

RECOMMANDATION UIT-R P.1410-1

**Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires
pour la conception de systèmes d'accès radioélectrique
de terre à ondes millimétriques et à large bande
fonctionnant entre 20 et 50 GHz environ**

(Question UIT-R 203/3)

(1999-2001)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes d'accès radioélectrique de Terre à ondes millimétriques et 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 en ondes millimétriques 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 ondes millimétriques et à large bande fonctionnant entre 20 et 50 GHz environ.

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 à ondes millimétriques, ceux-ci étant actuellement disponibles sur le marché. Plusieurs systèmes sont actuellement étudiés et mis en service, notamment le système de distribution multipoint locale, le système de communication multipoint locale 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*).

En raison de l'évolution rapide des systèmes radioélectriques, il est nécessaire de disposer de bonnes orientations en matière de conception en ce qui concerne les questions de propagation des ondes radioélectriques. On trouvera dans la présente Recommandation un certain nombre de résultats obtenus dans l'étude de la propagation relative aux systèmes radioélectriques à ondes millimétriques ainsi que quelques méthodes de prévision.

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 § 2.1.2.

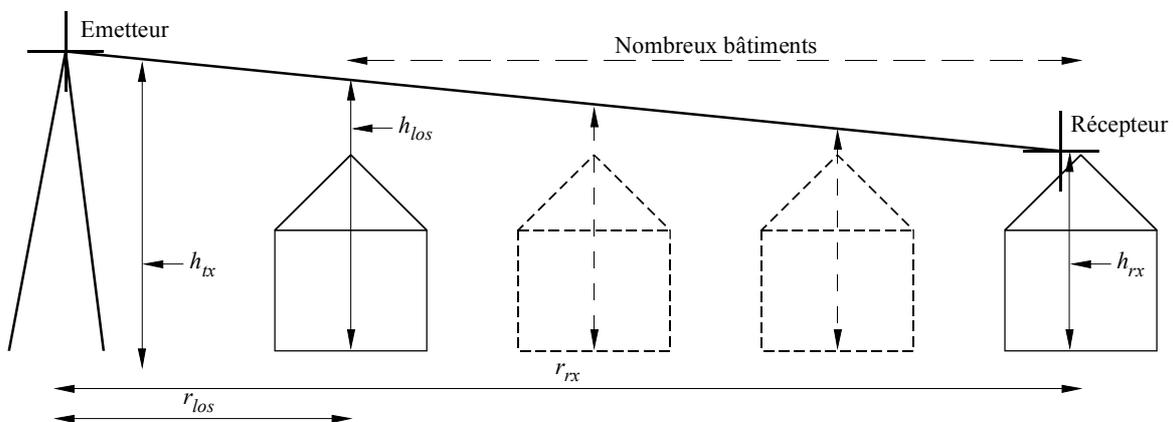
2.1.1 Conditions nécessaires pour le tracé de rayons

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



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 § 4.3.1).

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).

TABLEAU 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 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 (1). 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:

$$h_{los} = h_{tx} - \frac{r_{los}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (1)$$

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:

$$P(\text{LoS}) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{hauteur_du_bâtiment} < h_{\text{los}}) \quad (2)$$

b_r étant le nombre de bâtiments traversés.

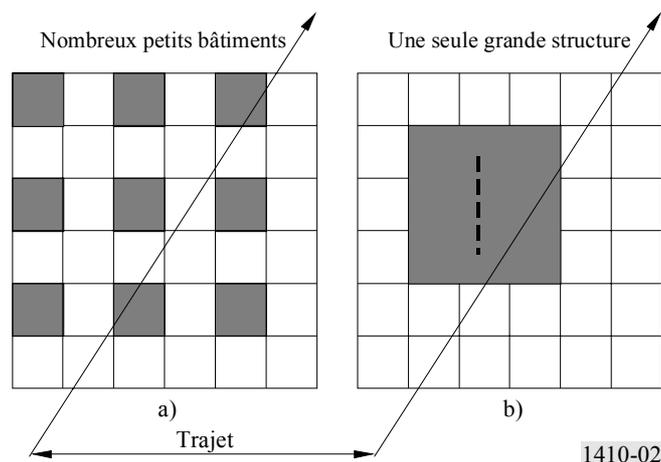
Trois paramètres sont nécessaires pour ce modèle simple:

- 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. 2. Dans la Fig. 2 a) et b) 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. 2a) que dans la Fig. 2b). α seul ne permet pas de faire la distinction entre les deux configurations montrées à la Fig. 2. Si les bâtiments sont de même hauteur dans la Fig. 2a) que dans la Fig. 2b), 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.

FIGURE 2
Deux scénarios pour la même zone couverte mais avec un nombre différent d'interactions au niveau du trajet



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

$$P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}}}{\gamma^2} h \quad (3)$$

2.1.3 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:

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \tag{4}$$

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

$$b_r = \text{floor}(r_{rx} b_1) \tag{5}$$

la fonction floor étant introduite pour faire en sorte qu'un nombre entier de termes soit inclus dans l'équation (2).

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

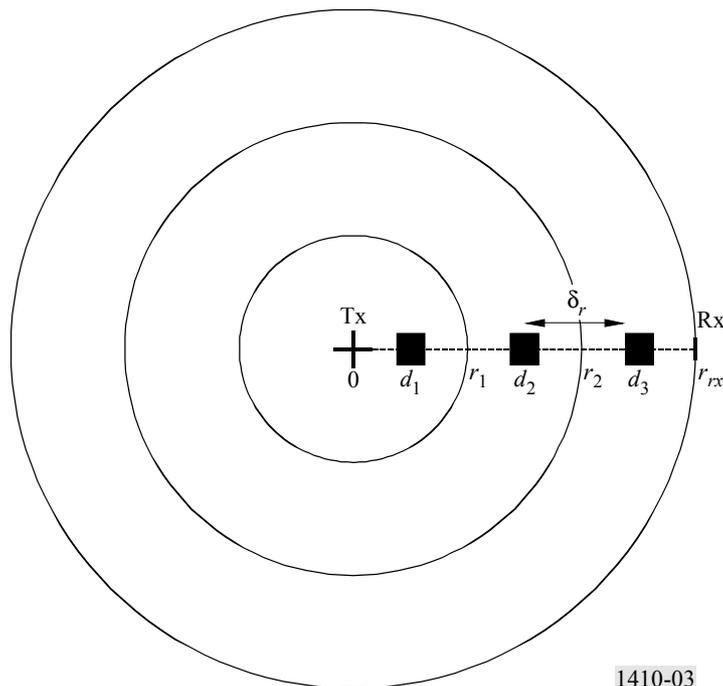
Etape 1: Calculer le nombre de bâtiments b_r situés entre les points Tx et Rx à l'aide de l'équation (5).

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:

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0,1, \dots, (b_r - 1)\} \tag{6}$$

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

FIGURE 3
Emplacements des bâtiments par rapport au récepteur (Rx) situé à une distance r_{rx} de l'émetteur (Tx)



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 (1).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} P_i &= \int_0^{h_i} P(h) dh \\ &= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2} \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$P_{los,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (9)$$

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:

$$W_i = 2i + 1 \quad (10)$$

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:

$$C P_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{los,i} W_i}{b_r^2} \quad (11)$$

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.

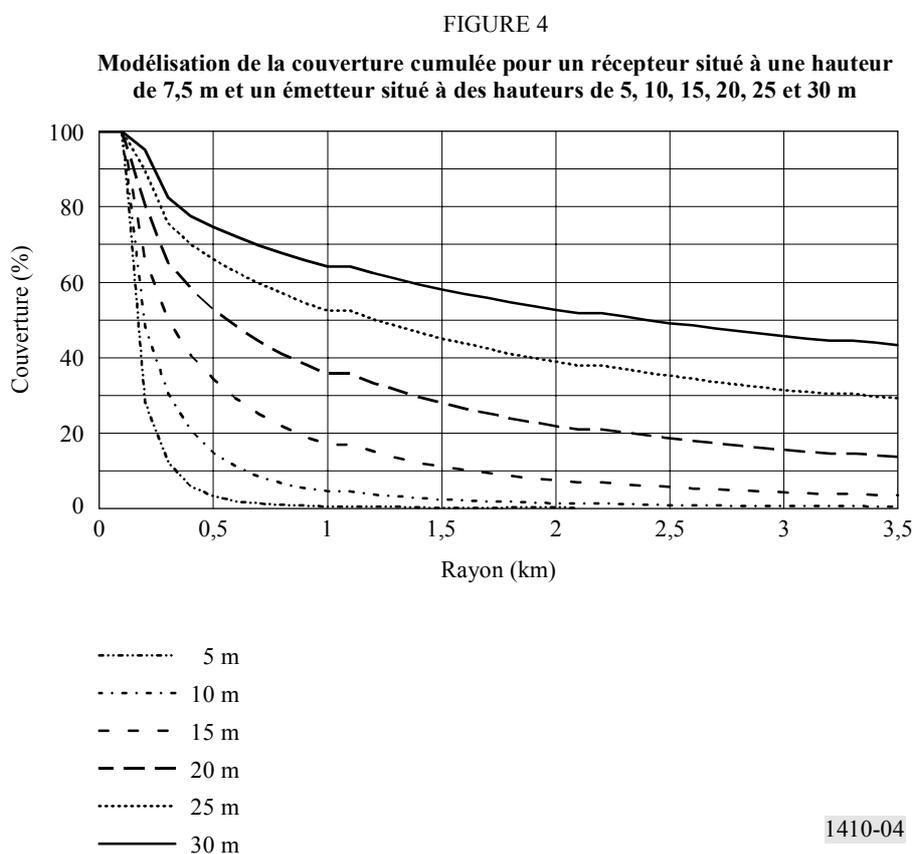
- De fait, les récepteurs sont placés sur le toit des bâtiments, de sorte que la distribution des hauteurs des récepteurs est similaire à celle des hauteurs des bâtiments. Dans le modèle, on suppose que les récepteurs se trouvent à une hauteur constante par rapport au sol. Une autre solution consiste à déterminer la hauteur des récepteurs à partir de la distribution des bâtiments, ce qui là encore dépendra des régions.

2.1.4 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:

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

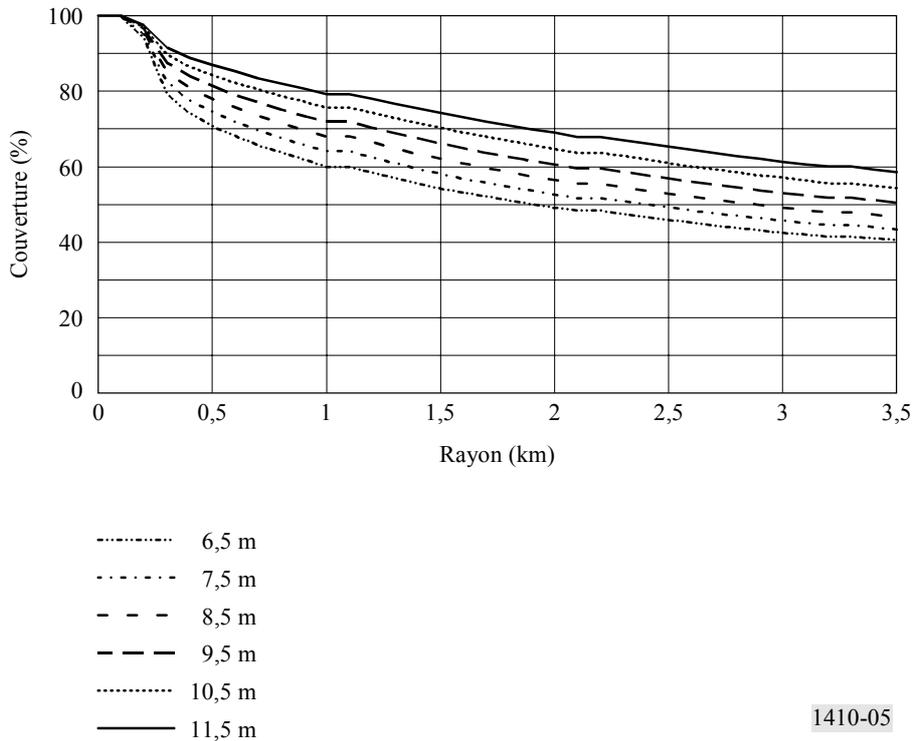
Les Fig. 4 et 5 indiquent les résultats obtenus à partir du modèle. La Fig. 4 représente la couverture en fonction de la hauteur de l'émetteur et la Fig. 5, la couverture en fonction de la hauteur du récepteur.



Avec le modèle, on obtient des prévisions ayant la même forme de base et le même niveau de couverture global 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 5

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



1410-05

2.1.5 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.

2.2 Affaiblissement dû à la végétation

L'occultation due aux arbres peut limiter considérablement le nombre de domiciles auquel un service peut être fourni. Il est donc très important de disposer d'un modèle fiable concernant les effets et l'étendue 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 la puissance du signal après propagation à travers un seul arbre est insuffisante pour un service.

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 Orientations générales

Plusieurs bases de données d'Europe du Nord ont permis de dégager certaines tendances générales. Le tracé de rayon a été utilisé pour calculer 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% pour chaque mètre d'augmentation de la hauteur du mât de la station de base.
- La couverture augmente de 3% à 4% pour chaque 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 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.
- L'incidence de l'occultation par les arbres dépend pour beaucoup du site et varie selon les emplacements. Il ressort d'une étude portant sur deux villes du Royaume-Uni que 10% à 20% des bâtiments étaient obstrués par des arbres. Paradoxalement, le pourcentage des bâtiments obstrués par des arbres a effectivement *augmenté* avec l'accroissement de la hauteur de l'émetteur.
- 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).

3 Incidence des précipitations sur la disponibilité

Lorsqu'il est établi qu'un utilisateur a une LoS 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.

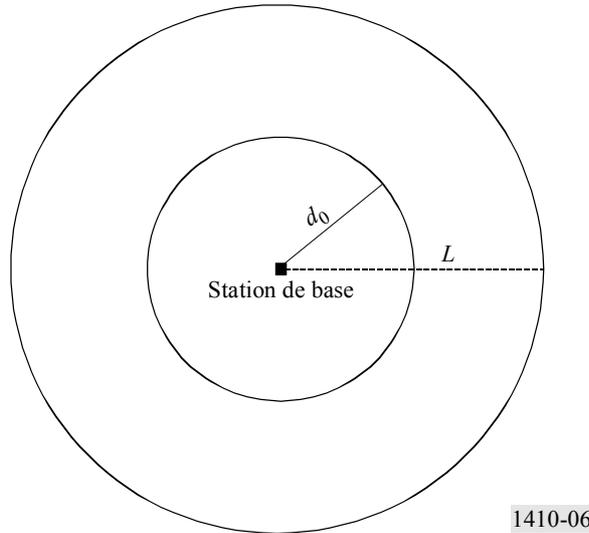
Pour toute liaison dans la zone de service des stations de base, il est possible d'estimer la disponibilité durant les précipitations au moyen des méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R P.530.

3.1 Couverture simultanée de zone

Etant donné que la pluie n'est pas uniforme horizontalement (deux dimensions), le modèle unidimensionnel 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. 6 représente la zone équivalente déterminée par le rayon d_0 qui est couverte pendant le pourcentage de temps choisi.

FIGURE 6

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



1410-06

Une procédure visant à prévoir la couverture de zone a été élaborée sur la base de mesures radar de précipitations faites au Royaume-Uni sur une durée de 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: Chercher le taux de précipitations moyenné sur la région $R_a(p)$ qui est dépassé pendant $p\%$ du temps au moyen d'un réseau de pluviomètres, d'un radar pluviométrique ou de modèles de pluie analytiques. On trouvera dans le Tableau 2 un exemple de ce paramètre pour des données radar obtenues au Royaume-Uni. S'agissant du taux de précipitation ponctuel, il est à noter que le taux de précipitation moyenné 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 (12):

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,15 + 1,1 (2d^{-0,04} - 2,25) \right) \log(R_a(p)) + 20 \log(d/L) = F \quad (12)$$

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 $(1,15 + 1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p))$ 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:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L} \right)^2 \quad \% \quad (13)$$

Le Tableau 2 donne un exemple de précipitations moyennées sur une zone obtenu au moyen d'observations faites par radar au Royaume-Uni. Le taux de précipitation ponctuel ainsi que les valeurs moyennées sur une zone ont été obtenus à partir des données radar. A noter que les valeurs moyennées sur une zone font apparaître des taux qui diminuent à mesure que la zone faisant l'objet du moyennage s'agrandit. La Fig. 7 indique les résultats de la procédure 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. La perte en espace libre est prise en compte dans les calculs.

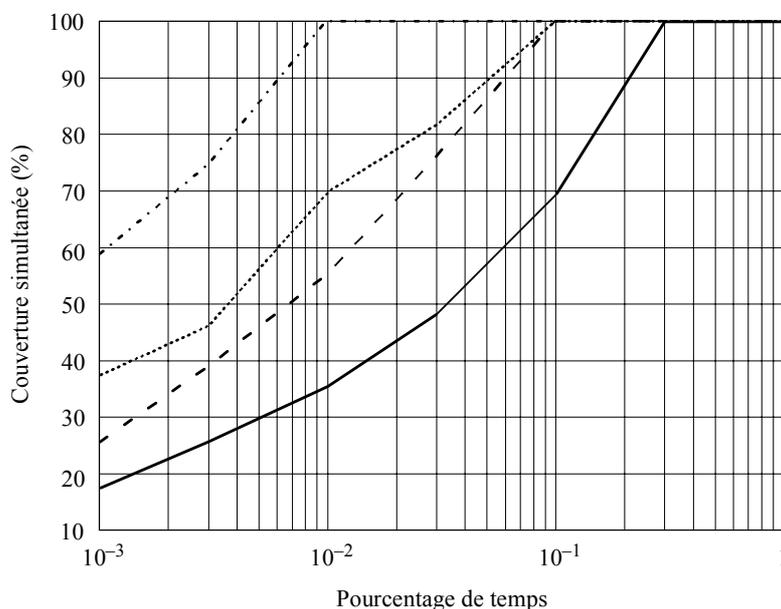
TABLEAU 2

Taux de précipitation ponctuels et moyennés sur une zone obtenus à partir d'un ensemble de données radar mesurées pendant deux ans au Royaume-Uni

Pourcentage de temps	Taux de précipitation ponctuel, R (mm/h)	Taux de précipitation moyenné, 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 7

Application de la procédure (au moyen des données de taux de précipitations du Tableau 2)



	Rayon de cellule (km)	Marge (dB)
.....	2,5	10
- - - - -	2,5	15
—————	5	10
- - - - -	5	15

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 effective. 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. 8 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:

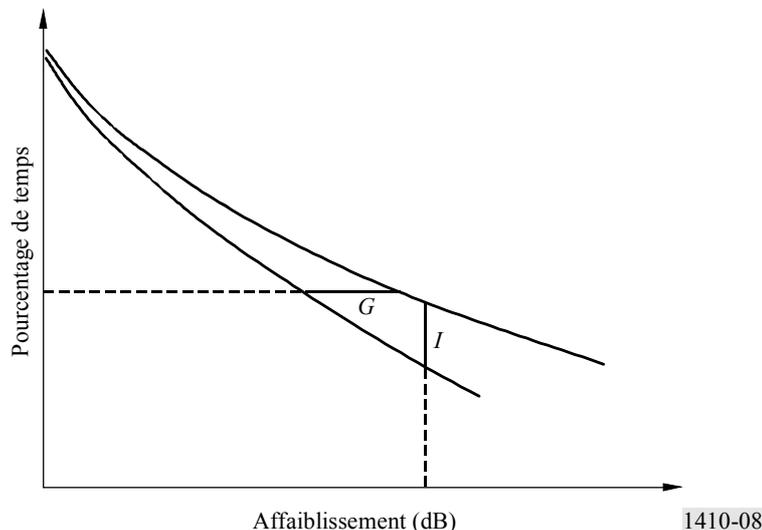
$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \quad (14)$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t) \quad (15)$$

$P_d(A)$ 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 8

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



Il est possible de modéliser la dépendance de l'amélioration I et du gain de diversité G par rapport à l'espacement angulaire de la manière suivante:

$$I(A) = 1 + (I_{max} - 1) \sin(\theta/2) \quad (16)$$

$$G(A) = G_{max} \sin(\theta/2) \quad (17)$$

θ étant l'espacement angulaire compris entre 0° et 360° .

On a utilisé les observations de la structure des précipitations effectuées au radar pendant deux ans au Royaume-Uni pour simuler l'affaiblissement à 42 GHz. Pour deux trajets de 4 km à polarisation verticale, ces résultats indiquent une valeur I_{max} de l'ordre de 2 à 5 pour un affaiblissement compris entre 10 et 20 dB. De même, pour le gain de diversité G_{max} , les valeurs varient entre 1 et 7 dB pendant un pourcentage de temps de 1% à 0,01% d'une année moyenne. Les calculs théoriques fondés sur un modèle de précipitations physique pour des précipitations de convection et étendues concordent étroitement avec le gain de diversité résultant des données radar pendant des pourcentages de temps de 0,01%, 0,1% et 1%.

Les mesures d'un signal polarisé verticalement à 42 GHz dans un réseau en étoile situé en Norvège font apparaître une amélioration I de 3 à 4 avec un affaiblissement d'environ 20 à 30 dB pour deux liaisons caractérisées par une longueur de trajet de 5 km et un espacement angulaire de 38° .

4 Distorsion du canal de propagation

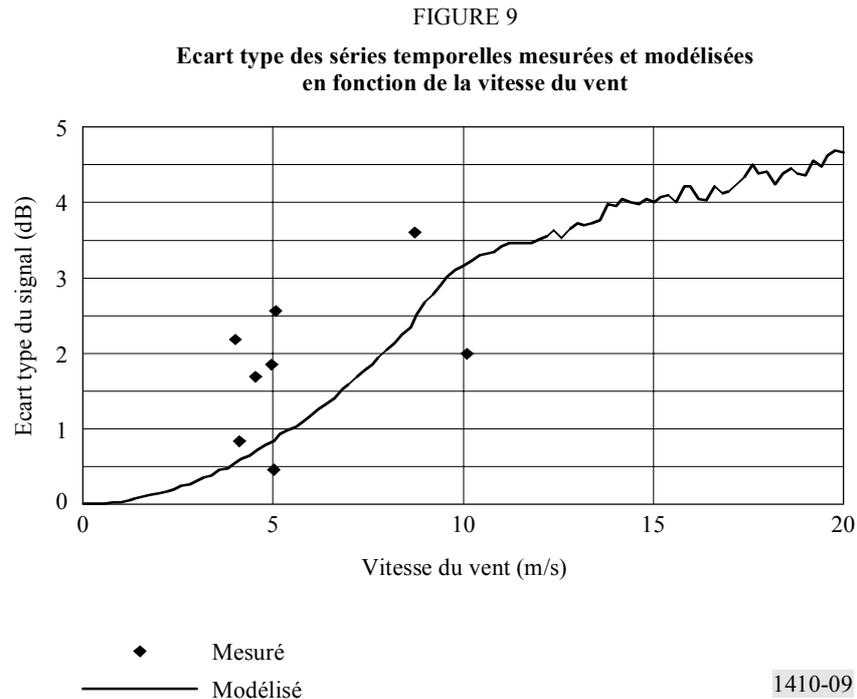
Le présent paragraphe traite des effets instantanés, sur le canal de propagation, de la dynamique de la végétation et de la propagation par trajets multiples (bâtiments et terrain). Les données existantes étant rares, les résultats des mesures disponibles sont donnés à titre indicatif.

4.1 Effets dynamiques de la végétation

L'examen des effets de la végétation montre clairement que l'environnement ne restera pas statique. Sur un site de réception, il peut exister le long du trajet du signal un ou plusieurs arbres qui ne donnent pas un affaiblissement moyen suffisant pour faire en sorte que le niveau du signal reçu soit inférieur à la marge du système. Il a été constaté toutefois que lorsque les arbres bougent, le niveau du signal varie de manière dynamique sur une plage importante, ce qui rend impossible la fourniture d'un service. Plusieurs mesures du niveau du signal traversant les arbres ont été faites en fonction du temps et montrent une diminution moyenne du niveau du signal d'environ 20 dB par arbre. On a observé une variabilité considérable du signal, avec de fréquents évanouissements de transmission pouvant atteindre 50 dB d'affaiblissement sur une durée d'environ 10 ms.

On constate que les zéros que l'on observe brusquement dans les mesures des séries temporelles ne peuvent être produits que par l'interaction de plusieurs éléments diffuseurs dans la végétation. Pour simuler ce mécanisme de propagation, on a calculé le champ cumulé d'un certain nombre de sources de diffusion positionnées de manière aléatoire le long d'une ligne tangentielle au trajet. Pour donner au signal obtenu une variabilité adéquate dans le temps, on a fait varier sinusoidalement la position de chaque diffuseur pour simuler le mouvement des branches des arbres sous l'effet du vent. La fréquence et l'étendue de la variabilité des positions ont augmenté en fonction de la vitesse du vent. Ce modèle concordait suffisamment avec les observations.

La Fig. 9 représente par rapport aux données mesurées les séries temporelles modélisées et les écarts types de l'amplitude du signal avec des vitesses du vent comprises entre 0 et 20 m/s.



Avec une approximation linéaire simple, l'écart type σ est modélisé comme suit:

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (18)$$

v étant la vitesse du vent (m/s).

Il convient de noter que bien que ce type de modèle montre une dépendance en fréquence inhérente, les différences de longueur de trajet à travers les arbres sont faibles et l'évanouissement dans la largeur de bande type de 40 MHz semblera uniforme. Un évanouissement rapide est dû à la variabilité dans le temps du moyen utilisé.

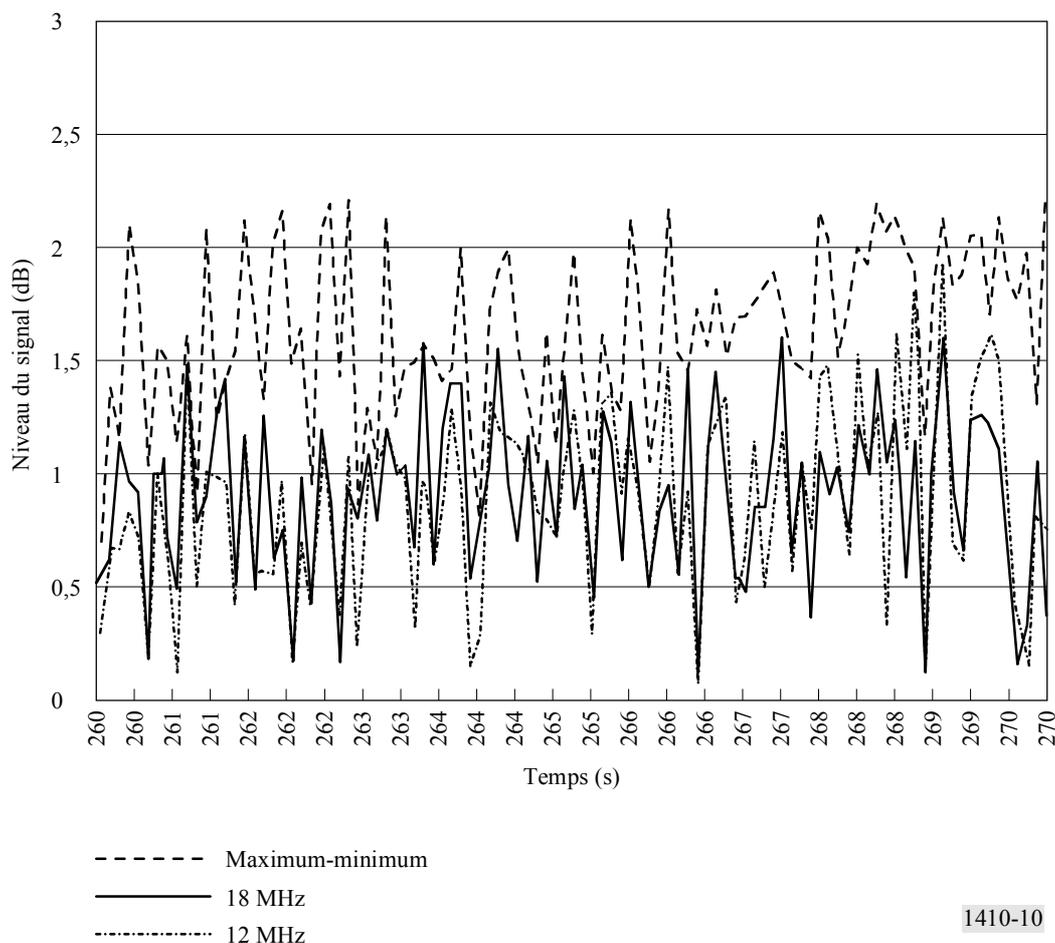
4.2 Affaiblissement sélectif en fréquence dû à la végétation

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 bande 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. 10 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.

FIGURE 10

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



4.3 Propagation par trajets multiples due aux réflexions

4.3.1 Résultats des tracés de rayons

Des simulations de tracés de rayons ont démontré que le problème de la propagation par trajets multiples semble mineur dans les futures conditions de fonctionnement du 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 de tracés de rayons, mais des travaux antérieurs ont 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.

A titre d'exemple, on a effectué des calculs par tracé de rayon 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.

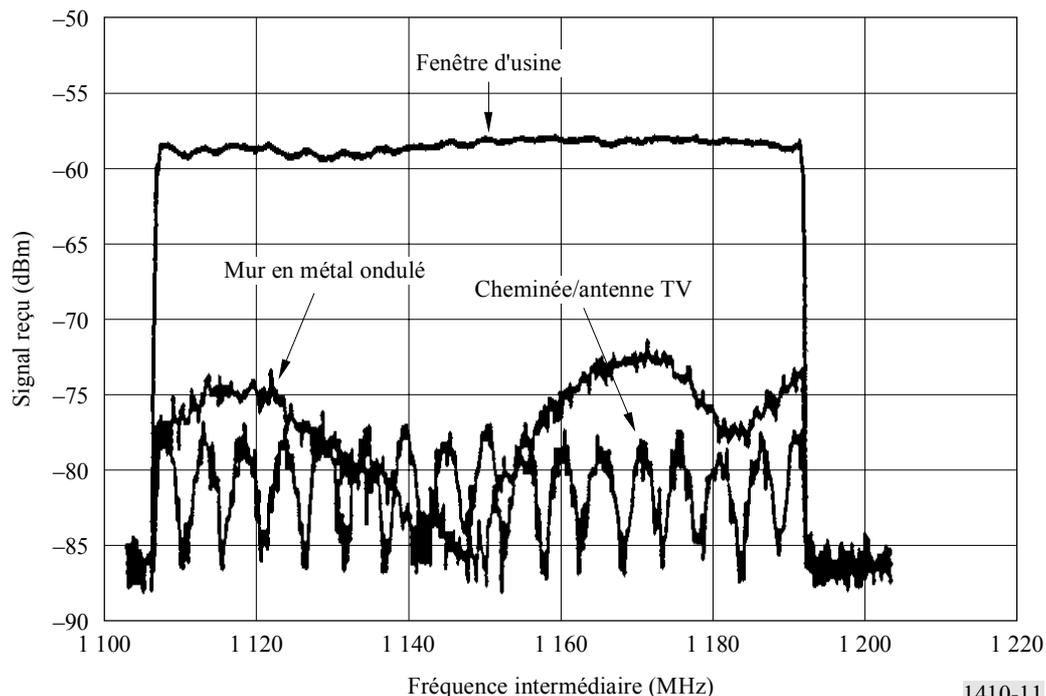
4.3.2 Résultats des mesures

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. 11 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 11

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.

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 régulier 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.
