne ne dépend pas de la fréquence.
- 3 Un modèle qui représente correctement la phase et la polarisation serait beaucoup plus complexe et incompatible avec un modèle de diffusion incohérente. Et surtout, il nécessiterait de connaître en détail la forme de la rugosité de la surface, qui n'est probablement jamais disponible. (Ce modèle pourrait convenir pour une surface «légèrement» rugueuse, avec une approche de type perturbation, mais il vaut mieux traiter un tel modèle de diffusion cohérente dans le cadre d'un modèle de réflexion spéculaire modifié.)
- 4 Une conséquence du point 3 est que ce modèle de diffusion n'est vraiment utile que pour modéliser le *brouillage* étant donné que les puissances de brouillage sont supposées s'ajouter de façon incohérente. Pour le signal utile, ce résultat peut servir à évaluer l'étalement des temps de propagation. S'agissant de la sommation nécessaire à l'obtention de la puissance totale du signal, il faut examiner plus en détail la phase (ou de façon équivalente, les longueurs de trajet différentielles).
- 5 Le modèle de diffusion non spéculaire ne comporte pas de réciprocité. En réalité, celle-ci est *presque* assurée, mais l'inclusion du terme $|\vec{I} \cdot \vec{n}|$ sans terme $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$ correspondant détruit la symétrie. En choisissant un modèle de source de diffusion autre que la source lambertienne, la réciprocité pourrait être assurée. Toutefois, le modèle est toujours semi-empirique et les hypothèses simples qui sont faites ne permettent pas de s'attendre à une réciprocité.

2.1.3 Transmission à travers les bâtiments

Les mesures indiquées dans la Recommandation UIT-R P.1411 (et les références de mesure indiquées) montrent que la pénétration du signal dans les bâtiments aux fréquences inférieures de la gamme de fréquences peut devenir un mécanisme de propagation important (affaiblissement additionnel de 20 à 40 dB) lorsque les pertes par diffraction autour ou au-dessus des bâtiments sont grandes. De façon analogue aux coefficients d'affaiblissement dû à la réflexion, ces pertes seront liées aux matériaux de construction des bâtiments, aux fréquences radioélectriques et à la structure interne des bâtiments (murs internes). Les pertes peuvent être modélisées sous la forme d'une série de pertes dues aux murs (lorsqu'on dispose de données suffisantes) ou sous la forme de pertes par mètre dans le bâtiment considéré. Lorsque plusieurs bâtiments font obstacle au trajet direct, il sera peut-être mieux d'ignorer ce mécanisme étant donné qu'il conviendrait alors de prendre en considération les combinaisons des trajets de diffraction, de réflexion et de transmission à travers les bâtiments.

2.1.4 Modèle statistique

Pour une position donnée de l'émetteur (Tx) et du récepteur (Rx), on détermine la probabilité qu'il existe un trajet en LoS entre ces positions en combinant les probabilités que chaque bâtiment situé sur le trajet de propagation se trouve au-dessous du rayon qui relie l'émetteur et le récepteur, à l'endroit où celui-ci traverse le bâtiment. La Fig. 1 représente une telle configuration géométrique et définit les termes utilisés dans l'équation (15). Dans ce modèle, on suppose que le terrain est plat ou se caractérise par une pente constante dans la zone considérée.

La hauteur du trajet au point d'obstruction, h_{LoS} , est donnée par l'équation suivante:

$$h_{LoS} = h_{tx} - \frac{r_{LoS}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (15)$$

où:

- h_{tx} : hauteur au-dessus du sol de l'émetteur
- h_{rx} : hauteur du récepteur à la distance r_{rx}
- r_{LoS} : distance entre l'émetteur et l'obstacle.

A supposer qu'en moyenne, les bâtiments sont régulièrement espacés, il est possible d'estimer le nombre de bâtiments se trouvant entre deux points. La probabilité qu'il existe un trajet LoS est indiquée par l'équation suivante:

$$P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{hauteur_du_bâtiment} < h_{LoS}) \quad (16)$$

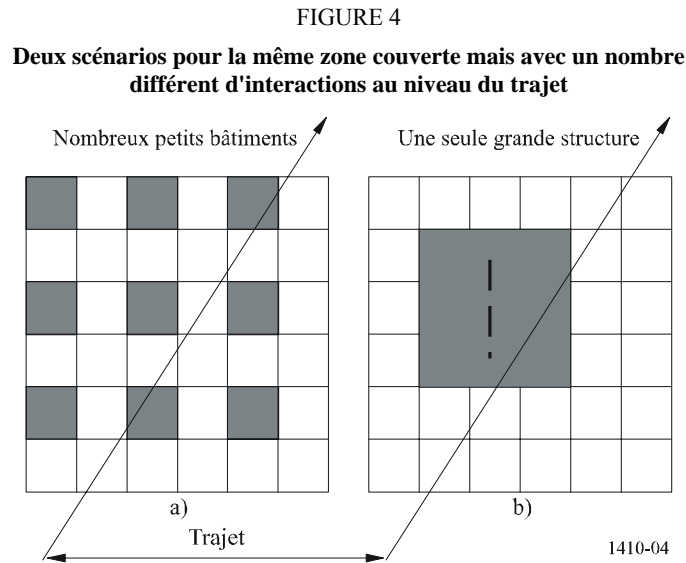
b_r étant le nombre de bâtiments traversés.

Trois paramètres sont nécessaires pour ce modèle simple:

- α : rapport entre la zone terrestre couverte par les bâtiments et la zone terrestre totale (sans dimension);
- β : nombre moyen de bâtiments par zone unitaire (nombre de bâtiments par km²);
- γ : variable déterminant la distribution des hauteurs des bâtiments.

Pour la distribution de Rayleigh proposée, la variable γ équivaut à la hauteur de bâtiment la plus probable (mode). La raison de la distinction entre α et β est indiquée à la Fig. 4. Les Fig. 4a) et 4b) ont la même zone couverte au sol et, par conséquent, la même valeur de α , mais on s'attend à de plus nombreuses interactions au niveau du trajet dans la Fig. 4a) que dans la Fig. 4b). α seul ne

permet pas de faire la distinction entre les deux configurations montrées à la Fig. 4. Si les bâtiments sont de même hauteur dans la Fig. 4a) que dans la Fig. 4b), la probabilité d'occultation est beaucoup moins grande avec de nombreux petits bâtiments qu'avec un seul grand bâtiment.



Pour les emplacements allant des emplacements en zone suburbaine aux emplacements à grande hauteur, α sera compris entre 0,1 et 0,8 et β entre 750 et 100 respectivement.

La distribution de la probabilité de Rayleigh $P(h)$ relative à la hauteur h définit le paramètre γ comme suit:

$$P(h) = \frac{h^2}{\gamma^2} e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}} \quad (17)$$

2.1.5 Algorithme et calcul

Etant donné α , β et γ , la couverture en LoS est calculée de la manière suivante:

Un rayon de 1 km de longueur passerait au-dessus de $\sqrt{\beta}$ bâtiments si ceux-ci étaient disposés selon une grille régulière. Vu qu'une seule fraction α au sol est couverte, le nombre prévu de bâtiments traversés par km est donné par l'équation suivante:

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \quad (18)$$

et, par conséquent, pour un trajet de longueur r_{rx} (km), le nombre de bâtiments est:

$$b_r = \text{floor}(r_{rx} b_1) \quad (19)$$

la fonction floor étant introduite pour faire en sorte qu'un nombre entier de termes soit inclus dans l'équation (16).

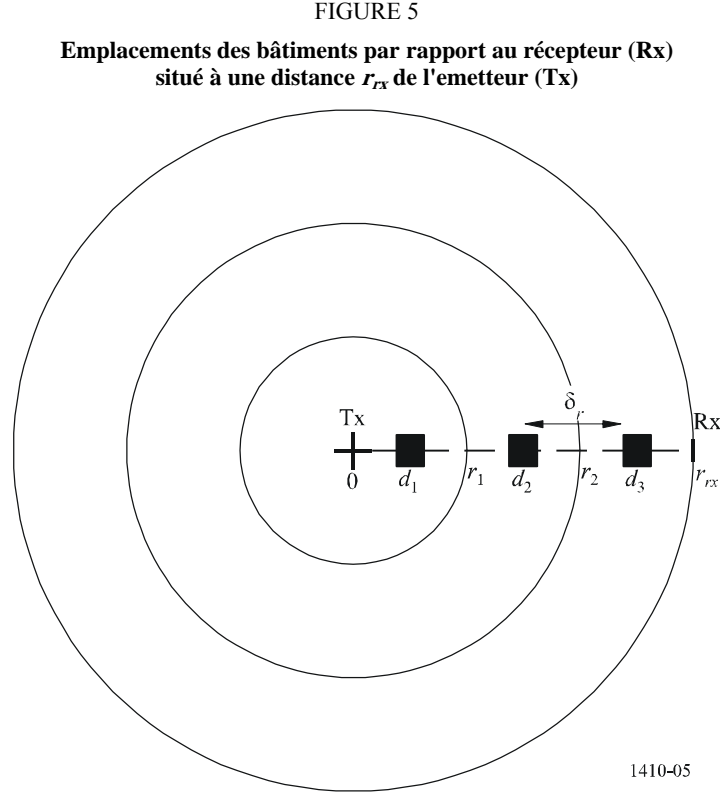
Pour calculer la probabilité qu'il existe un trajet LoS à chaque distance r_{rx} :

Etape 1: Calculer le nombre de bâtiments b_r situés entre les points Tx et Rx à l'aide de l'équation (19).

Etape 2: On suppose que les bâtiments sont régulièrement espacés entre les points Tx et Rx, les distances auxquelles se trouvent les bâtiments étant données par l'équation suivante:

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0,1, \dots, (b_r - 1)\} \quad (20)$$

où $\delta_r = r_{rx}/b_r$ est la distance séparant les bâtiments.



Etape 3: A chaque distance d_i , on détermine la hauteur h_i d'un bâtiment qui obstruerait le trajet en LoS en utilisant d_i en remplacement dans l'équation (15).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i (h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (21)$$

Etape 4: La probabilité P_i qu'un bâtiment a une hauteur inférieure à la hauteur h_i est donnée par:

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh \quad (22)$$

$$= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2}$$

Etape 5: La probabilité $P_{LoS,i}$ qu'il existe un trajet LoS à la position d_i est donnée par l'équation suivante:

$$P_{LoS,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (23)$$

Etape 6: On obtient la couverture cumulée en pondérant chaque valeur $P_{LoS,i}$ au moyen d'un coefficient de pondération W_i qui dépend de la distance par rapport à l'émetteur. Ce coefficient tient compte du nombre de bâtiments qui se trouvent dans un anneau qui s'accroît en fonction de la distance:

$$W_i = 2i + 1 \quad (24)$$

Etape 7: On obtient la couverture requise pour une cellule de rayon r_{rx} en additionnant les probabilités pondérées en fonction des bâtiments et en normalisant le résultat obtenu au moyen du produit de la surface totale des anneaux multipliée par la densité de bâtiments:

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{LoS,i} W_i}{b_r^2} \quad (25)$$

Cette modélisation présente assurément certaines limites et il existe plusieurs façons d'étendre le modèle:

- Aucune variation du terrain n'est prise en compte dans ce modèle. Il est évident que des variations, même de l'ordre de quelques mètres, peuvent avoir une incidence notable. On pourrait étendre les capacités de prévision du modèle en combinant les propriétés statistiques du modèle avec une base de données sur les terrains irréguliers, en ajoutant un décalage moyen à la hauteur d'occultation pour chaque point testé dans le modèle.
- La densité et la hauteur des bâtiments varient considérablement d'une région à une autre et, par conséquent, les prévisions dans une direction devraient être différentes de celles qui concernent l'autre direction. Il ressort clairement des distributions des hauteurs de bâtiment mesurées que les bâtiments ne correspondent pas parfaitement au modèle statistique simple. On pourrait résoudre en grande partie ce problème en subdivisant la base de données en fonction de régions plus petites et en affectant à chaque région un ensemble de paramètres spécifiques.
- De fait, les récepteurs sont placés sur le toit des bâtiments, de sorte que la distribution des hauteurs des récepteurs est similaire à celle des hauteurs des bâtiments. Dans le modèle, on suppose que les récepteurs se trouvent à une hauteur constante par rapport au sol. Une autre solution consiste à déterminer la hauteur des récepteurs à partir de la distribution des bâtiments, ce qui là encore dépendra des régions.
- La méthode obtenue au moyen de l'algorithme donne une estimation correcte de la couverture en comparaison avec les résultats des tracés de rayons obtenus à partir des bases de données réelles (voir le § 2.1.6). La distribution de Rayleigh relative à la hauteur des bâtiments s'est révélée précise pour certains échantillons de données, lorsqu'une zone limitée était examinée (par exemple, une petite ville). Par ailleurs, pour obtenir les résultats de couverture indiqués au § 2.1.6, la méthode doit être appliquée compte tenu de l'emplacement des bâtiments et du modèle de dégagement du trajet, donnés par la procédure par étape.

2.1.6 Exemples de prévisions de couverture

La formule de Rayleigh a été appliquée à la distribution cumulée des hauteurs de toit mesurées dans une zone suburbaine au Royaume-Uni (Malvern). Pour cet ensemble de données, les valeurs moyennes des paramètres du modèle dans la principale région urbaine étaient les suivantes:

$$\alpha = 0,11; \quad \beta = 750; \quad \gamma = 7,63$$

Les Fig. 6 et 7 indiquent les résultats obtenus à partir du modèle. La Fig. 6 représente la couverture en fonction de la hauteur de l'émetteur et la Fig. 7, la couverture en fonction de la hauteur du récepteur.

Avec le modèle, on obtient des prévisions ayant la même forme de base et le même niveau de couverture globale que les résultats obtenus avec des simulations détaillées de tracé de rayon. L'intérêt de ce modèle est qu'il permet d'obtenir des prévisions de couverture à partir de trois paramètres seulement, qui peuvent être estimés pour tout emplacement urbain à condition que l'on dispose d'un minimum d'informations sur la zone. A mesure que davantage de données tridimensionnelles deviennent accessibles, il devrait être possible de produire des tables de paramètres pour différentes villes/cités, qui pourraient être utilisées comme référence lorsqu'on estime la couverture sur un site inconnu. Le modèle permet non seulement d'estimer la couverture dans une seule cellule, mais de combiner les résultats provenant de nombreuses cellules pour déterminer la couverture dans de grands réseaux, y compris les effets de la diversité.

FIGURE 6

Modélisation de la couverture cumulée pour un récepteur situé à une hauteur de 7,5 m et un émetteur situé à des hauteurs de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 m

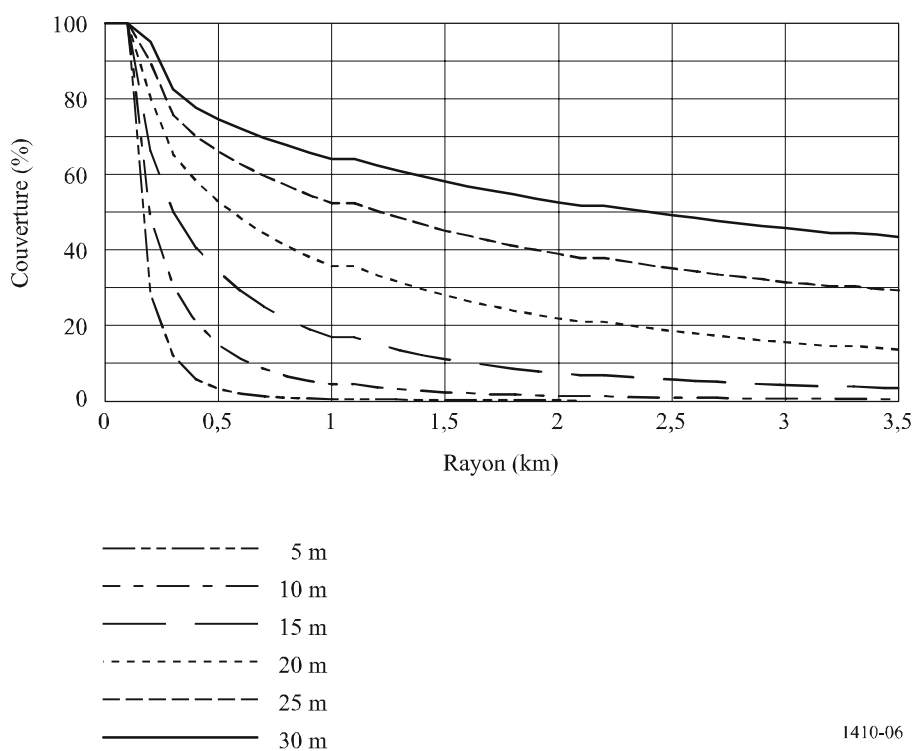
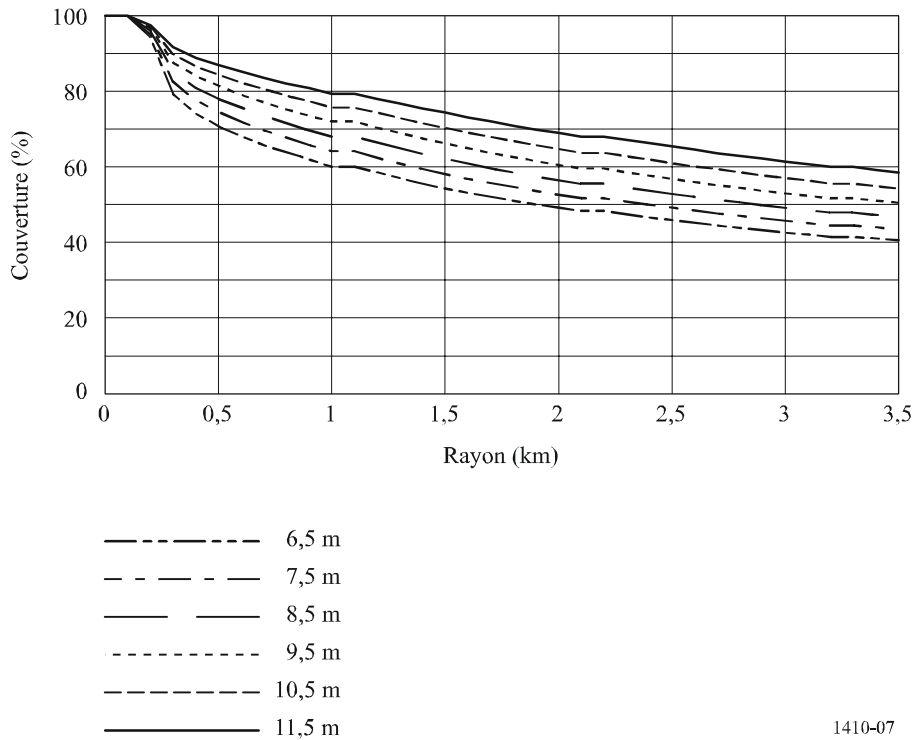


FIGURE 7

Modélisation de la couverture cumulée pour un émetteur situé à une hauteur de 30 m et un récepteur situé à des hauteurs de 6,5; 7,5; 8,5; 9,5; 10,5 et 11,5 m



1410-07

2.1.7 Accroissement de la couverture au moyen de deux ou plusieurs stations de base

Une architecture cellulaire offrant aux récepteurs le choix entre plusieurs stations de base permet d'accroître considérablement la couverture. Ainsi, à partir de calculs de tracés de rayons, pour des hauteurs d'antenne d'émetteur de 30 m, la couverture dans une cellule de 2 km est passée de 44% pour une seule station de base à 80% pour deux stations et à 90% pour quatre stations, même si les stations de base n'ont pas été spécialement choisies pour assurer une bonne visibilité.

En supposant que les probabilités de trajets LoS vers les différentes stations de base concernées sont indépendantes d'un point de vue statistique, on peut calculer la probabilité selon laquelle au moins un trajet existe. Il convient tout d'abord de calculer chaque $P_{LoS,i}$ à partir de l'équation (23). La probabilité selon laquelle au moins un trajet est visible pour un nombre m de stations de base possibles devient:

$$P_{LoS,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{LoS,i,k}) \quad (26)$$

On peut estimer la couverture au moyen d'au moins deux stations de base en remplaçant $P_{LoS,i}$ dans l'équation (23) par sa valeur donnée par l'équation (26) dans la procédure décrite au § 2.1.5. Il convient de noter que pour chaque valeur de k , on doit suivre les Etapes 1 à 5, où r_{rx} est la distance jusqu'à chacune des stations de base.

2.2 Affaiblissement dû à la végétation

L'occultation due aux arbres peut limiter considérablement le nombre de foyers susceptibles d'être desservis. Il est donc très important de disposer d'un modèle fiable concernant les effets et l'ampleur de l'affaiblissement dû à la végétation, étant donné que, pour les récepteurs proches de l'émetteur, la

marge du système peut être telle que l'intensité des signaux après propagation à travers un seul arbre est insuffisante pour pouvoir assurer un service.

Il ressort d'une étude trajectographique faite dans six villes du Royaume-Uni avec des bases de données contenant tous les bâtiments et les arbres que jusqu'à 5% des bâtiments dans un rayon de 1 000 m autour d'une station de base centrale étaient bloqués par la végétation. La station de base était située au sommet du bâtiment le plus haut de la zone, en général de 30 à 40 m au-dessus du sol, et un bâtiment était considéré comme non bloqué si un trajet en visibilité directe était possible vers tout point de mesure sur ce bâtiment. Les points de mesure des bâtiments étaient placés sur une grille régulière (1 m) dont le point le plus élevé était situé dans l'empreinte de chaque bâtiment. A une distance supérieure à environ 1 200 m, le pourcentage de blocage par la végétation ne variait pas, à condition que la hauteur de la station de base soit maintenue. A de plus grandes distances, en raison de la courbure terrestre, d'autres bâtiments et finalement le terrain sont devenus la cause principale du blocage. Dans une zone suburbaine, le blocage par la végétation était d'environ 25%.

Des mesures ont été faites à 42 GHz pour déterminer l'importance de l'affaiblissement «par des arbres locaux». On a constaté que l'affaiblissement moyen correspondait à ce que l'on pouvait escompter d'après la Recommandation UIT-R P.833, mais avec des effets importants dus à la propagation par trajets multiples provoquant de profonds évanouissements des signaux, lesquels variaient dans le temps avec les mouvements de la végétation dus au vent. On a constaté que ces disparitions de signaux pouvaient être décorréllées si l'on utilisait deux antennes séparées d'au moins 60 cm environ. Des espacements plus petits ont fait apparaître une corrélation plus grande et des espacements plus grands ont entraîné peu d'amélioration de la décorrélation de l'affaiblissement. Cela donne à penser qu'une configuration à diversité d'espace à deux antennes peut permettre d'exploiter des services dans ces conditions. Une expérience à 42 GHz utilisant deux antennes séparées de 62 cm a fait ressortir une variabilité significative des antennes individuelles et une éventuelle amélioration de la diversité. Une mesure à long terme de la propagation à travers des arbres a montré que l'on peut obtenir généralement un gain en diversité de 10 dB.

L'affaiblissement dû aux arbres est important à des longueurs d'ondes millimétriques. Le taux d'affaiblissement dépend du type d'arbre, de la teneur en humidité et de la géométrie du trajet, mais un taux de 4 à 5 dB/m peut être utilisé à titre indicatif (bien qu'à une certaine valeur, généralement de l'ordre de 20 à 40 dB, il y ait saturation au niveau de l'affaiblissement). Il est recommandé de recourir au modèle décrit dans la Recommandation UIT-R P.833 pour déterminer l'importance de l'affaiblissement dû à la végétation.

2.3 Etude de cas concernant les mécanismes de propagation

Le présent paragraphe contient les résultats de simulation pour une étude de cas fondée sur une base de données topographiques urbaines réelles. Les résultats montrent les mécanismes de propagation dominants pour la couverture ainsi que la distribution statistique du rapport puissance de porteuse sur puissance de brouillage (CIR, *carrier power to interference ratio*) pour un scénario de brouillage donné.

2.3.1 Description du terrain

Le terrain choisi est une zone urbaine de 2 km sur 1 km (Manchester, Royaume-Uni). La zone contient trois bâtiments nettement plus hauts que les bâtiments voisins. Les statistiques de couverture ont été évaluées avec un émetteur situé 15 m au-dessus du toit du bâtiment le plus haut. Les statistiques de brouillage ont été évaluées avec un émetteur brouilleur situé sur l'une des autres tours hautes. Quant aux affaiblissements sur le trajet, ils ont été évalués dans une grille uniforme à 2 m au-dessus du terrain. Les points ont été subdivisés en deux ensembles, à savoir les points au niveau des toits et les points au niveau de la rue.

2.3.2 Mécanismes de propagation modélisés

Le calcul de la propagation repose sur:

- la Recommandation UIT-R P.526 avec une diffraction relative à un seul point sur une petite échelle;
- la diffraction autour d'un objet;
- la transmission dans les bâtiments:
 - permittivité de la surface = 5;
 - pertes internes dans les bâtiments = 2,1 dBm;
- les réflexions et la diffusion:
 - simple et double bond. Trajets sans visibilité directe avec diffraction/transmission incluses;
 - permittivité de la surface = 5;
 - écart type de la rugosité de la surface = 0,001 m.

2.3.3 Couverture avec divers mécanismes de propagation

Le Tableau 2 indique les modifications des prévisions de la couverture à 2,4 GHz lorsqu'on augmente le nombre de mécanismes de propagation modélisés. Les différences d'affaiblissement sur le trajet sont données par rapport aux prévisions selon la Recommandation UIT-R P.526 pour un seul point.

TABLEAU 2

Récapitulation des différences d'affaiblissement sur le trajet avec divers mécanismes de propagation par rapport aux prévisions de la Recommandation UIT-R P.452 pour un seul point

Tous les points	Rec. UIT-R P.452, 1 point			Rec. UIT-R P.452, 3 points			Pénétration dans les bâtiments + Diffraction horizontale				
	visibilité directe (%)	1ère zone de Fresnel (%)	au-dessus (%)	visibilité directe (%)	1ère zone de Fresnel (%)	au-dessus (%)	visibilité directe (%)	1ère zone de Fresnel (%)	au-dessus (%)	à travers (%)	autour (%)
	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	24,85	6,86	13,70
				Diff. moyenne	-3,56 dB		Diff. moyenne	2,18 dB			
				Ecart type	8,42 dB		Ecart type	5,47 dB			
					4753 points			4753 points			
Uniquement les points avec une différence				Diff. moyenne	-11,62 dB		Diff. moyenne	10,60 dB			
				Ecart type	11,74 dB		Ecart type	7,51 dB			
					1455 points			976 points			

Réflexions spéculaires + diffusion + pénétration dans les bâtiments + diffraction horizontale							
Tous les points	visibilité directe (%)	1ère zone de Fresnel (%)	au-dessus (%)	à travers (%)	autour (%)	réflexions spéculaires (%)	diffusion (%)
		45,57	8,21	17,99	3,85	8,46	15,93
	Diff. moyenne	5,05 dB					
	Ecart type	10,45 dB					
		4753 points					
Uniquement les points avec une différence	Diff. moyenne	17,93 dB					
	Ecart type	12,54 dB					
		1338 points					

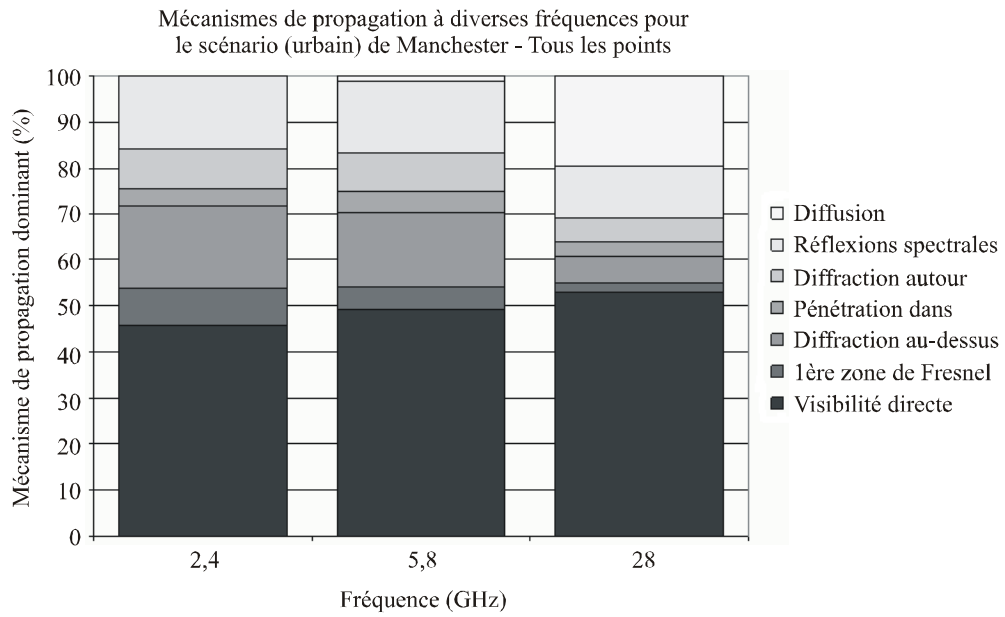
L'inclusion des mécanismes de propagation additionnels peut avoir un effet considérable sur les prévisions d'affaiblissement sur le trajet, avec une moyenne de l'ordre de 18 dB. Cette inclusion n'est pas nécessairement critique pour la prévision de la couverture, mais elle a en principe un effet important sur les performances d'un système brouillé; il est donc important de procéder à une modélisation correcte.

2.3.4 Couverture à diverses fréquences

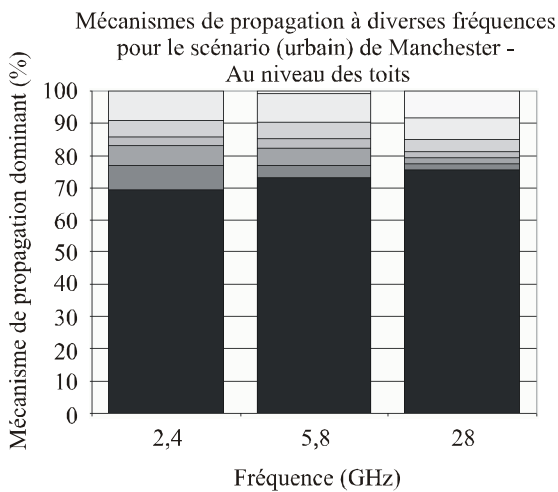
Pour calculer la couverture à 2,4 GHz, 5,8 GHz et 28,0 GHz, tous les mécanismes de propagation ont été modélisés. La Fig. 8 montre la couverture calculée à ces trois fréquences. Il convient essentiellement de noter que les affaiblissements pour les trajets diffractés sont beaucoup plus élevés à 28 GHz. Mais à 28 GHz, les affaiblissements sur le trajet sont nettement plus bas pour de nombreux emplacements. Cela s'explique par le mécanisme de diffusion; en effet, la rugosité de la surface des bâtiments entraîne beaucoup plus de diffusion aux fréquences élevées.

FIGURE 8

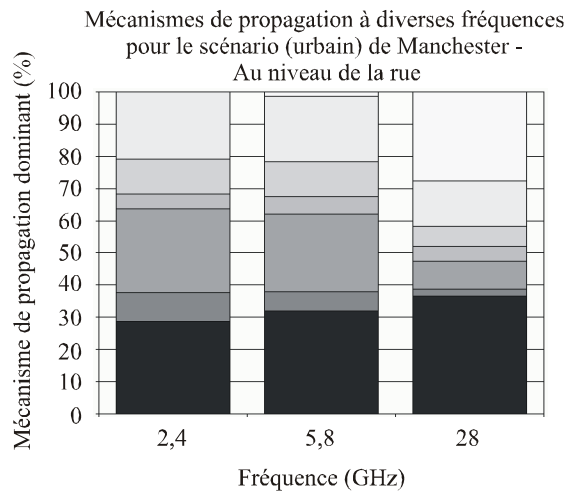
Mécanismes de propagation dominants en fonction de la couverture



a) Tous les points



b) Points au niveau des toits uniquement



c) Points au niveau de la rue uniquement

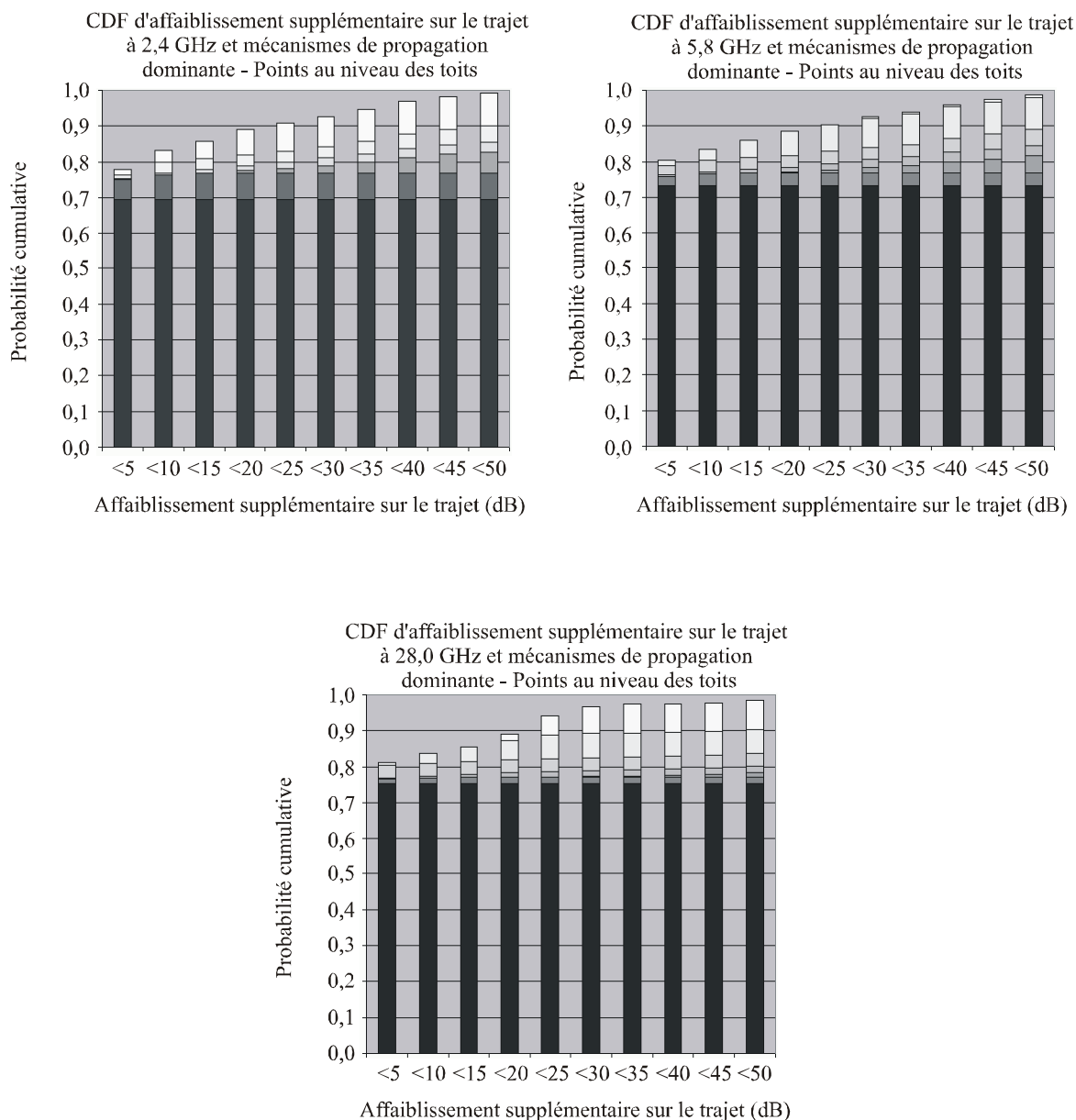
La répartition en pourcentage des mécanismes de propagation dominants à chaque fréquence est représentée sur la Fig. 8a). Les réflexions spectrales sont particulièrement importantes aux basses fréquences. La diffusion ne devient significative qu'à 28 GHz. Les Fig. 8b) et 8c) représentent respectivement la partie des résultats de la Fig. 8a) pour les emplacements au niveau des toits et celle pour les emplacements au niveau de la rue.

Il est utile d'examiner ensuite l'importance des mécanismes de propagation en fonction de l'affaiblissement supplémentaire sur le trajet car un mécanisme dominant particulier peut ne pas être important au moins sur le plan de la couverture si l'affaiblissement supplémentaire sur le trajet est élevé. La Fig. 9 montre le mécanisme de propagation dominant pour les points au niveau des toits à chaque fréquence, ce qui montre plus clairement l'influence de la diffusion aux fréquences élevées.

Il ressort des diagrammes que les réflexions spectrales et la diffraction autour d'un objet peuvent assurer une couverture supplémentaire importante (affaiblissement supplémentaire sur le trajet < 10 dB) à toutes les fréquences. D'autres mécanismes (transmission dans les bâtiments, diffraction au-dessus d'un objet, diffusion) sont nettement moins importants pour le calcul de la couverture. Toutefois, lorsqu'on étudie le brouillage, même les trajets sur lesquels l'affaiblissement est élevé deviennent importants notamment en cas d'utilisation de méthodes de modulation d'ordre élevé.

FIGURE 9

Affaiblissement supplémentaire sur le trajet et mécanismes de propagation dominants pour les points au niveau des toits



1410-09

2.3.5 Résumé des résultats de l'étude de cas

L'étude de cas fait apparaître un certain nombre de résultats intéressants concernant l'effet de différents mécanismes de propagation dans les calculs de couverture et de brouillage.

- Aux basses fréquences, la réflexion spéculaire et la diffraction autour d'objets peuvent avoir un effet considérable sur la couverture.
- La diffusion ne s'avère significative qu'à 28 GHz. Les affaiblissements supplémentaires sur le trajet (généralement > 25 dB) attribués à ce mécanisme font que ce domaine est peu important pour la couverture, mais il doit être pris en considération pour évaluer le brouillage.

- L'inclusion des réflexions spéculaires dans la modélisation du brouillage a une grande incidence sur le niveau de brouillage prévu, notamment en cas d'utilisation d'antennes directives. Pour un réseau fixe avec des antennes directives dans un scénario urbain, il convient de modéliser les réflexions pour pouvoir prévoir le brouillage avec précision.

Il est important de comprendre les limites du scénario: les résultats s'appliquent à une zone urbaine avec des émetteurs situés en hauteur avec des angles d'élévation élevés sur les courtes distances qui ont été examinées. Si les émetteurs étaient situés plus bas, les conclusions pourraient être différentes. Les scénarios ruraux et suburbains devraient en principe donner des résultats très différents en ce qui concerne la répartition des mécanismes de propagation dominants. L'absence d'objet réflecteur de grande taille réduirait l'influence de la réflexion spéculaire même si la diffusion resterait importante. Dans les scénarios suburbains et ruraux, l'inclusion et la modélisation correcte des données concernant la végétation sont également très importantes.

2.4 Orientations générales

Plusieurs bases de données d'Europe du Nord ont permis de dégager certaines tendances générales. On a calculé par trajectographie la couverture (à partir du niveau du bâtiment et de l'occultation causée par la végétation entre la station de base et les locaux de l'utilisateur) en fonction des hauteurs d'antenne de l'émetteur et du récepteur, des avantages qu'apporte la diversité découlant de plusieurs serveurs et de l'importance de l'occultation causée par la végétation. Les aspects généraux sont les suivants:

- La couverture peut dépendre pour beaucoup du site, en particulier s'il existe des caractéristiques topographiques ou si une occultation exceptionnelle par les bâtiments se produit à proximité de l'émetteur. Cependant, des études effectuées sur différents sites urbains/suburbains ont permis d'obtenir, pour la couverture, des chiffres compris entre 40% et 60% pour une cellule de 2 km à partir d'un mât d'émetteur situé à 30 m.
- La couverture augmente de 1% à 2% par mètre d'augmentation de la hauteur du mât de la station de base.
- La couverture augmente de 3% à 4% par mètre d'augmentation de la hauteur du mât des locaux de l'utilisateur.
- Une architecture cellulaire qui offre aux récepteurs le choix entre plusieurs stations de base permet d'accroître considérablement la couverture. Ainsi, pour des hauteurs d'antenne d'émetteur de 30 m, la couverture d'une cellule de 2 km est passée de 44% pour une seule station de base à 80% pour deux stations et à 90% pour quatre stations, même si les stations de base n'ont pas été spécialement choisies pour assurer une bonne visibilité.

3 Incidence des précipitations sur la disponibilité

Lorsqu'il est établi qu'un utilisateur a une visibilité directe non obstruée vers la station de base avec une marge adéquate du système en espace libre, il est nécessaire de calculer le pourcentage de temps pendant lequel le service sera disponible compte tenu de l'incidence des précipitations.

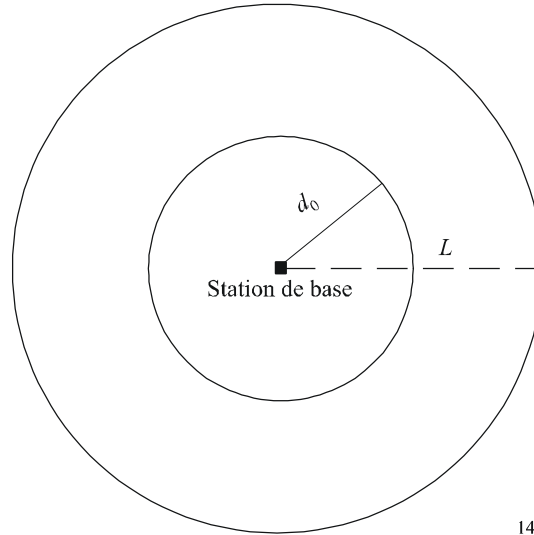
Pour toute liaison dans la zone de service des stations de base, il est possible d'estimer la disponibilité durant les précipitations au moyen des méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R P.530.

3.1 Couverture simultanée de zone

Etant donné que la pluie n'est pas uniforme horizontalement (deux dimensions), le modèle uni-dimensionnel décrit dans la Recommandation UIT-R P.530 pour une pluie non uniforme affectant des liaisons point à point ne peut être appliqué aux liaisons entre un point fixe et une zone. Il est

possible de prendre en compte la non-uniformité bidimensionnelle en appliquant une distribution des taux de précipitations moyens à la cellule de pluie étudiée. Pour une cellule à station centrale de rayon L , le schéma de la Fig. 10 représente la zone équivalente déterminée par le rayon d_0 qui est couverte pendant le pourcentage de temps choisi.

FIGURE 10
Schéma de la cellule à station centrale représentant le rayon de la zone de couverture équivalente durant les précipitations



1410-10

Une procédure de prévision de la couverture de zone a été élaborée sur la base de mesures radar de précipitations faites au Royaume-Uni pendant deux ans.

Pour une cellule à *station centrale* de rayon L (km) et une marge d'évanouissement F (dB) du système sur le bord:

Etape 1: Déterminer le taux de précipitations moyen sur la région $R_a(p)$ qui est dépassé pendant $p\%$ du temps:

$$R_a = (0,317L^{0,06} + 1)R^{1-0,15L^{0,2}} \quad (27)$$

où R est le taux de précipitations ponctuel pour la zone. On trouvera dans le Tableau 3 un exemple de ce paramètre pour des données radar obtenues au Royaume-Uni. S'agissant du taux de précipitations ponctuel, il est à noter que le taux de précipitations moyen sur une zone diminue très peu avec un dépassement de 0,1%, d'environ un tiers avec un dépassement de 0,01% et de moitié environ avec un dépassement de 0,001% pour une zone circulaire de 2,5 km de rayon.

Etape 2: Déterminer la distance de coupure d_0 pendant $p\%$ d'une année moyenne en résolvant numériquement d dans l'équation (27):

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,5 + \left(1,1 (2d^{-0,04} - 2,25) \right) \log(R_a(p)) \right) + 20 \log(d/L) = F \quad (28)$$

k et α étant les paramètres qui déterminent l'affaiblissement linéique dû à la pluie indiqué dans la Recommandation UIT-R P.838. Le terme $(1,5 + (1,1 (2d^{-0,04} - 2,25) \log(R_a(p))))$ représente le facteur de réduction de trajet applicable aux calculs de zones.

Etape 3: Pour la distance de coupure $d_0 \propto (L, p, F)$, la couverture de zone pour cette cellule est:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L} \right)^2 \quad \% \quad (29)$$

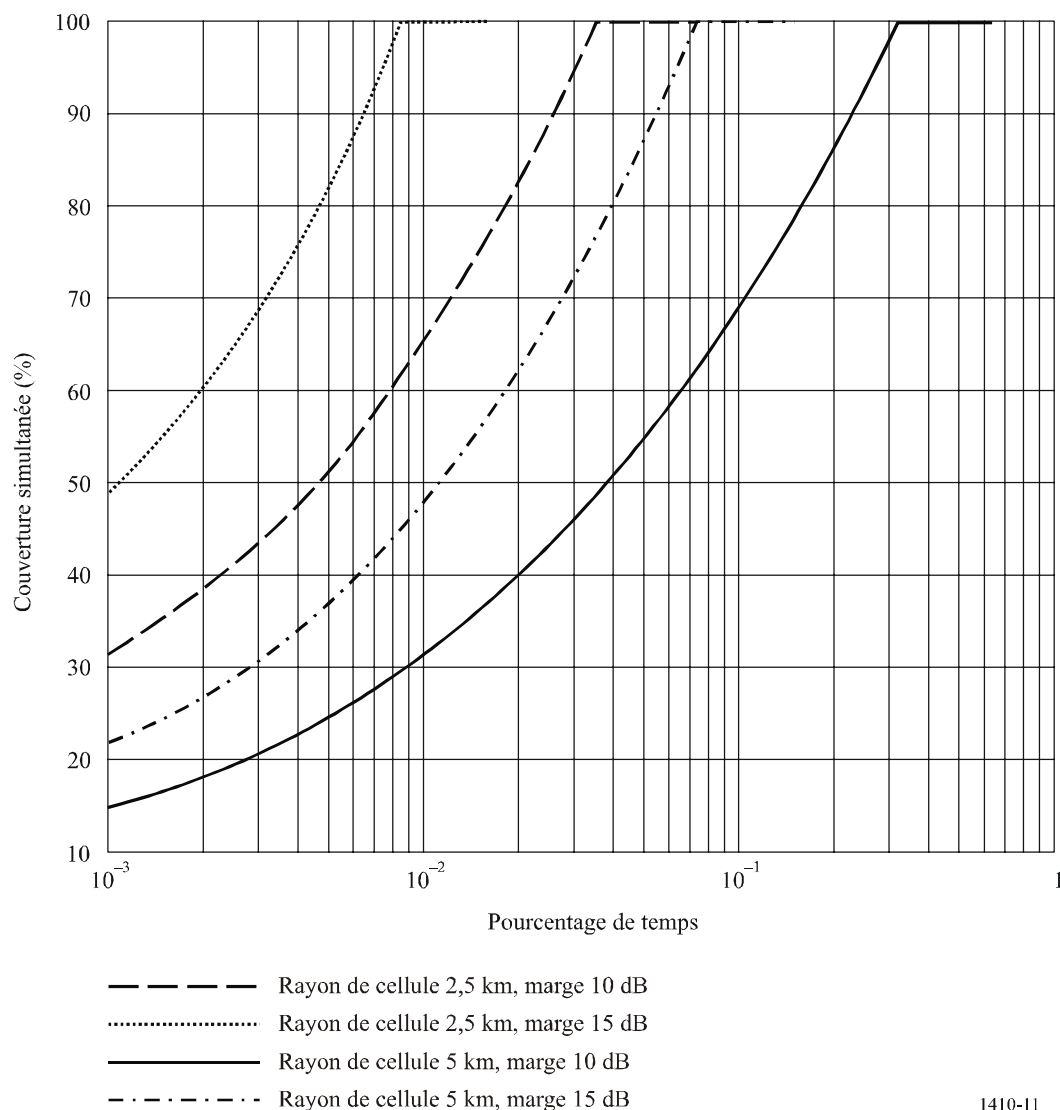
La Fig. 11 indique les résultats de la procédure donnée par les équations (27), (28) et (29) pour deux cellules à station centrale de 2,5 et de 5 km de rayon et pour deux systèmes, utilisant une polarisation verticale à 42 GHz, ayant une marge d'affaiblissement dû à la pluie de 10 et de 15 dB au bord de la cellule. Là encore, on suppose que le gain de l'antenne de l'émetteur est le même pour tous les utilisateurs. L'affaiblissement en espace libre est pris en compte dans les calculs (équation (28)).

TABLEAU 3

Taux de précipitations ponctuel et moyen sur une zone obtenus à partir d'un ensemble de données radar relevées pendant deux ans au Royaume-Uni

Pourcentage de temps	Taux de précipitations ponctuel, R (mm/h)	Taux de précipitations moyen, R (mm/h)	
		Rayon = 2,5 km	Rayon = 5 km
0,001	65,6	36,0	33,0
0,003	46,2	29,0	23,4
0,01	29,9	19,4	17,1
0,03	18,1	16,3	12,6
0,1	9,8	9,5	8,5
0,3	5,0	4,9	4,8
1	2,0	2,1	2,1

FIGURE 11

Application de la procédure à l'emplacement $-1,5^{\circ}$ O, 51° N

1410-11

3.2 Amélioration de la diversité d'acheminement

Les précipitations varient considérablement dans le temps et dans l'espace, à la fois verticalement et horizontalement. Pour une seule liaison entre deux terminaux, cette variabilité est prise en compte dans la présente modélisation par exemple, au moyen d'une longueur de trajet équivalente. Supposons qu'un utilisateur puisse se connecter à tout instant à deux stations de base ou plus. Le présent paragraphe explique dans quelle mesure la disponibilité sera améliorée si un tel système est installé.

On prend comme hypothèse un réseau de type étoile avec un nœud central comprenant deux émetteurs et un récepteur, les deux longueurs de trajet étant supposées identiques et l'espacement angulaire variant entre 0° et 360° .

La pluie n'étant pas uniforme horizontalement, les statistiques des affaiblissements sont différentes pour le trajet unique et pour les deux trajets de diversité. La Fig. 12 présente les statistiques types des affaiblissements pour un trajet non protégé et pour les trajets de diversité combinés. L'amélioration apportée par l'espacement angulaire, qui peut être exprimée sous forme d'amélioration due à la diversité $I(A)$ ou de gain de diversité $G(A)$, est définie par les formules suivantes:

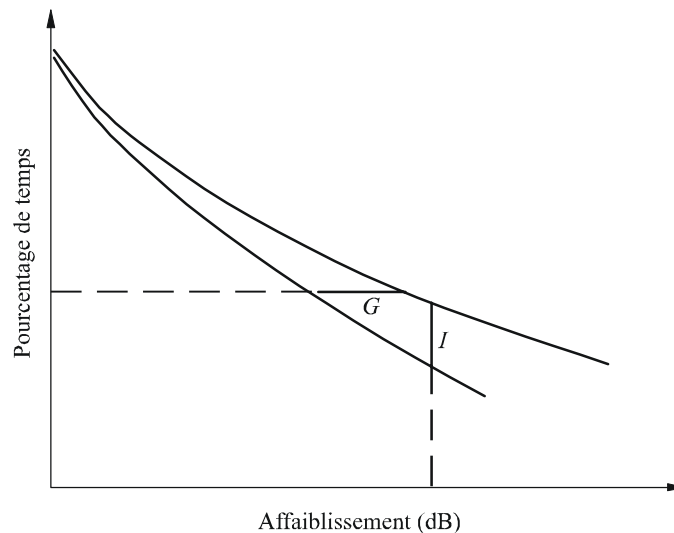
$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \quad (30)$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t) \quad (31)$$

$P_d(A)$ étant le pourcentage de temps dans le trajet de diversité combiné avec une profondeur d'évanouissement supérieure à A et $P(A)$ étant le pourcentage de temps pour le trajet non protégé. De même, $A_d(t)$ est la profondeur d'évanouissement dans le trajet de diversité combiné qui caractérise le pourcentage de temps t et $A(t)$ correspond au trajet non protégé.

FIGURE 12

Exemple de statistiques des affaiblissements en fonction de la diversité angulaire de trajet



Le gain de diversité G se calcule selon les étapes suivantes:

Etape 1: Etablir l'angle θ entre deux trajets de longueur d_{max} et d_{min} .

Etape 2: Calculer G_{sym} :

$$G_{sym} = a_g d_{max}^{b_g}$$

en fonction de d_{max} et en utilisant les coefficients a_g et b_g du Tableau 4 pour différents pourcentages de disponibilité de la liaison.

TABLEAU 4

Valeurs des coefficients pour différentes disponibilités

Disponibilité (%)	a_g	b_g
99	0,123	1,366
99,5	0,218	1,308
99,7	0,342	1,259
99,9	0,648	1,173
99,95	0,810	1,165
99,97	1,132	1,169
99,99	2,041	1,077

Etape 3: Calculer le facteur d'asymétrie de trajet a au moyen de la formule:

$$a = c \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{-d} \tag{32}$$

où les coefficients c et d ont les valeurs énumérées au Tableau 5.

TABLEAU 5

Valeurs des coefficients c et d pour différentes disponibilités

Disponibilité (%)	c	d
99	0,907	2,852
99,5	0,946	2,976
99,7	0,969	2,761
99,9	0,971	2,821
99,95	0,930	2,347
99,97	0,905	2,316
99,99	1,000	2,270

Pour des longueurs de trajet égales, le facteur d'asymétrie a est égal à 1.

Etape 4: Le gain de diversité G pour la disponibilité recherchée est:

$$G = G_{sym} a \sin \left(\frac{\theta}{2} \right)^x \quad \text{dB}$$

où x est donné par:

$$x = 0,87 \ln \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right) + 0,55 \quad \text{pour } 1 \leq (d_{max}/d_{min}) \leq 2$$

L'amélioration de diversité I est calculée selon les étapes suivantes:

Etape 1: Déterminer l'angle θ entre les deux trajets d_{max} et d_{min} .

Etape 2: Calculer I_{sym} au moyen de la formule suivante:

$$I_{sym} = 10^{(a_i L^{b_i})} - 1$$

où les valeurs de a_i et b_i sont tirées du Tableau 6 concernant l'affaiblissement dépassé pendant divers pourcentages de temps.

TABLEAU 6

Valeurs des coefficients pour différentes profondeurs d'évanouissement dépassées en fonction du pourcentage de temps A

Temps (%)	a_i	b_i
1	0,082	0,491
0,5	0,114	0,431
0,3	0,106	0,535
0,1	0,155	0,559
0,05	0,196	0,566
0,03	0,324	0,406

Etape 3: Calculer le facteur d'asymétrie du trajet a comme suit:

$$a = c \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{-d} \quad (33)$$

où les coefficients c et d sont indiqués dans le Tableau 7.

TABLEAU 7

Valeurs des coefficients c et d pour différentes profondeurs d'évanouissement dépassées pour le pourcentage de temps indiqué

Temps (%)	c	d
1	0,851	2,355
0,5	0,961	2,493
0,3	0,882	2,288
0,1	0,768	2,631
0,05	0,762	2,198
0,03	0,858	2,427

Pour des longueurs de trajet égales, le facteur d'asymétrie a est égal à 1.

Etape 4: L'amélioration de diversité I pour l'affaiblissement utile est:

$$I = 1 + I_{sym} \operatorname{asin}\left(\frac{\theta}{2}\right)^x$$

où la valeur de x est donnée par la formule:

$$x = 0,61 \ln\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right) + 0,84 \quad \text{pour } 1 \leq (d_{max}/d_{min}) \leq 2$$

A noter que les méthodes ont été élaborées à partir de taux de précipitation relevés par radar au Royaume-Uni.

4 Distorsion du canal de propagation

Le présent paragraphe traite des effets instantanés, sur le canal de propagation, de la dynamique de la végétation et de la propagation par trajets multiples (bâtiments et terrain). Les données existantes étant rares, les résultats des mesures disponibles sont donnés à titre indicatif. On trouvera des renseignements sur la variabilité des signaux et l'écart type, s'agissant de la propagation à travers de la végétation en mouvement, dans la Recommandation UIT-R P.833.

4.1 Affaiblissement sélectif en fréquence dû à la végétation

On a mesuré, au moyen d'un ensemble de filtres, une transmission effectuée dans une largeur de bande de 34 MHz pour étudier l'éventuelle apparition d'un évanouissement sélectif en fréquence à travers le canal. L'ensemble de filtres comprenait huit voies d'une largeur de 1,6 MHz (à -3 dB) séparées par 3 MHz et placées au milieu du canal.

Les mesures ont été effectuées derrière un bouleau à une distance de 15 m, avec un intervalle d'échantillonnage de 100 ms. Comme il n'y avait pas de vent pendant la période de mesure, un environnement venteux a été simulé au moyen de cordes attachées à l'arbre. On trouvera sur la Fig. 13 une comparaison des niveaux de signal des différentes voies dans des conditions de vent fort. Le faible niveau de variation observé à travers le canal semble indiquer qu'il n'y a pas d'évanouissement sélectif en fréquence important. La variation dans le temps du niveau du signal pourrait donc être due à la variation de l'obstruction ou à la densité de branches et de feuilles se trouvant entre le récepteur et l'émetteur, ou due à la propagation par trajets multiples pour laquelle les différences des temps de propagation sont très faibles.

Pour mieux vérifier les observations, on a monté une expérience avec un combineur de puissance maximale et deux antennes individuelles séparées de 72 cm. Une transmission télévisuelle MPEG-2 d'essai a été faite à 42 GHz en utilisant le format DVB-S (CED MDP-4 1/2). Les signaux provenant de chaque antenne ainsi que les signaux combinés à travers le combineur de puissance maximale ont été injectés dans trois boîtiers DVB-S et moniteurs vidéo. La géométrie a été organisée de façon que les deux antennes reçoivent des signaux à travers des branches d'arbre en mouvement. Les deux systèmes DVB-S à antenne unique ont subi une perte régulière de paquets. Le taux de perte de paquets, trop important pour être corrigé par le décodeur, entraînait de fréquentes pertes de la vidéo. A l'inverse, le signal à puissance maximale combinée a subi beaucoup moins de pertes de paquets; le décodeur MPEG-2 a donc pu compenser et l'image est restée stable.

4.2 Propagation par trajets multiples due aux réflexions

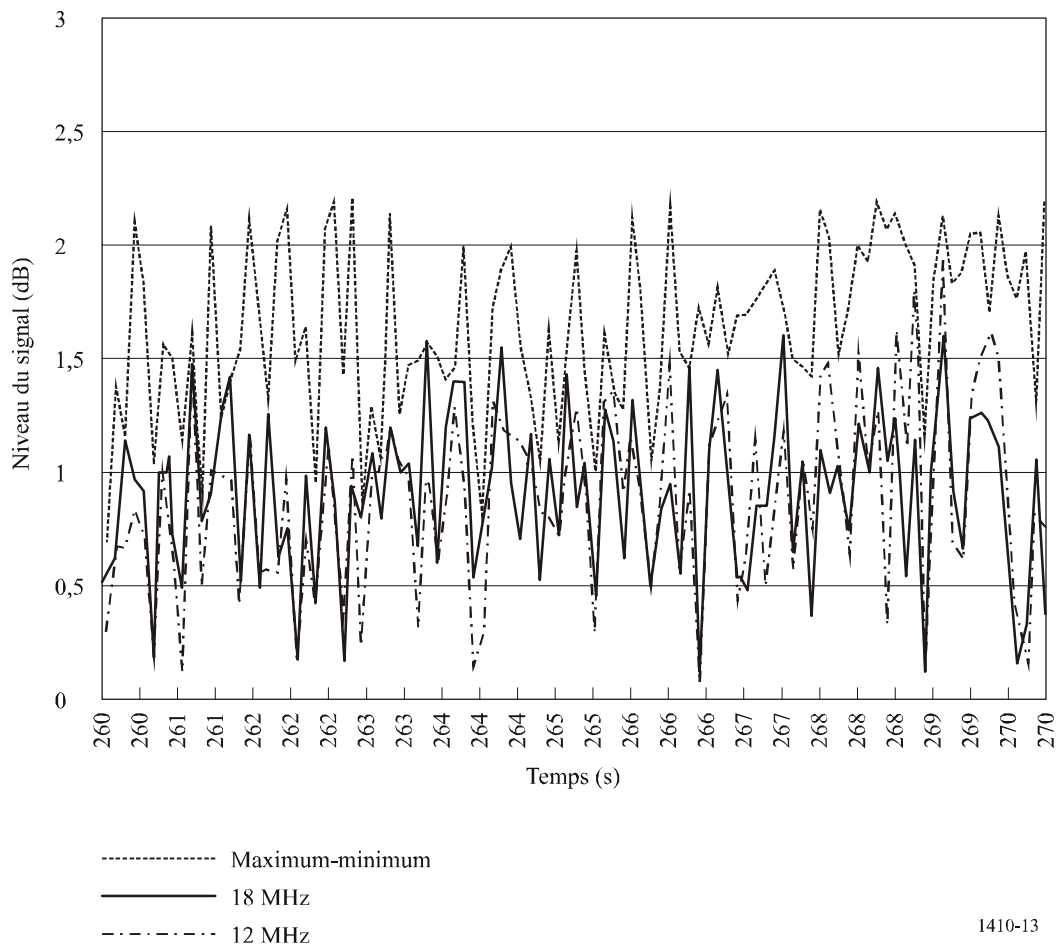
4.2.1 Résultats trajectographiques

Des simulations trajectographiques ont démontré que le problème de la propagation par trajets multiples semble mineur dans les conditions dans lesquelles fonctionnera le système. La très faible largeur du faisceau de l'antenne du récepteur entraîne un très grand affaiblissement des signaux se propageant par trajets multiples. Seuls les rayons rasants très peu profonds provenant des toits situés à proximité et du sol pénètrent dans le récepteur avec une amplitude appréciable. Il en résulte que les valeurs d'étalement du temps de propagation obtenues grâce aux simulations sont très faibles.

Les rayons diffractés n'ont pas été examinés pendant les simulations trajectographiques, mais des travaux antérieurs avaient montré qu'il existait très peu de positions pouvant utiliser des rayons diffractés. En conséquence, il y aura probablement peu d'emplacements où les rayons diffractés constitueront une source majeure de brouillage.

FIGURE 13

Comparaison des niveaux de signal des voies dans des conditions de vent fort



1410-13

A titre d'exemple, on a effectué des calculs trajectographiques de l'étalement du temps de propagation correspondant aux emplacements des récepteurs en utilisant une grande base de données (Oxford, Royaume-Uni). Ces calculs donnent des valeurs extrêmement faibles en raison des niveaux très bas de la propagation par trajets multiples. Il a été constaté que la valeur efficace de l'étalement du temps de propagation était d'environ 0,01 ns, ce qui correspond approximativement à une largeur de bande de cohérence de 15 GHz. Cela ne devrait pas poser de problème pour un système d'accès radioélectrique à large bande. Il est peu probable que la valeur efficace

réelle de l'étalement du temps de propagation soit aussi faible dans la réalité en raison des rayons diffractés susmentionnés, mais on peut encore considérer comme réaliste une largeur de bande de cohérence allant jusqu'à 5 GHz. L'écart type de la valeur efficace de l'étalement du temps de propagation est de l'ordre de 0,01 ns.

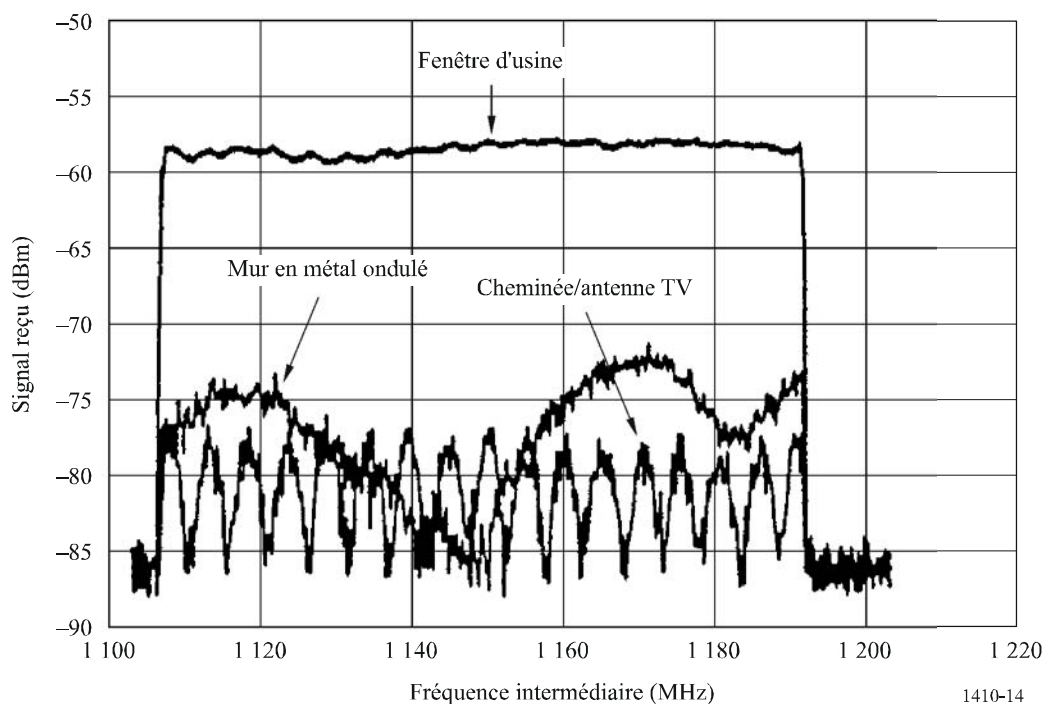
4.2.2 Résultats des mesures

Les réflexions dues aux bâtiments peuvent être considérées à la fois comme une possibilité de remplissage de zone d'ombre et comme une propagation par trajets multiples nuisible. Certaines observations faites au moyen d'un balayage de fréquence de 80 MHz ont montré qu'il était possible, en ajoutant les signaux réfléchis, d'accroître de 9% le nombre des emplacements recevant un signal adéquat pour la couverture. Il convient de noter cependant que l'utilisation de signaux réfléchis pour fournir un service pose plusieurs problèmes. Premièrement, le signal doit être stable, ce qui signifie que le signal incident arrivant sur l'objet réflecteur doit avoir un trajet en LoS. Si une partie quelconque du trajet traverse la végétation ou un trajet susceptible de subir une occultation du fait de la circulation, le signal obtenu sera variable dans le temps. Deuxièmement, l'objet réflecteur même doit être permanent et stable.

L'étendue et les rugosités de la surface du bâtiment réflecteur ont une très grande incidence sur la réponse en fréquence du canal. La Fig. 14 indique la réponse du canal mesurée pour trois signaux réfléchis différents: le premier signal provient d'une fenêtre d'usine et le deuxième de la cheminée d'une maison à terrasse (également équipée d'une antenne de télévision Yagi) tandis que le troisième est réfléchi par le mur en métal ondulé d'un grand bâtiment de vente au détail. S'agissant de ce dernier, il convient de noter que le mur en métal ondulé assurait une réflexion angulaire étendue, et non une simple réflexion spéculaire. Les sites se trouvaient à 1,34 km, 1,57 km et 616 m respectivement de l'émetteur.

FIGURE 14

Réponse en fréquence pour les réflexions mesurées en trois emplacements différents



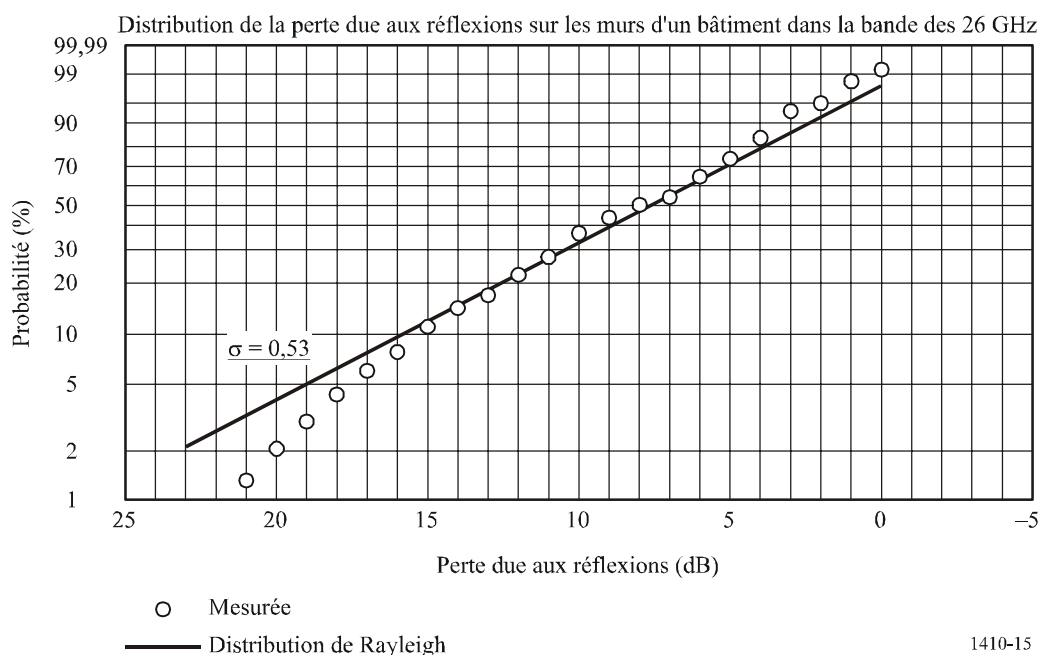
On peut constater que la fenêtre d'usine donne une réponse assez uniforme car elle se comporte comme un miroir plat et ne comprend qu'un seul élément spéculaire. Par contre, le mur en métal ondulé et la cheminée donnent une ondulation distincte qui correspond aux différences de longueur de trajet (selon l'hypothèse d'un modèle à deux trajets) de 6 m et de 60 m respectivement. S'agissant de la réflexion de la cheminée, la grande longueur de trajet peut être imputée à la combinaison de la réflexion d'un autre objet situé à 30 m environ ou derrière la cheminée. Dans le cas du mur en métal ondulé, la différence de longueur de trajet de 6 m peut être obtenue à partir de différentes parties du mur même, vu que l'ensemble du bâtiment, et pas uniquement la petite zone spéculaire, pourrait contribuer à la réflexion des signaux.

Des mesures de spectre large bande ont été réalisées dans une zone suburbaine dans les bandes à 5 GHz et à 25 GHz. La bande de fréquences occupée dans le spectre de transmission est de 26 MHz et la partie centrale de 10 MHz du spectre est pratiquement plate. Pour chaque spectre, la dispersion d'amplitude maximale dans la bande peut être calculée à partir du niveau maximal et du niveau minimal dans la partie centrale de 10 MHz du spectre. Dans l'hypothèse d'un modèle de brouillage à deux ondes, le rapport (D/U) entre l'onde D en tant qu'onde directe et l'onde U en tant qu'onde réfléchi est un facteur important pour l'évaluation de la dispersion d'amplitude dans la bande. L'occultation due à des obstacles comme les maisons et les arbres environnants a une incidence sur la dispersion d'amplitude dans la bande au niveau d'un terminal. Si on suppose que le niveau de l'onde U est constant, on peut affirmer que la valeur du rapport D/U pour le trajet de propagation est de 20-30 dB. Ainsi, dans le cas de l'utilisation d'une antenne de terminal dont le gain est proche de 15 dBi et de l'obtention d'une occultation supérieure à 20 dB, la variation d'amplitude dans la bande a une dispersion nuisible. Le gain de l'antenne directive a une incidence sur le niveau de suppression des ondes brouilleuses. On peut supposer que le rapport D/U vaut 50 dB pour une antenne dont le gain est de 32 dBi et qu'il vaut 30 dB pour une antenne dont le gain est de 12 dBi. La différence entre les valeurs de gain pour les deux antennes correspond à la différence entre les valeurs de D/U ci-dessus.

Les mesures en balayage de fréquence au moyen d'un signal polarisé verticalement à 26 GHz, prises avec des angles de réflexion compris entre $87,5^\circ$ et 89° (c'est-à-dire presque perpendiculaires à la surface du mur) ont fait apparaître un affaiblissement moyen de 7,5 dB. L'émetteur et le récepteur étaient situés au même endroit. Les distances jusqu'aux murs variaient de 37 m à 402 m. On a utilisé quatre bâtiments dont la surface des murs, vitrée, carrelée et métallique présentait des irrégularités comprises entre 3 cm et 75 cm. Il convient de noter que le vecteur champ électrique était parallèle aux murs. Une distribution cumulative de la perte due aux réflexions est illustrée à la Fig. 15. L'écart type de la différence entre les mesures et la distribution de Rayleigh s'est avéré être $\sigma = 0,53$ dB.

FIGURE 15

Distribution cumulative de la perte due aux réflexions sur les murs d'un bâtiment mesurée à une fréquence de 26 GHz



5 Brouillage

Les systèmes radioélectriques cellulaires sont conçus de manière à assurer un compromis entre la réutilisation des fréquences et le rapport porteuse/brouillage, C/I . Un rapport C/I minimum pourrait être nécessaire pour qu'un système donné fonctionne de manière satisfaisante, c'est-à-dire selon la qualité de fonctionnement prescrite.

Etant donné le rapport C/I minimum requis, il devient aisé d'établir un modèle régulier de réutilisation des fréquences qui satisfait aux prescriptions. Cependant, les caractéristiques du terrain devraient être prises en compte et l'emplacement de la station de base devrait être choisi avec soin en vue d'obtenir la qualité de fonctionnement voulue pour le système d'accès radioélectrique.

Dans la plupart des cas, seuls quelques utilisateurs seront concernés à cause de leurs antennes de terminal à faisceau étroit. Les largeurs de faisceau sont de l'ordre de 2° à 3° . Pour les utilisateurs concernés, il est possible d'utiliser les modèles décrits dans les Recommandations UIT-R P.452 et UIT-R P.530, afin d'estimer le pourcentage de temps pendant lequel le signal nuisible sans LoS et le signal renforcé en LoS émanent respectivement de la station de base brouilleuse. Au-dessus de 37 GHz toutefois, on ne dispose d'aucune donnée permettant de corroborer les valeurs prévues.

Le problème du brouillage a été évalué à partir des données provenant de 111 emplacements étudiés lors d'une campagne faite au Royaume-Uni pour mesurer la couverture de zone. Un deuxième émetteur a été étudié comme source potentielle de brouillage. Dans l'ensemble de données, seule une position a révélé un signal de l'émetteur brouilleur dont le niveau est supérieur au seuil de bruit, dans la largeur du faisceau de l'antenne pointée vers l'émetteur utile. Même dans ce cas, il a été constaté que le rapport du signal utile au signal brouilleur était de 15 dB. Cela semblerait confirmer que le brouillage intercellulaire sera probablement négligeable en raison de la faible largeur de faisceau des antennes du récepteur.