

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.681-7
(10/2009)

**Données de propagation nécessaires pour la
conception de systèmes de
télécommunication mobiles terrestres
Terre-espace**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2010

© UIT 2010

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

RECOMMANDATION UIT-R P.681-7*

Données de propagation nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication mobiles terrestres Terre-espace

(Question UIT-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2009)

Champ d'application

La présente Recommandation porte sur la prévision des divers paramètres de propagation nécessaires pour la planification des systèmes du service mobile terrestre par satellite (SMTS) Terre-espace.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes de télécommunication mobiles terrestres Terre-espace, il est nécessaire de disposer de données de propagation et de méthodes de prévision appropriées;
- b) que les méthodes de la Recommandation UIT-R P.618 sont recommandées pour la planification des systèmes de télécommunication Terre-espace;
- c) que de nouveaux développements des méthodes de prévision pour des applications spécifiques aux systèmes mobiles terrestres par satellite sont nécessaires pour donner une précision adéquate dans toutes les régions du monde et dans toutes les conditions d'exploitation;
- d) qu'il existe toutefois des méthodes donnant une précision suffisante pour de nombreuses applications,

recommande

1 d'adopter les méthodes figurant à l'Annexe 1 pour la planification de systèmes de télécommunication mobiles terrestres Terre-espace, en plus des méthodes préconisées dans la Recommandation UIT-R P.618.

Annexe 1**1 Introduction**

Les effets de propagation affectant le service mobile terrestre par satellite (SMTS) diffèrent principalement de ceux qui affectent le service fixe par satellite (SFS) par la plus grande influence des effets du terrain. Dans le SFS, il est généralement possible de se protéger des effets d'écran, d'occultation et de trajets multiples en utilisant une antenne à forte directivité placée en des sites

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 8 des radiocommunications.

dégagés. Par conséquent, le SMTS offre de plus faibles pourcentages de disponibilité que le SFS. La gamme de disponibilité intéressant principalement les concepteurs de systèmes est généralement comprise entre 80% et 99%.

La présente Annexe concerne les données et modèles dont on a plus particulièrement besoin pour prévoir les dégradations dues à la propagation affectant les liaisons du SMTS, qui comprennent les effets troposphériques, les effets ionosphériques, les trajets multiples, les effets d'occultation et d'écran. Elle s'appuie sur des mesures allant de 870 MHz dans la bande d'ondes décimétriques jusqu'à 20 GHz.

2 Effets troposphériques

2.1 Affaiblissement

Les affaiblissements des signaux dans la troposphère sont provoqués par les gaz atmosphériques, la pluie, le brouillard et les nuages. Excepté pour les faibles angles d'élévation, l'affaiblissement troposphérique est négligeable aux fréquences inférieures à environ 1 GHz et est généralement faible jusqu'à des fréquences d'environ 10 GHz. Au-delà de 10 GHz, l'affaiblissement peut être important pendant des pourcentages de temps significatifs sur de nombreux trajets. On dispose de méthodes de prévision pour estimer l'absorption gazeuse (Recommandation UIT-R P.676) et l'affaiblissement dû à la pluie (Recommandation UIT-R P.618). L'affaiblissement dû au brouillard et aux nuages est généralement négligeable jusqu'à des fréquences de 10 GHz.

2.2 Scintillations

Des variations irrégulières du niveau du signal reçu et de l'angle d'arrivée sont provoquées tant par la turbulence troposphérique que par les trajets multiples atmosphériques. Ces effets sont d'autant plus importants que la fréquence augmente et que l'angle d'élévation diminue, à l'exception du fait que les fluctuations d'angle d'arrivée provoquées par la turbulence sont indépendantes de la fréquence. L'ouverture du faisceau de l'antenne affecte également l'importance de ces scintillations. On a pu observer que ces effets atteignaient un maximum en été. Une méthode de prévision est donnée dans la Recommandation UIT-R P.618.

3 Effets ionosphériques

Les effets ionosphériques affectant les trajets Terre-espace sont traités dans la Recommandation UIT-R P.531. Les valeurs des effets ionosphériques pour des fréquences dans une bande de 0,1 à 10 GHz sont données dans les Tableaux 1 et 2 de la Recommandation UIT-R P.680.

4 Effets d'écran

4.1 Modèle d'effet d'écran dû aux arbres plantés sur les accotements

On a utilisé des mesures de distributions cumulatives des évanouissements à 870 MHz, 1,6 GHz et 20 GHz pour mettre au point le modèle empirique étendu d'effet d'écran des accotements. On représente l'importance des arbres plantés sur les accotements par le pourcentage d'effet d'écran optique dû à ces arbres pour un angle d'élévation du trajet de 45° dans la direction de la source du signal. Le modèle est valable lorsque ce pourcentage est compris entre 55% et 75%.

4.1.1 Calcul des évanouissements dus à l'effet d'écran des arbres plantés sur les accotements

La procédure ci-après permet d'évaluer l'effet d'écran des accotements aux fréquences comprises entre 800 MHz et 20 GHz, pour des angles d'élévation du trajet compris entre 7° et 60° et pour des pourcentages de distance parcourue compris entre 1% et 80%. Le modèle empirique correspond à des conditions de propagation moyennes dans lesquelles les véhicules circulent sur les voies de droite et de gauche des grandes routes (les files proches et les files éloignées des arbres plantés sur les accotements sont incluses). Les prévisions de distributions des évanouissements s'appliquent aux autoroutes et aux routes de campagne pour lesquelles le trajet de propagation est la plupart du temps perpendiculaire aux rangées d'arbres plantés sur les accotements et aux poteaux électriques. On suppose que la principale cause d'affaiblissement des signaux du SMTS est l'effet d'écran du feuillage (voir la Recommandation UIT-R P.833).

Les paramètres nécessaires sont les suivants:

f : fréquence (GHz)

θ : angle d'élévation du trajet en direction du satellite (degrés)

p : pourcentage de distance parcourue sur laquelle le seuil d'évanouissement est dépassé.

Etape 1: Calculer comme suit la distribution des évanouissements à 1,5 GHz, valable pour des pourcentages de distance parcourue tels que $20\% \geq p \geq 1\%$ et pour des angles d'élévation du trajet tels que $60^\circ \geq \theta \geq 20^\circ$:

$$A_L(p, \theta) = -M(\theta) \ln(p) + N(\theta) \quad (1)$$

où:

$$M(\theta) = 3,44 + 0,0975 \theta - 0,002 \theta^2 \quad (2)$$

$$N(\theta) = -0,443 \theta + 34,76 \quad (3)$$

Etape 2: Compte tenu de la distribution obtenue à l'Etape 1, valable pour $20\% \geq p \geq 1\%$, calculer comme suit la distribution des évanouissements pour les fréquences f (GHz) telles que $0,8 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$:

$$A_{20}(p, \theta, f) = A_L(p, \theta) \exp \left\{ 1,5 \left[\frac{1}{\sqrt{f_{1,5}}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right] \right\} \quad (4)$$

Etape 3: Calculer comme suit la distribution des évanouissements pour les pourcentages de distance parcourue tels que $80\% \geq p > 20\%$ et pour la gamme de fréquences telles que $0,85 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$:

$$\begin{aligned} A(p, \theta, f) &= A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left(\frac{80}{p} \right) && \text{pour } 80\% \geq p > 20\% \\ &= A_{20}(p, \theta, f) && \text{pour } 20\% \geq p > 1\% \end{aligned} \quad (5)$$

Etape 4: Pour chacun des angles d'élévation du trajet compris dans l'intervalle $20^\circ > \theta \geq 7^\circ$, la distribution des évanouissements est supposée être la même que pour $\theta = 20^\circ$.

La Fig. 1 montre l'évanouissement dépassé à 1,5 GHz en fonction de l'angle d'élévation compris entre 10° et 60° , et pour une famille de pourcentages égaux de distance parcourue compris entre 1% et 50%.

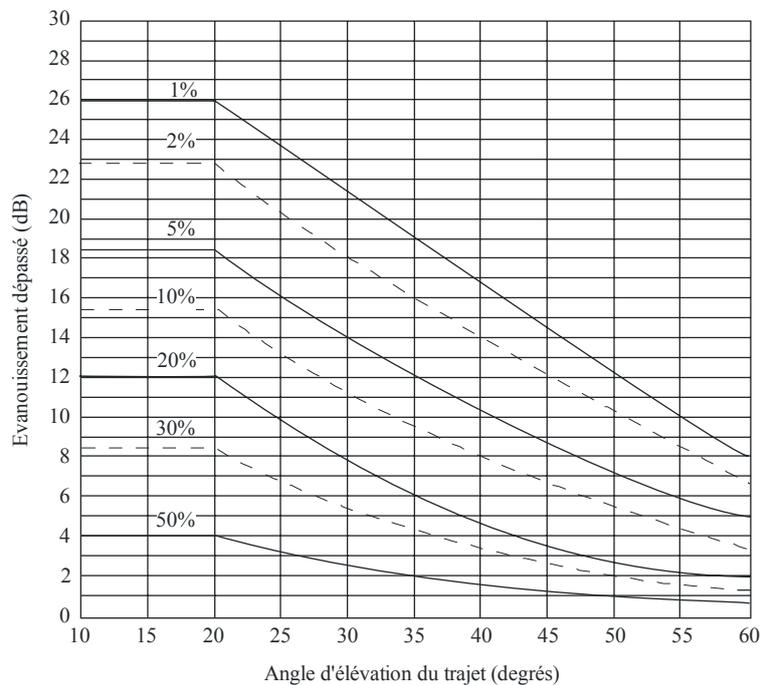
4.1.1.1 Extension à des angles d'élévation supérieurs à 60°

En procédant comme indiqué ci-après, il est possible d'étendre aux angles d'élévation du trajet supérieur à 60° le modèle d'effet d'écran dû aux accotements pour les fréquences 1,6 et 2,6 GHz:

- appliquer pour les fréquences indiquées ci-dessus, les équations (1) à (5) pour un angle d'élévation de 60°;
- effectuer une interpolation linéaire entre la valeur calculée pour 60° et les valeurs d'évanouissement correspondant à un angle d'élévation de 80° (voir le Tableau 1);
- effectuer une interpolation linéaire entre les valeurs du Tableau 1 et une valeur nulle pour 90°.

FIGURE 1

Evanouissements à 1,5 GHz dus à l'effet d'écran des accotements en fonction de l'angle d'élévation du trajet



P.0681-01

TABLEAU 1

Evanouissements dépassés (dB) pour un angle d'élévation de 80°

p (%)	Effet d'écran des arbres	
	1,6 GHz	2,6 GHz
1	4,1	9,0
5	2,0	5,2
10	1,5	3,8
15	1,4	3,2
20	1,3	2,8
30	1,2	2,5

4.1.1.2 Application du modèle d'effet d'écran des accotements à des systèmes mobiles par satellite à satellites non géostationnaires (non OSG)

La méthode de prévision décrite plus haut a été élaborée pour des géométries SMTS dans lesquelles l'angle d'élévation demeure constant, et elle est appliquée à ces géométries. Pour les systèmes non OSG, où l'angle d'élévation est variable, on peut procéder comme suit pour calculer la disponibilité d'une liaison:

- calculer le pourcentage de temps correspondant à chaque angle d'élévation (ou à chaque gamme d'angles d'élévation) sous lequel la station terminale verra l'engin spatial;
- pour une marge de propagation donnée (ordonnées de la Fig. 1), déterminer le pourcentage d'indisponibilité pour chaque angle d'élévation;
- pour chaque angle d'élévation, multiplier le résultat de a) par celui de b), et diviser par 100; cela donne le pourcentage d'indisponibilité du système pour l'angle d'élévation considéré;
- additionner toutes les valeurs d'indisponibilité obtenues en c), pour obtenir l'indisponibilité totale du système.

Si l'antenne de la station terminale mobile n'a pas un diagramme isotrope, le gain d'antenne correspondant à chaque angle d'élévation doit être retranché de la marge de protection contre les évanouissements, au b) ci-dessus.

Dans le cas des constellations de satellites à multivisibilité fonctionnant avec diversité de trajet de satellite (c'est-à-dire avec commutation sur le trajet le moins dégradé), on peut faire un calcul approché, avec l'hypothèse que l'engin spatial utilisé est celui dont l'angle d'élévation est le plus grand.

4.1.2 Modèle de distribution de la durée des évanouissements

Pour optimiser les récepteurs de SMTS, il faut disposer des statistiques sur les durées d'évanouissement qui peuvent être représentées en unités de distance parcourue (m) ou (s). Des mesures de durée d'évanouissement ont conduit au modèle empirique suivant, valable pour des durées d'évanouissement en distance $dd \geq 0,02$ m:

$$P(FD > dd \mid A > A_q) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right) \quad (6)$$

où $P(FD > dd \mid A > A_q)$ représente la probabilité que la durée d'évanouissement en distance FD , dépasse la distance dd (m) si l'affaiblissement A dépasse la valeur A_q . Le terme «erf» représente la fonction d'erreur, σ est l'écart type de $\ln(dd)$ et $\ln(\alpha)$ est la valeur moyenne de $\ln(dd)$. La partie gauche de l'équation (6) a été estimée en calculant le pourcentage «d'événements de durée» dépassant dd par rapport au nombre total d'événements au cours desquels $A > A_q$ dans les données obtenues à partir de mesures effectuées aux Etats-Unis d'Amérique et en Australie. Les valeurs de régression les mieux ajustées sont $\alpha = 0,22$ et $\sigma = 1,215$.

La Fig. 2 contient un tracé de P (exprimé en pourcentage, p) en fonction de dd , pour un seuil de 5 dB.

Le modèle exprimé par l'équation (6) se fonde sur des mesures faites à un angle d'élévation de 51° et s'applique à des effets d'écran allant de modéré à important (pourcentage d'effet d'écran optique 55%-90%). Des essais effectués à 30° et 60° ont montré que l'angle d'élévation a une influence modeste: pour un pourcentage fixe, la durée des évanouissements est d'autant plus grande que l'angle d'élévation est plus petit. Par exemple, la durée de l'évanouissement à 30° est approximativement le double de la durée d'évanouissement à 60° , pour le même pourcentage.

4.1.3 Modèle de distribution des périodes sans évanouissement

Une période sans évanouissement correspondant à une distance dd , est définie comme la distance sur laquelle les niveaux des évanouissements sont inférieurs au seuil d'évanouissement spécifié. Le modèle de périodes sans évanouissement, est donné par l'expression suivante:

$$p(NFD > dd \mid A < A_q) = \beta (dd)^{-\gamma} \quad (7)$$

où $p(NFD > dd \mid A < A_q)$ est la probabilité en pourcentage que la distance correspondant à une période continue sans évanouissement NFD , dépasse la distance dd , l'évanouissement étant inférieur au seuil A_q . Le Tableau 2 contient les valeurs de β et γ pour les routes sur lesquelles l'effet d'écran est modéré ou très important, c'est-à-dire les pourcentages d'effet d'écran optique de 55%-75% et 75%-90%, respectivement. On utilise un seuil d'évanouissement de 5 dB pour A_q .

FIGURE 2
Distribution cumulative des évanouissements la mieux ajustée pour un effet d'écran
dû aux arbres placés le long des routes avec un seuil de 5 dB

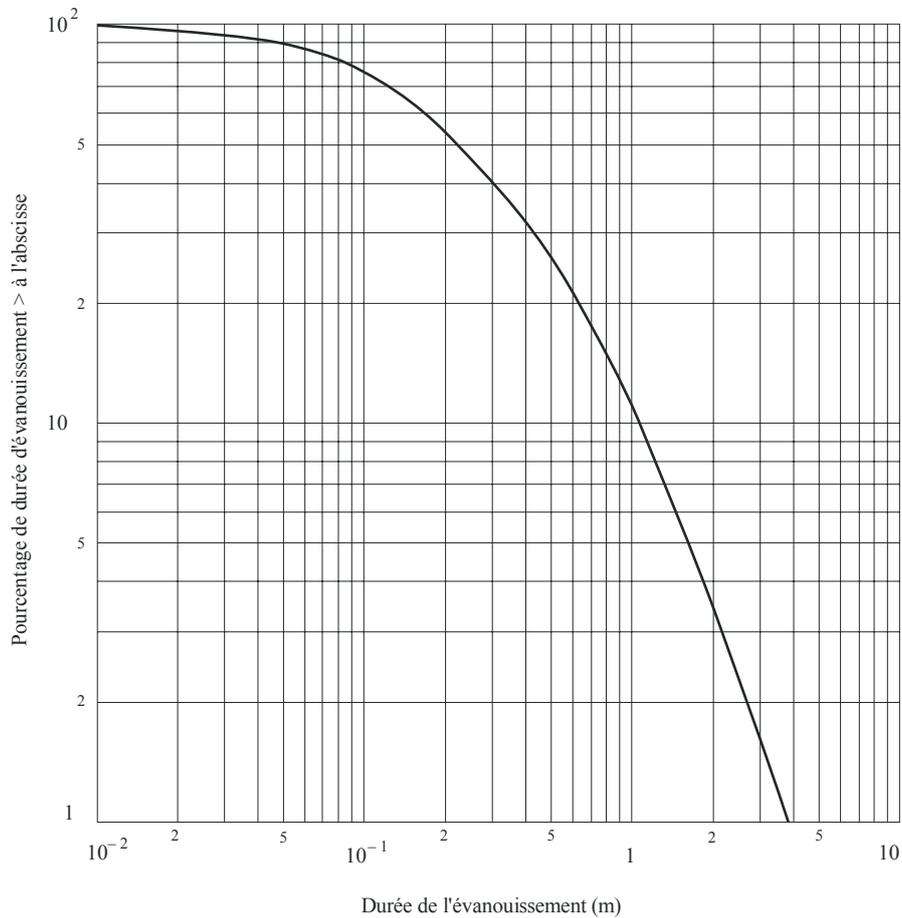


TABLEAU 2

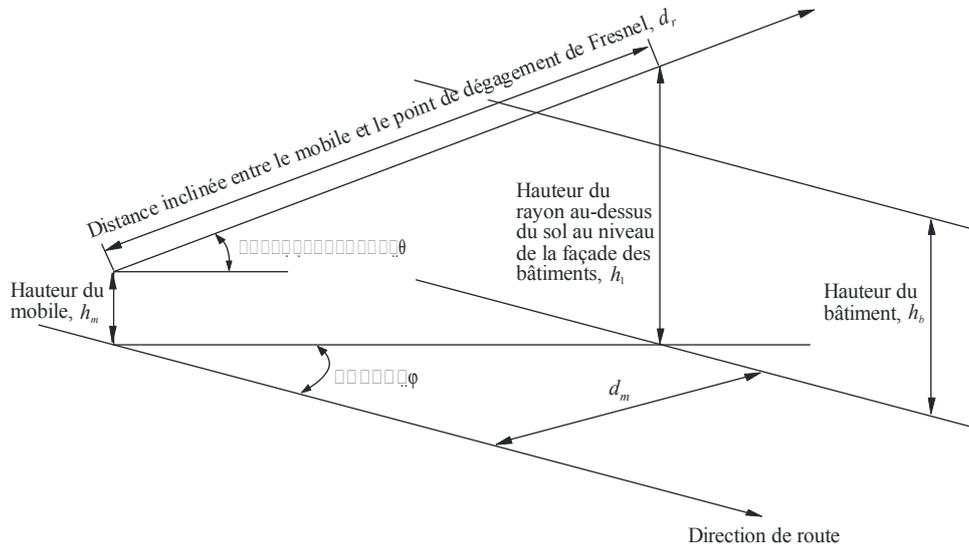
Valeurs de régression des périodes sans évanouissement pour un seuil d'évanouissement de 5 dB et un angle d'élévation de 51°

Niveau d'effet d'écran	β	γ
Modéré	20,54	0,58
Extrême	11,71	0,8371

4.2 Modèle d'effet d'écran dû aux bâtiments construits en bordure des routes

Il est possible de modéliser l'effet d'écran dû aux bâtiments construits en bordure des routes dans une zone urbaine en prenant pour hypothèse une distribution de Rayleigh des hauteurs des bâtiments. La Fig. 3 illustre cette configuration.

FIGURE 3
Géométrie du modèle d'effet d'écran dû aux bâtiments construits en bordure des routes



La probabilité en pourcentage d'occultation due aux bâtiments est donnée par la formule suivante:

$$p = 100 \exp \left[- (h_1 - h_2)^2 / 2h_b^2 \right] \quad \text{pour } h_1 > h_2 \quad (8)$$

où:

h_1 : hauteur du rayon au-dessus du sol au niveau de la façade des bâtiments, donnée par:

$$h_1 = h_m + (d_m \operatorname{tg} \theta / \sin \varphi) \quad (8a)$$

h_2 : distance de dégagement de Fresnel nécessaire au-dessus des bâtiments, donnée par:

$$h_2 = C_f (\lambda d_r)^{0,5} \quad (8b)$$

h_b : hauteur de bâtiment la plus courante (hauteur modale)

h_m : hauteur du mobile au-dessus du sol

- θ : angle d'élévation du rayon en direction du satellite au-dessus du plan horizontal
 φ : angle d'azimut du rayon par rapport à la direction de la rue
 d_m : distance du mobile par rapport à la façade des bâtiments
 d_r : distance inclinée entre le mobile et la position le long du rayon verticalement au-dessus de la façade des bâtiments donnée par:

$$d_r = d_m / (\sin \varphi \cdot \cos \theta) \quad (8c)$$

C_f : dégagement nécessaire exprimé sous forme d'une fraction de la première zone de Fresnel

λ : longueur d'onde

et les valeurs $h_1, h_2, h_{ub}, h_m, d_m, d_r$ et λ sont toutes exprimées dans la même unité et $h_1 > h_2$.

On notera que les équations (8a), (8b) et (8c) sont valables pour $0 < \theta < 90^\circ$ et pour $0 < \varphi < 180^\circ$. Les valeurs limitatives proprement dites ne devraient pas être utilisées.

La Fig. 4 donne des exemples d'effet d'écran dû aux bâtiments construits en bordure des routes, lequel est calculé à l'aide des équations ci-dessus pour:

$$h_b = 15 \text{ m}$$

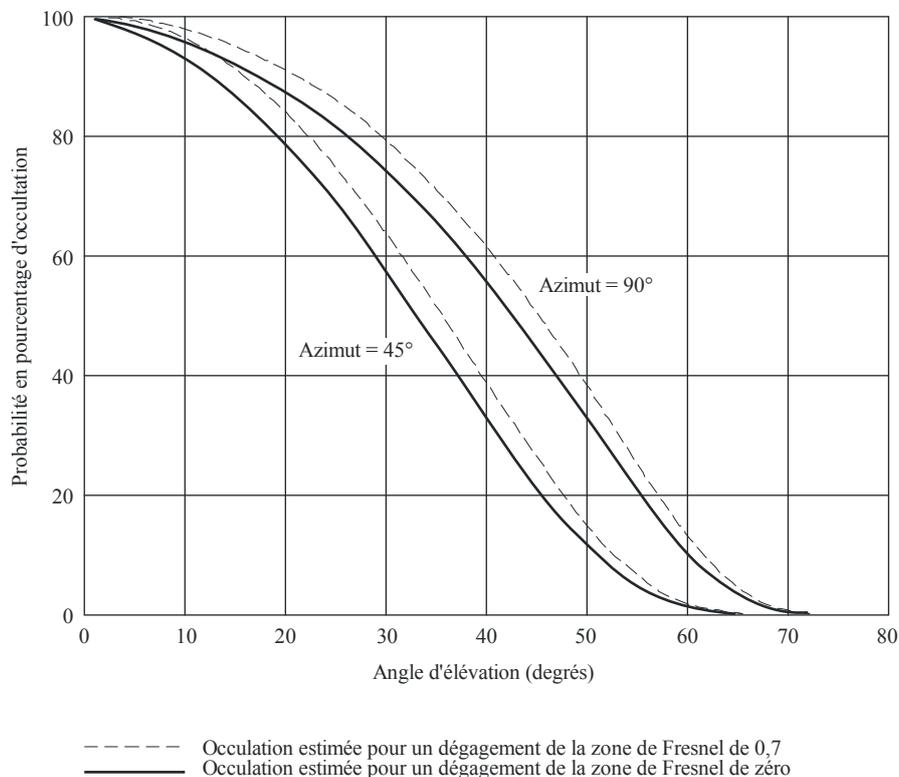
$$h_m = 1,5 \text{ m}$$

$$d_m = 17,5 \text{ m}$$

$$\text{Fréquence} = 1,6 \text{ GHz.}$$

FIGURE 4

Exemples d'effet d'écran dû aux bâtiments construits en bordure des routes
 (voir le texte pour les valeurs des paramètres)



Dans la Fig. 4, les courbes en pointillés correspondent au cas où on estime qu'il y a occultation si le dégagement du rayon est inférieur à 0,7 de la première zone de Fresnel verticalement au-dessus de la façade du bâtiment. Les courbes en traits pleins correspondent au cas où on considère qu'il y a occultation uniquement s'il n'y a pas de visibilité directe.

Le modèle fait apparaître qu'il n'y a pas d'occultation pour les angles d'élévation les plus élevés du trajet mais les utilisateurs doivent être conscients du fait qu'il peut y avoir occasionnellement effet d'écran ou occultation en raison de la présence d'échangeurs, de structures suspendues ou de bretelles d'accès, etc.

4.3 Cas particulier des équipements terminaux tenus à la main (occultation par l'utilisateur)

En cas d'utilisation d'équipements terminaux de télécommunication tenus à la main, la tête ou le corps de l'opérateur se trouve dans le champ proche de l'antenne et modifie le diagramme de rayonnement de celle-ci. Si les satellites du système ne sont pas sur orbites terrestres basses (LEO, *low Earth orbit*) (systèmes GSO, à satellites sur orbite terrestre haute (HEO), ICO), on attend de l'utilisateur d'un tel équipement qu'il soit coopératif, c'est-à-dire qu'il se place dans une position telle qu'il n'y ait pas d'occultation par sa tête (ou son corps), ni par le milieu ambiant. Il n'est pas possible de faire cette hypothèse dans le cas des systèmes LEO. On peut évaluer l'influence de la tête (ou du corps) en introduisant le diagramme d'antenne modifié (qu'il faudra mesurer) dans le calcul de la disponibilité de la liaison (voir le § 4.1.1.2). En admettant par hypothèse une distribution uniforme des angles d'azimut sous lesquels est vu le satellite, on peut appliquer un diagramme d'élévation avec azimut moyen. Il est possible aussi de faire une moyenne des petits mouvements de la tête ou de la main qui provoquent de petites variations de l'angle d'élévation apparent.

Cet effet a été l'objet d'une expérience en vraie grandeur au Japon. La Fig. 5a montre la géométrie de la tête d'un opérateur et de l'antenne dans cette expérience. L'angle d'élévation du satellite est de 32° et la fréquence du signal du satellite est de 1,5 GHz. L'antenne, longue de 10 cm, a un gain de 1 dBi. La Fig. 5b montre comment le niveau relatif du signal varie en fonction de l'angle d'azimut φ de la Fig. 5a. On voit, dans la Fig. 5b, que la diminution maximale du niveau du signal sous l'effet de l'occultation provoquée par l'utilisateur est d'environ 6 dB lorsque l'équipement se trouve dans la zone d'ombre de la tête.

Les résultats donnés dans la Fig. 5b ont valeur d'illustration seulement. En effet, ils correspondent à un seul angle d'élévation et à un seul diagramme d'antenne. Par ailleurs, il n'est pas tenu compte d'effets éventuels de la réflexion spéculaire, qui pourrait avoir une influence importante dans le cas d'un équipement tenu à la main, présentant une faible directivité.

On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.679 les données de propagation relatives à l'affaiblissement du signal dû à la pénétration à l'intérieur des bâtiments ou de véhicules, données qui présentent un intérêt tout particulier pour les portables.

4.4 Modélisation des effets d'occultation par les bâtiments au moyen de fonctions de masquage des rues

La quantification des effets d'occultation par les bâtiments est également possible en faisant appel à des fonctions de masquage (MKF, *masking functions*) des rues indiquant les azimuts et les angles d'élévation pour lesquels une liaison peut ou non être établie. Des fonctions de ce type ont souvent été obtenues à l'aide d'études photogrammétriques ou de techniques de tracé de rayon. Le concept de fonction de masquage est applicable à des scénarios simplifiés, de manière à pouvoir définir un nombre restreint de fonctions de ce type et, par la suite, établir rapidement des évaluations approchées de la disponibilité combinée dans différentes configurations à satellites multiples.

Une zone urbaine donnée peut être décrite, en première approximation, par un angle de masquage (MKA, *masking angle*) moyen (degrés).

On définit le MKA comme étant égal à l'élévation du satellite pour une incidence rasante aux sommets des bâtiments lorsque la liaison est perpendiculaire à la rue, ce qui mathématiquement s'exprime comme suit:

$$MKA = \arctg\left(\frac{h}{w/2}\right) \quad \text{degrés} \quad (9)$$

où:

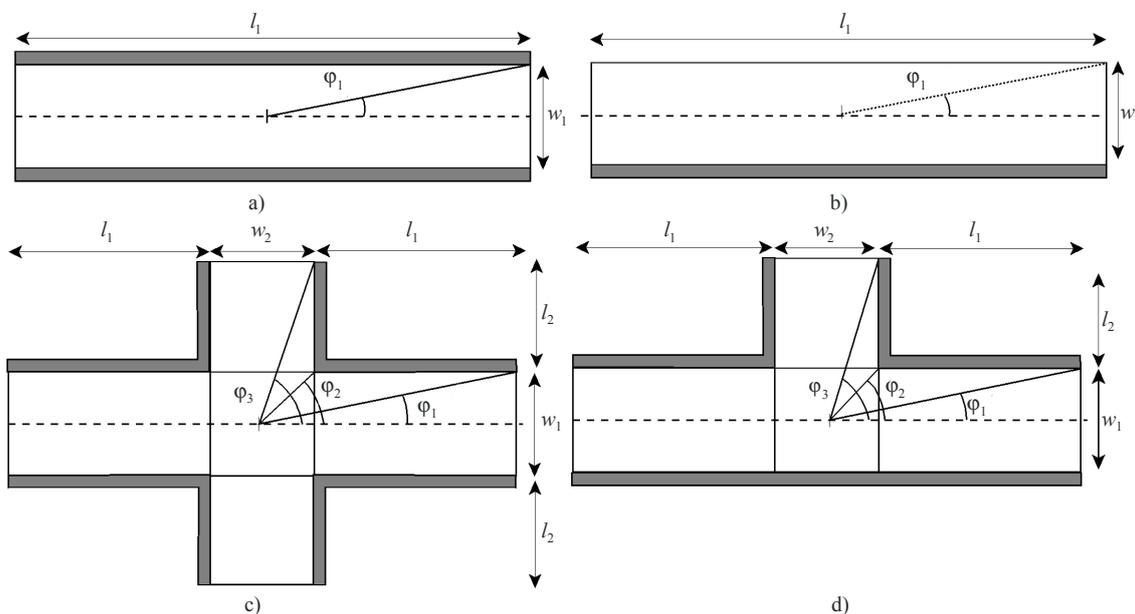
h : hauteur moyenne des bâtiments

w : largeur moyenne des rues.

De plus, un scénario urbain caractérisé par un MKA donné peut être supposé constitué d'un petit nombre de configurations types (scénarios dits de base ou constitutifs), à savoir canyons urbains (scy), carrefours (scr), jonctions droite ou gauche (T-j), simples parois (sw), chacune dotée d'une probabilité d'occurrence propre (voir la Fig. 5). De manière analogue, il est possible de définir un

vecteur de trajet mixte, \vec{M} , indiquant pour une zone construite donnée, les probabilités d'occurrence de chacun des scénarios constitutifs $\vec{M}(w_{scy}, w_{scr}, w_{T-j}, w_{sw})$, avec $\sum w_i = 1$. L'observation de l'environnement urbain ou l'étude des cartes municipales permet d'obtenir les données d'entrées nécessaires à ce modèle.

FIGURE 5
Scénarios de base/constitutifs de description d'une zone urbaine donnée



P.0681-05

Si des probabilités de disponibilité sont calculées pour ces quatre scénarios constitutifs, alors la disponibilité globale peut être assimilée en première approximation à la somme pondérée des disponibilités de chaque scénario:

$$a_T = w_{scy} a_{scy} + w_{scr} a_{scr} + w_{T-j} a_{T-j} + w_{sw} a_{sw} \quad (10)$$

Les MKF relatives à ces quatre scénarios de base ont été déterminées à l'aide de simples considérations géométriques en supposant que l'utilisateur se trouve au milieu de la scène (voir la Fig. 5). Si l'on considère un modèle de propagation simple, de type tout ou rien, ou encore en visibilité directe ou non (comme dans le § 4.2 avec une distance de dégagement de Fresnel nulle), les MKF correspondant aux quatre scénarios urbains constitutifs sont présentées à la Fig. 6, avec en ordonnée les angles d'élévation, et en abscisse, les azimuts ou plutôt les orientations ξ des rues, par rapport à la liaison. Le demi-plan supérieur représente les azimuts positifs, et le demi-plan inférieur les azimuts négatifs. Une fonction MKF indique les régions de l'hémisphère céleste dans lesquelles une liaison peut (zone non grisée) ou ne peut pas (zone grisée) être établie. Les contours délimitant les zones «interdites» des fonctions de masquage sont définis par des points et des segments. Les plus significatifs sont représentés à la Fig. 6 et correspondent aux formules suivantes:

$$S_A: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi} + 1\right)} \right) \quad (11a)$$

$$P_A: \left(\varphi_A = 90^\circ; \theta_A = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h}{w/2} \right) \right) \quad (11b)$$

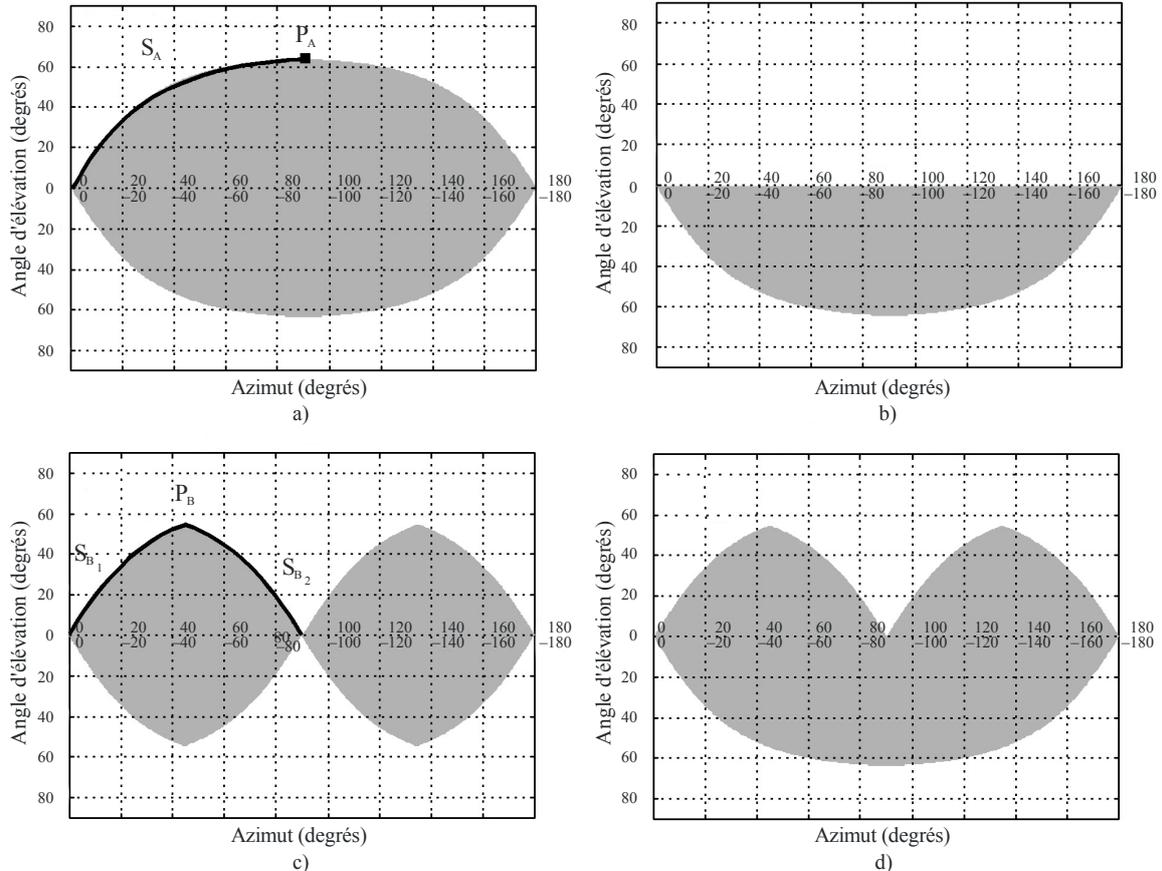
$$S_{B_1}: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi} + 1\right)} \right) \quad (11c)$$

$$S_{B_2}: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 (90^\circ - \varphi)} + 1\right)} \right) \quad (11d)$$

$$P_B: \left(\varphi_B = \text{tg}^{-1} \left(\frac{w_1}{w_2} \right); \theta_2 = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi_B} + 1\right)} \right) \right) \quad (11e)$$

FIGURE 6

MKF a) d'un canyon urbain, b) d'une paroi simple, c) d'un carrefour et d) d'une jonction



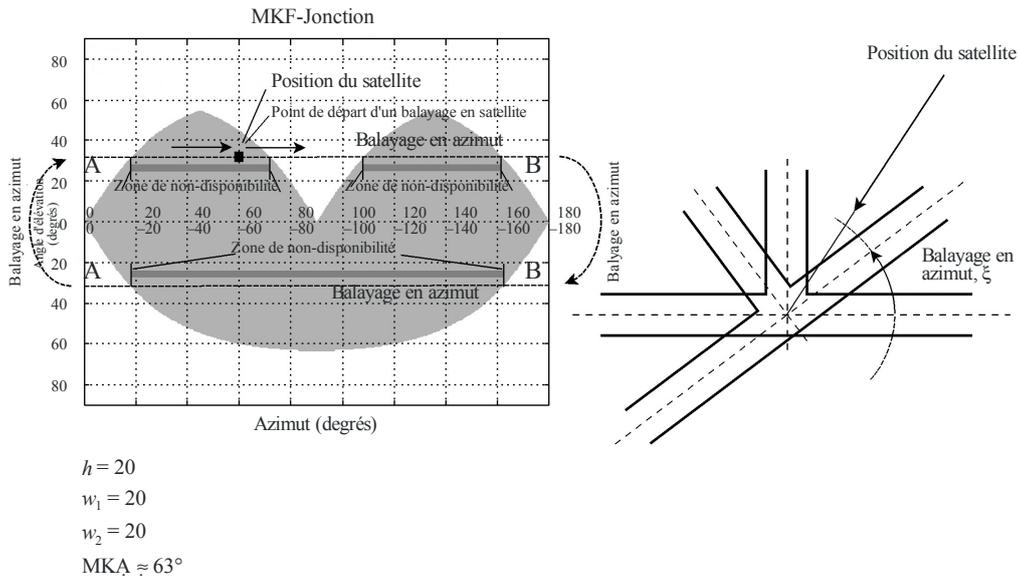
$h = 20$
 $w_1 = 20$
 $w_2 = 20$
 $MKA \approx 63^\circ$

P0681-06

La disponibilité correspondant à un scénario de base particulier et à un satellite géostationnaire (OSG) donné peut être calculée en tenant compte de toutes les orientations de rue possibles ξ , par rapport à la liaison utilisateur-satellite. La Fig. 7 indique la position d'un satellite OSG par rapport à une jonction; dans le cas en question, toutes les orientations possibles sont obtenues en effectuant un balayage de tous les points du segment A-B qui correspondent à un angle d'élévation constant et à toutes les orientations de rue. La disponibilité est égale à la fraction du segment de droite A-B située dans la partie non grisée du diagramme MKF. De manière analogue, il est possible de représenter un tracé correspondant à une orbite non OSG sur un diagramme MKF. La disponibilité globale peut être calculée dans ce cas en considérant toutes les orientations de rue possibles par rapport à toutes les directions envisageables de la liaison utilisateur-satellite.

FIGURE 7

Calcul de disponibilité relatif à une jonction et à un satellite OSG



P.0681-07

5 Modèles de trajets multiples en visibilité directe en environnement dégagé

Dans de nombreux cas, le terminal mobile est en visibilité directe en environnement dégagé (effet d'écran négligeable) par rapport au satellite mobile. Même dans ces circonstances, une dégradation du signal peut se produire du fait des trajets multiples provoqués par le terrain. Le terminal mobile reçoit la somme vectorielle du signal en visibilité directe et de plusieurs signaux empruntant des trajets multiples. Ces signaux empruntant des trajets multiples peuvent s'ajouter de façon constructive ou destructive et conduire à un renforcement ou à un affaiblissement du signal. Les caractéristiques des signaux sur les trajets multiples dépendent de la section efficace de diffusion des surfaces réfléchissantes intervenant dans la propagation par trajets multiples, de leur nombre, des distances par rapport à l'antenne de réception, des polarisations du champ et du diagramme de rayonnement de l'antenne de réception.

Les modèles de dégradation par trajets multiples introduits dans les paragraphes suivants se fondent sur des mesures effectuées au moyen d'une antenne présentant les caractéristiques suivantes:

- omnidirectionnelle en azimut;
- variation de gain, inférieure à 3 dB, entre 15° et 75° d'élévation;
- sous l'horizon (angles d'élévation négatifs) le gain d'antenne est réduit d'au moins 10 dB.

FIGURE 8a
Positions respectives de la tête de l'utilisateur et de l'antenne

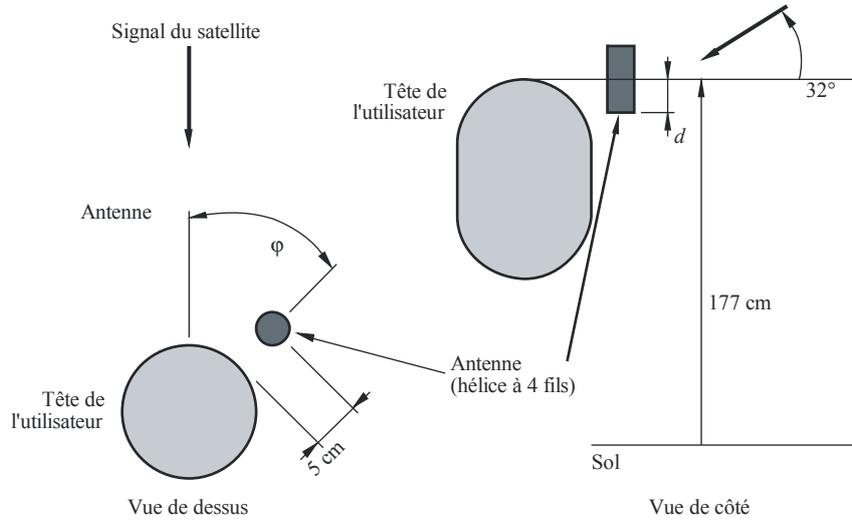
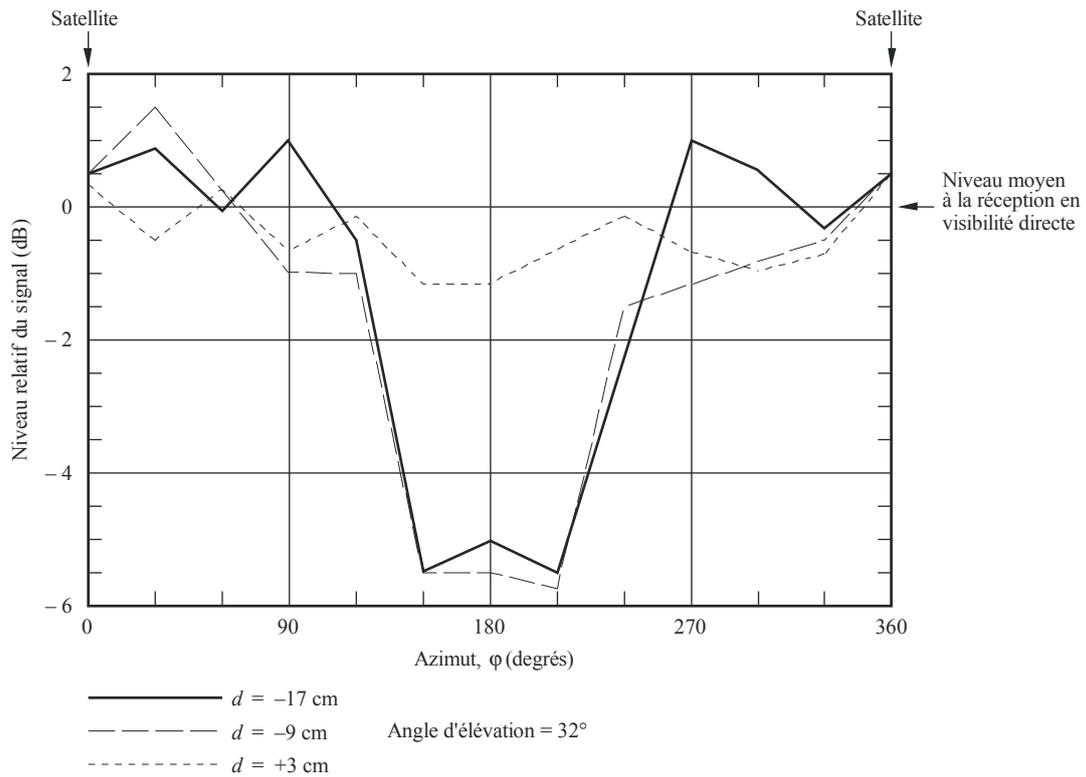


FIGURE 8b
Niveau relatif du signal correspondant à la configuration de la Fig. 8a



P.0681-08

5.1 Trajets multiples dans un environnement montagneux

La distribution des profondeurs d'évanouissement dû aux trajets multiples en terrain montagneux est modélisée par l'expression suivante:

$$p = a A^{-b} \tag{12}$$

pour:

$$1\% < p < 10\%$$

où:

- p : pourcentage de distance sur laquelle le seuil d'évanouissement est dépassé
- A : dépassement du seuil d'évanouissement (dB).

a , b sont les paramètres d'ajustement de la courbe. Ils figurent au Tableau 3 pour 1,5 GHz et 870 MHz. On notera que le modèle ci-dessus est valable lorsque l'effet d'écran est négligeable.

TABLEAU 3
Paramètres d'ajustement optimal de la distribution cumulative des évanouissements par trajets multiples en terrain montagneux

Fréquence (GHz)	Angle d'élévation = 30°			Angle d'élévation = 45°		
	a	b	Intervalle (dB)	a	b	Intervalle (dB)
0,87	34,52	1,855	2-7	31,64	2,464	2-4
1,5	33,19	1,710	2-8	39,95	2,321	2-5

La Fig. 9 contient des courbes donnant les distributions cumulatives des évanouissements pour des angles d'élévation de 30° et 45° à 1,5 GHz et 870 MHz.

5.2 Trajets multiples le long des routes bordées d'arbres

Des expériences effectuées le long de routes bordées d'arbres aux Etats-Unis d'Amérique ont montré que les évanouissements par trajets multiples étaient relativement insensibles à l'angle d'élévation dans la gamme de 30° à 60°. Les données mesurées ont conduit au modèle suivant:

$$p = u \exp(-vA) \tag{13}$$

pour:

$$1\% < p < 50\%$$

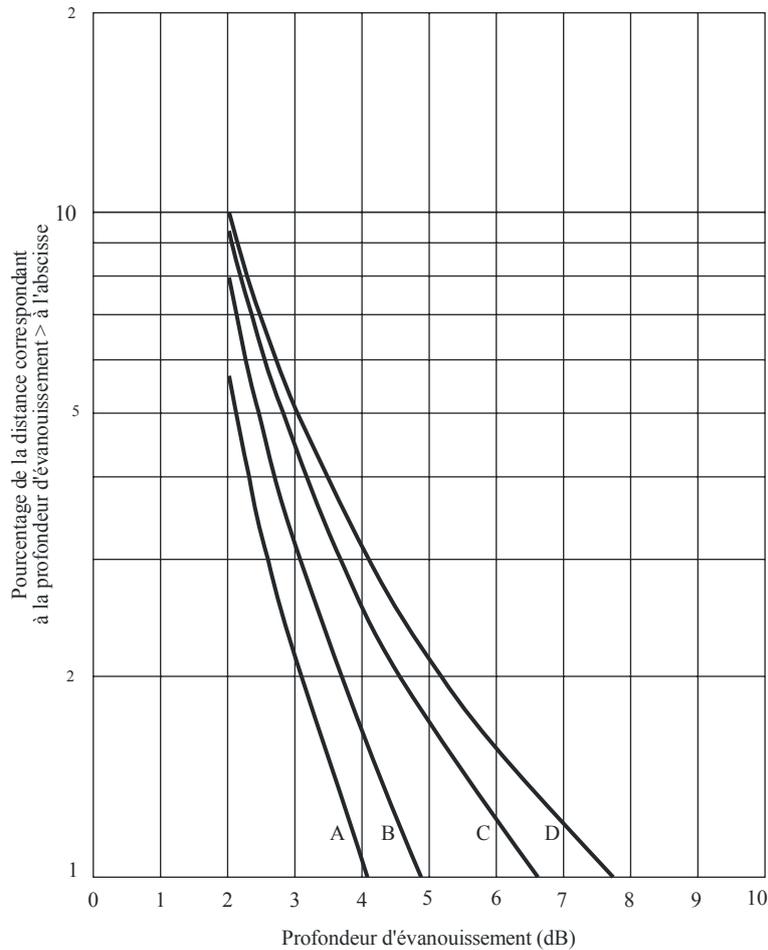
où:

- p : pourcentage de distance sur laquelle le seuil d'évanouissement est dépassé
- A : dépassement du seuil d'évanouissement (dB).

On notera que le modèle ci-dessus suppose un effet d'écran négligeable. Les paramètres d'ajustement de la courbe, u , v , figurent au Tableau 4.

FIGURE 9

Distributions cumulatives des évanouissements les mieux ajustées pour des évanouissements par trajets multiples en terrain montagneux



Courbes A: 870 MHz, 45°
 B: 1,5 GHz, 45°
 C: 870 MHz, 30°
 D: 1,5 GHz, 30°

P.0681-09

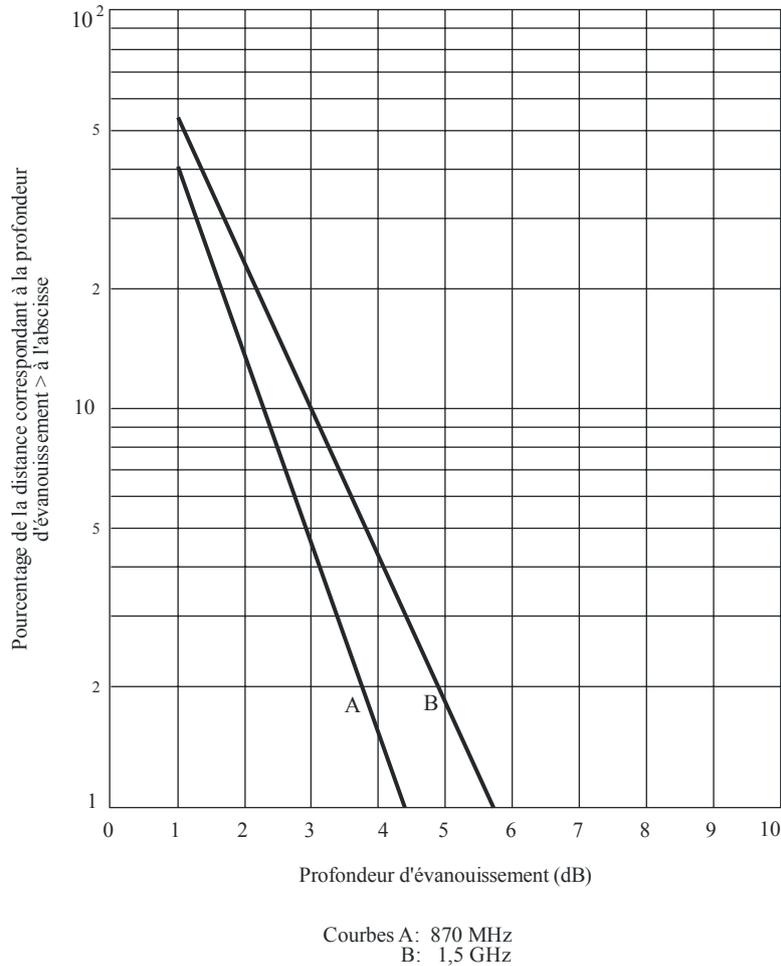
TABLEAU 4

Paramètres d'ajustement optimal des distributions cumulatives exponentielles des évanouissements par trajets multiples le long de routes bordées d'arbres

Fréquence (GHz)	u	v	Gamme d'évanouissements (dB)
0,870	125,6	1,116	1-4,5
1,5	127,7	0,8573	1-6

La Fig. 10 contient les courbes des distributions cumulatives des évanouissements à 1,5 GHz et 870 MHz. Il peut se produire un renforcement de l'évanouissement imputable à la propagation par trajets multiples pour des angles d'élévation inférieurs (5° à 30°) là où un signal de diffusion avant peut être reçu, émanant de terrains légèrement vallonnés situés à de plus grandes distances.

FIGURE 10
Distributions cumulatives des évanouissements les mieux ajustées pour des évanouissements par trajets multiples le long des routes bordées d'arbres



P.0681-10

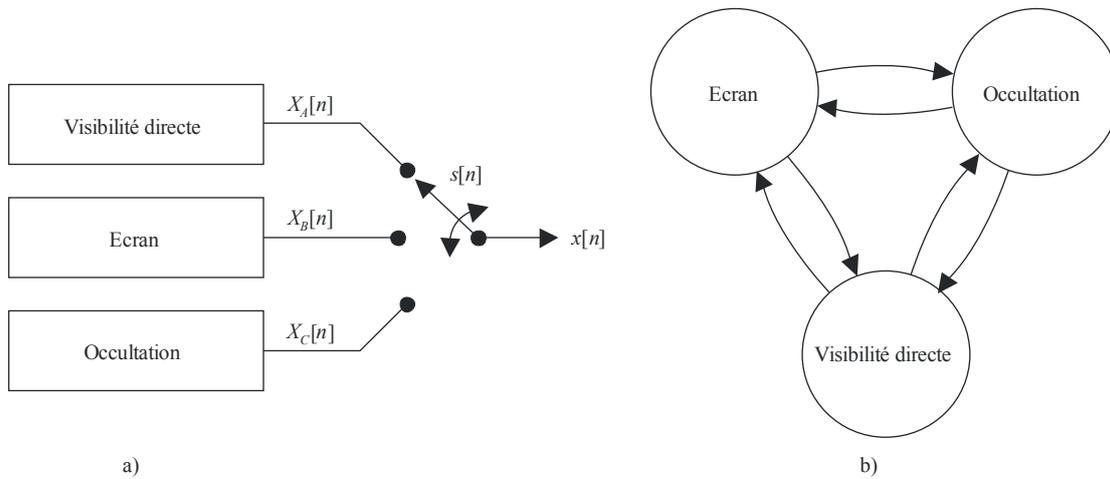
6 Modèle statistique pour des conditions de propagation mixtes

On trouve aux § 4.1 et 5 des modèles pour des conditions spécifiques, à savoir effet d'écran en bordure de routes ou visibilité directe en environnement dégagé, région montagneuse ou routes bordées d'arbres. Dans les environnements de propagation propres au SMTS (zones urbaines ou suburbaines), les conditions de propagation peuvent être mixtes. On peut calculer la fonction de distribution cumulative des niveaux du signal dans des conditions de propagation mixtes en utilisant le modèle suivant à trois états: visibilité directe en environnement dégagé, léger effet d'écran et occultation totale. Le modèle est un modèle statistique valable pour le SMTS à bande étroite pour lequel la réponse en fréquence du canal a la même incidence sur toutes les fréquences comprises dans la largeur de bande du signal (canaux non sélectifs en fréquence).

Il est possible de représenter les variations à long terme du signal reçu par une chaîne d'états distincts. La Fig. 11a) illustre le principe de base des chaînes cachées. La position du commutateur détermine le choix du processus stochastique $x_i[n]$ observé en définitive, chaque processus correspondant à un scénario de propagation spécifique. Quant aux variations à plus court terme à l'intérieur de chaque état, elles peuvent être représentées par une modélisation analogique du canal satellite. La propagation en visibilité directe, l'effet d'écran et l'effet d'occultation sont représentés par trois états. Le processus aléatoire $s[n]$ correspond à une position du commutateur, dont l'état est défini par une chaîne semi-markovienne, la Fig. 11b) illustrant le diagramme des états de transition.

FIGURE 11

Génération de la séquence observée a) et diagramme d'états de transition d'une chaîne de processus semi-markovien b)



P.0681-11

6.1 Evaluation des statistiques d'évanouissement pour une liaison par un seul satellite

La méthode qui suit permet de faire des estimations des statistiques globales d'évanouissement sur une liaison de propagation SMTS pour des fréquences allant jusqu'à 30 GHz et des angles d'élévation compris entre 10° et 90° . Toutefois, les valeurs de paramètre qui sont proposées ici limitent la gamme des fréquences utilisées entre 1,5 et 2,5 GHz dans des zones urbaines et suburbaines. On suppose que le gain de l'antenne de réception est inférieur à 10 dBi environ.

Les différents états de propagation sont définis comme suit:

Etat A: visibilité directe en environnement dégagé

Etat B: léger effet d'écran (dû à des arbres et/ou à de petits obstacles, pylônes par exemple)

Etat C: occultation totale (due à de gros obstacles, montagnes ou bâtiments, par exemple).

On a besoin des paramètres suivants:

P_A, P_B et P_C : probabilité d'occurrence des Etats A, B et C

$M_{r,A}, M_{r,B}$ et $M_{r,C}$: puissance moyenne en propagation par trajets multiples dans les Etats A, B et C

m et σ : valeur moyenne et écart type de l'évanouissement du signal (dB) pour la composante directe dans l'Etat B

θ : angle d'élévation (degrés).

Les valeurs recommandées des paramètres indiqués ci-dessus en fonction de θ (degrés) sont les suivantes:

$$P_A = 1 - a (90 - \theta)^2 \quad \text{pour } 10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (14a)$$

où:

$$a = 1,43 \times 10^{-4} \quad \text{pour une zone urbaine}$$

$$= 6,0 \times 10^{-5} \quad \text{pour une zone suburbaine}$$

$$P_B = b P_C \quad (14b)$$

où:

$$\begin{aligned} b &= 1/4 && \text{pour une zone urbaine} \\ &= 4 && \text{pour une zone suburbaine} \end{aligned}$$

et où:

$$P_C = (1 - P_A) / (1 + b) \quad (14c)$$

et

$$m = -10 \text{ dB} \quad \sigma = 3 \text{ dB}$$

$$M_{r,B} = 0,03162 (= -15 \text{ dB}) \quad M_{r,C} = 0,01 (= -20 \text{ dB})$$

La valeur suggérée pour $M_{r,A}$ dépend du type de zone (voir ci-dessus). Pour des angles d'élévation compris entre 10° et 45° , la valeur peut être obtenue par interpolation ou extrapolation linéaire des valeurs (dB) pour $\theta = 30^\circ$ et $\theta = 45^\circ$.

Pour une zone urbaine:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,158 (= -8 \text{ dB}) && \text{pour } \theta = 30^\circ \\ &= 0,100 (= -10 \text{ dB}) && \text{pour } \theta \geq 45^\circ \end{aligned}$$

et pour une zone suburbaine:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,0631 (= -12 \text{ dB}) && \text{pour } \theta = 30^\circ \\ &= 0,0398 (= -14 \text{ dB}) && \text{pour } \theta \geq 45^\circ \end{aligned}$$

Les différentes étapes de la méthode de calcul sont les suivantes:

Etape 1: Calculer la distribution cumulative du niveau x du signal dans l'Etat A ($x = 1$ pour la composante directe):

$$f_A(x \leq x_0) = \int_0^{x_0} \frac{2x}{M_{r,A}} \exp\left(-\frac{1+x^2}{M_{r,A}}\right) I_0\left(\frac{2x}{M_{r,A}}\right) dx \quad (15)$$

où I_0 est la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro.

NOTE 1 – Cette distribution est une distribution de Nakagami-Rice avec $a = 1$ et $2\sigma^2 = M_{r,A}$ (voir la Recommandation UIT-R P.1057).

Etape 2: Calculer la distribution cumulative du niveau x du signal dans l'Etat B:

$$f_B(x \leq x_0) \frac{6,930}{\sigma M_{r,B}} \int_0^{x_0} x \int_\varepsilon^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{[20 \log(z) - m]^2}{2\sigma^2} - \frac{x^2 + z^2}{M_{r,B}}\right] I_0\left(\frac{2xz}{M_{r,B}}\right) dz dx \quad (16)$$

où ε est une très faible valeur qui n'est pas égale à zéro (on propose $\varepsilon = 0,001$).

NOTE 1 – Cette distribution est appelée distribution de Loo.

Etape 3: Calculer la distribution cumulative du niveau x du signal dans l'Etat C:

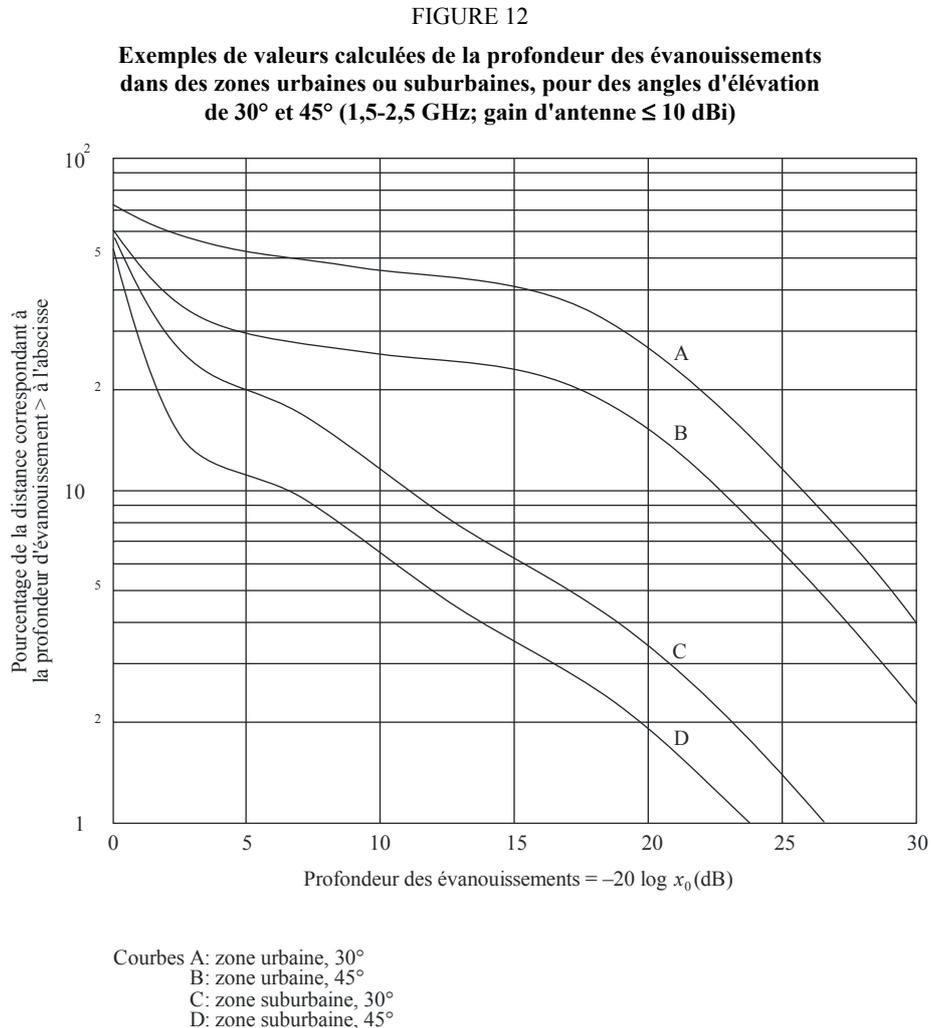
$$f_C(x \leq x_0) = 1 - \exp\left(-\frac{x_0^2}{M_{r,C}}\right) \quad (17)$$

NOTE 1 – Cette distribution est une distribution de Rayleigh avec $2q^2 = M_{r,C}$ (voir la Recommandation UIT-R P.1057).

Etape 4: La fonction de distribution cumulative, lorsque le niveau x du signal est inférieur à un niveau seuil x_0 avec une probabilité P , dans des conditions de propagation mixtes, est donnée par la formule suivante:

$$P(x \leq x_0) = P_A f_A + P_B f_B + P_C f_C \quad (18)$$

La Fig. 12 donne des exemples de valeurs calculées de fonction de distribution cumulative pour les valeurs de paramètre indiquées ci-dessus, les probabilités étant converties en pourcentages de temps.



P.0681-12

6.2 Prédiction de statistiques de durée des états pour une liaison donnée

La simulation et l'estimation des performances des récepteurs SMTS exigent la connaissance du temps passé ou de manière équivalente de la distance parcourue dans chacun des trois états considérés (visibilité directe, écran, occultation). Parallèlement aux probabilités d'états de transition, il est possible d'utiliser les probabilités de durée des états dans le cadre d'un modèle d'état semi-markovien, visant à simuler le canal SMTS pour un seul satellite OSG.

Les distributions du temps passé D (m) dans chacun des états A, B et C ont été établies à partir d'une série de mesures en bordure de route à une fréquence d'environ 1,5 GHz sur une liaison par satellites OSG, au Royaume-Uni pendant la période hivernale. Les mesures ont été réalisées dans la banlieue de Londres, dans deux environnements différents: d'une part dans un cadre suburbain, associant espaces découverts, routes à travers des zones légèrement boisées, et maisons à un étage; d'autre part dans une zone densément boisée. L'angle d'élévation en direction du satellite était de 29° lors d'une première série de mesures en zone suburbaine et en zone boisée (suburbain (I) et boisé), et de 13° lors d'une deuxième série de mesures en milieu suburbain (suburbain (II)). Les mesures ont utilisé une antenne omnidirectionnelle montée sur une camionnette. Des valeurs seuil

de 5 et 10 dB ont été appliquées à la puissance locale moyenne, afin de trier les mesures correspondant à chacun des trois états considérés (voir le Tableau 5).

D'après les comparaisons des durées avec et sans évanouissement indiquées au § 4.1, les durées propres à chaque état sont distribuées comme suit:

Pour la durée de l'état A, la distribution selon une loi exponentielle est la suivante:

$$P_A(D \leq d) = 1 - \beta d^{-\gamma} \quad (19)$$

formule dans laquelle les paramètres β et γ dépendent du degré de masquage optique et $d > \beta^{1/\gamma}$.

La distribution de durée des états B et C suit une loi log-normale, valide pour $d \geq 0,1$ m:

$$P_{B,C}(D \leq d) = (1 + \operatorname{erf}[(\ln(d) - \ln(\alpha)) / \sqrt{2}\sigma]) / 2 \quad (20)$$

avec σ écart type de $\ln(d)$, $\ln(\alpha)$ valeur moyenne de $\ln(d)$ et erf, fonction d'erreur dont la définition est indiquée dans la Recommandation UIT-R P.1057.

Le Tableau 5 indique les valeurs des paramètres calculées selon les distributions de durée des trois états, et avec les probabilités correspondantes de transition d'état.

TABLEAU 5
Valeurs des paramètres relatifs aux distributions de durée
et probabilités de transition d'états

Environnement	Etat A		Etat B		Etat C		Probabilités de transition					
	β	γ	α	σ	α	σ	$P_{A \rightarrow B}$	$P_{A \rightarrow C}$	$P_{B \rightarrow A}$	$P_{B \rightarrow C}$	$P_{C \rightarrow A}$	$P_{C \rightarrow B}$
Suburbain (I)	0,88	0,61	1,73	1,11	2,62	0,98	1	0	0,65	0,35	0	1
Suburbain (II)	0,83	0,66	1,89	0,93	3,28	1,04	1	0	0,65	0,35	0	1
Boisé	0,60	0,84	2,05	1,05	1,55	1,02	1	0	0,42	0,58	0	1

7 Modèle large bande physique-statistique pour des conditions de propagation mixtes

Le § 6 décrit un modèle statistique à bande étroite pour le SMTS dans différents environnements. Pour le SMTS large bande avec un canal de propagation par trajets multiples qui a une incidence différente sur les différentes fréquences comprises dans la largeur de bande du signal (canaux sélectifs en fréquence), un modèle génératif qui met en œuvre un filtre transversal linéaire dont la sortie est la somme des versions retardée, affaiblie et décalée en phase du signal d'entrée (modèle large bande) est plus approprié. On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.1407 la définition de termes relatifs à la propagation par trajets multiples.

Le modèle est donné pour une situation dans laquelle un satellite émet depuis une position connue vers un récepteur au sol, l'élévation ε et l'azimut φ pouvant être calculés par rapport au cap et à la position du récepteur. Applicable pour des fréquences comprises entre 1 et 2 GHz, le modèle est valable pour des systèmes large bande avec une largeur de bande allant jusqu'à 100 MHz. Fondé sur des paramètres déterministes et stochastiques, il est capable de générer des vecteurs incluant des séries temporelles d'enveloppe complexe du signal direct et des réflexions, avec les vecteurs correspondants de temps de propagation. Les paramètres déterminant le comportement stochastique

du modèle sont obtenus à partir de mesures réalisées pour un scénario donné. La géométrie du modèle est fondée sur la représentation d'un environnement synthétique.

Le modèle de canal est constitué d'une combinaison des parties suivantes (élaborées pour prendre en charge la simulation du comportement de propagation réaliste pour de nombreux scénarios de propagation, puis validées par des analyses empiriques fondées sur des données de mesure):

- occultation du signal direct:
 - module relatif aux façades de maison
 - module relatif aux arbres
 - module relatif aux lampadaires
- module relatif aux réflexions.

La structure du modèle, illustrée sur la Fig. 13, comprend les signaux d'entrée, intermédiaires et de sortie variables dans le temps suivants:

$v_u(t)$: vitesse de l'utilisateur

$hd_u(t)$: cap de l'utilisateur

$el_s(t)$: élévation du satellite

$az_s(t)$: azimut du satellite

$x_u(t)$: position de l'utilisateur sur l'axe des x (on considère que la position est constante sur les axes des y et des z)

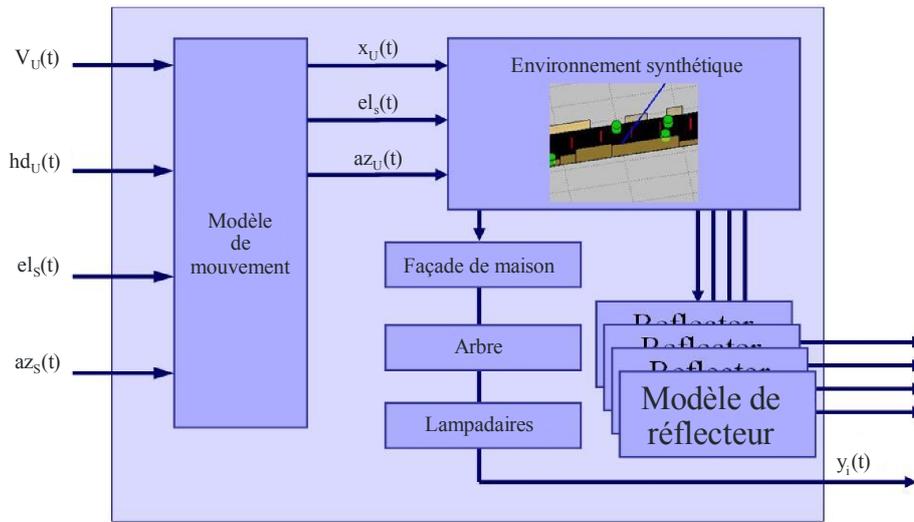
$az_u(t)$: azimut de l'utilisateur

$y_i(t)$: signaux de sortie, chaque valeur de i se rapportant au signal direct et aux réflecteurs.

Les mécanismes de propagation considérés dans le modèle et l'environnement synthétique sont illustrés sur la Fig. 14.

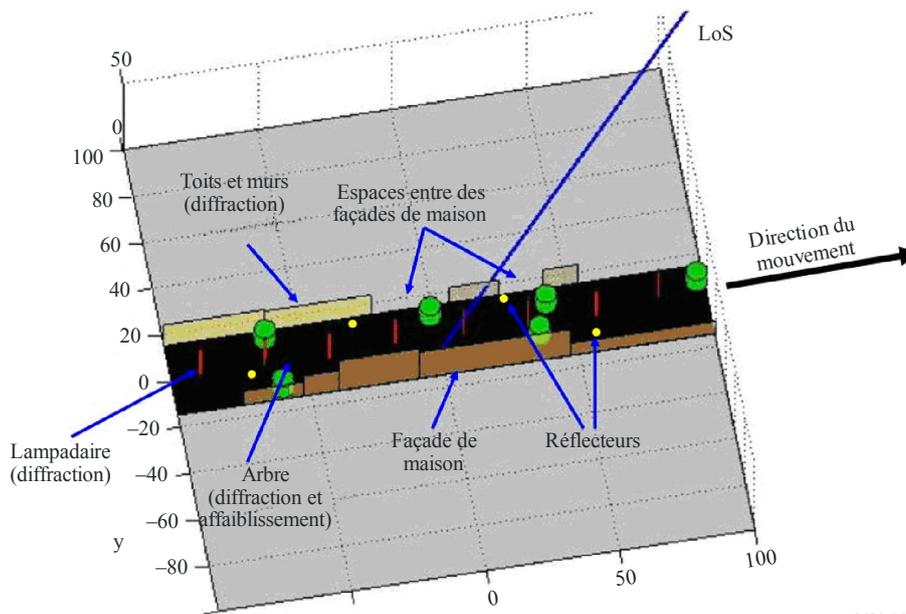
La structure du modèle est valable pour plusieurs scénarios: véhicule en zone urbaine, piéton en zone urbaine, véhicule en zone suburbaine, piéton en zone suburbaine. Le modèle a été élaboré à partir de mesures réalisées en zone urbaine et en zone suburbaine à Munich (Allemagne) et dans les alentours. Un logiciel mettant en œuvre le modèle est disponible sur le site web de la Commission d'études 3 des radiocommunications. On trouvera une description complète de la mise en œuvre et de l'utilisation du modèle sur le site web de la Commission d'étude de l'UIT-R dans un rapport connexe de l'UIT-R sur le modèle large bande physique-statistique pour le SMTS.

FIGURE 13
Structure du modèle



0681-13

FIGURE 14
Mécanismes de propagation et environnement synthétique



0681-14

7.1 Données d'entrée du modèle

Pour chaque échantillon d'entrée, certaines valeurs sont nécessaires pour le modèle:

- élévation du satellite
- azimuth du satellite
- vitesse de l'utilisateur
- cap de l'utilisateur.

Il est à noter que la vitesse maximale de l'utilisateur est limitée par la fréquence d'échantillonnage de la réponse impulsionnelle du canal:

$$v < \frac{c_0 f_{\text{samp}}}{2f_c} \quad (21)$$

où:

f_{samp} : fréquence d'échantillonnage

f_c : fréquence de la porteuse

c_0 : vitesse de la lumière.

Il est recommandé d'utiliser un facteur de suréchantillonnage raisonnable, par exemple égal à 4.

7.2 Données de sortie du modèle

Le modèle donne en sortie un vecteur de N temps de propagation τ_i et N valeurs complexes $A_i(t)$ pour chaque instant. La réponse impulsionnelle du canal équivalente en bande de base est donnée par:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (22)$$

où t et τ désignent respectivement le temps et le temps de propagation. Il est à noter que les temps de propagation $\tau_i(t)$ sont variables dans le temps et qu'ils peuvent prendre des valeurs arbitraires.

7.3 Utilisation des données de sortie du modèle

Soit $s(t)$ le signal équivalent en bande de base émis, alors le signal reçu $r(t)$ peut être calculé comme d'habitude, par la convolution du signal émis avec la réponse impulsionnelle du canal, comme suit:

$$r(t) = s(t) * h(t, \tau) \quad (23)$$

Les réponses impulsionnelles du canal en tant que données de sortie du modèle sont mises à jour à une fréquence donnée par f_{samp} .

8 Diversité de satellite

On a considéré dans les paragraphes précédents des liaisons par un seul satellite. Pour augmenter la disponibilité, les systèmes à satellites multiples peuvent utiliser la diversité de liaison. On traite ici de la combinaison/commutation de signaux provenant de divers satellites. Deux cas sont considérés, à savoir: le cas non corrélé, pour lequel on suppose que les effets d'occultation affectant les signaux reçus émis par des satellites visibles sont non corrélés, et le cas corrélé pour lequel il existe un certain degré de corrélation. Dans les deux cas, les variations des signaux dues aux trajets multiples sont supposées non corrélées.

8.1 Cas non corrélé

Le modèle du § 6 permet d'évaluer les effets de la diversité de satellite dans le cas où plusieurs constellations de satellite sont visibles d'un même point (commutation sur le trajet le moins dégradé). Pour des systèmes OSG, les probabilités d'occurrence de chaque état pour chaque liaison

par satellite, c'est-à-dire P_{An} , P_{Bn} et P_{Cn} (avec $n = 1, 2, \dots, N$ où N est le nombre de satellites visibles), dépendent de l'angle d'élévation θ_n de chaque satellite. Les probabilités d'occurrence de chaque état après sélection de diversité d'état $P_{A:div}$, $P_{B:div}$ et $P_{C:div}$ sont données par les formules suivantes:

$$P_{A:div} = 1 - \prod_{n=1}^N [1 - P_{An}(\theta_n)] \quad (24a)$$

$$P_{B:div} = 1 - P_{A:div} - P_{C:div} \quad (24b)$$

$$P_{C:div} = \prod_{n=1}^N [P_{Cn}(\theta_n)] \quad (24c)$$

Dans le cas d'orbites non OSG (systèmes LEO et à orbite terrestre moyenne) les probabilités d'occurrence des différents états pour chaque liaison par satellite varient en fonction du temps selon l'angle d'élévation du satellite qui est fonction du temps. Les probabilités d'occurrence moyennes des différents états, c'est-à-dire $\langle P_{A:div} \rangle$, $\langle P_{B:div} \rangle$ and $\langle P_{C:div} \rangle$, après application de la diversité de satellite du temps t_1 au temps t_2 sont les suivantes:

$$\langle P_{i:div} \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{i:div}(t) dt \quad (i = A, B \text{ ou } C) \quad (25)$$

En remplaçant dans l'équation (11) P_A , P_B et P_C par $P_{A:div}$, $P_{B:div}$ et $P_{C:div}$ (dans le cas d'une orbite OSG) ou par $\langle P_{A:div} \rangle$, $\langle P_{B:div} \rangle$ and $\langle P_{C:div} \rangle$ (dans le cas d'une orbite non OSG), on peut calculer de la même façon la fonction de distribution cumulative après application de la diversité de satellite avec sélection d'état. Dans ce cas, les autres valeurs de paramètre doivent rester constantes pour $\theta = 30^\circ$ à titre provisoire.

8.2 Cas corrélé

Souvent, les phénomènes d'occultation affectant deux liaisons séparées par un espacement angulaire donné présentent un certain degré de corrélation qu'il est nécessaire de quantifier pour générer des estimations plus précises de la disponibilité globale à attendre d'un système à satellites multiples. On utilise à cet effet le coefficient de corrélation croisée d'occultation. Ce paramètre peut prendre ses valeurs dans l'intervalle ± 1 , allant de valeurs positives proches de 1 pour les espacements angulaires faibles, à des valeurs pouvant même être négatives pour les espacements plus importants.

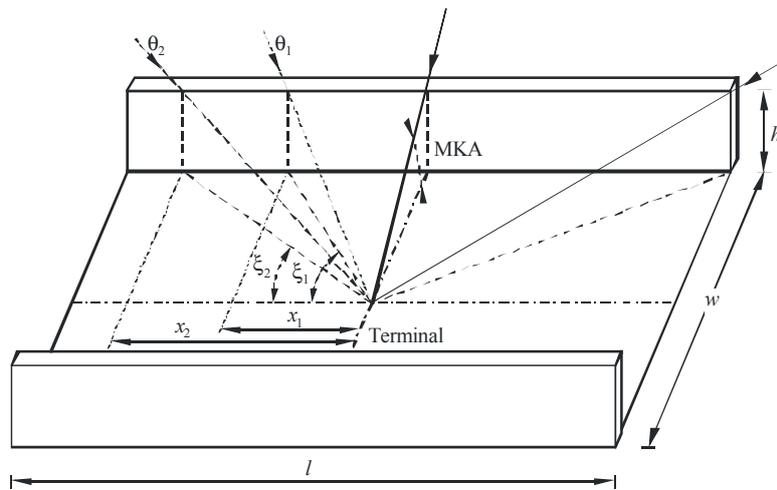
8.2.1 Quantification du coefficient de corrélation croisée d'occultation dans les zones urbaines

On décrit ici un modèle simple à trois segments pour quantifier le coefficient de corrélation croisée entre les phénomènes d'occultation dans les zones urbaines. On utilise une géométrie de zone urbaine de référence, le «canyon urbain». L'objectif est de quantifier le coefficient de corrélation croisée $\rho(\gamma)$, γ étant l'espacement angulaire entre deux liaisons distinctes satellite vers mobile dans les canyons urbains, que l'on décrit par leur MKA.

La géométrie est précisée sur la Fig. 15, où:

- θ_1, θ_2 : angles d'élévation des satellites
- w : largeur moyenne de la rue
- h : hauteur moyenne des bâtiments
- l : longueur de rue considérée.

FIGURE 15
Géométrie d'un canyon urbain



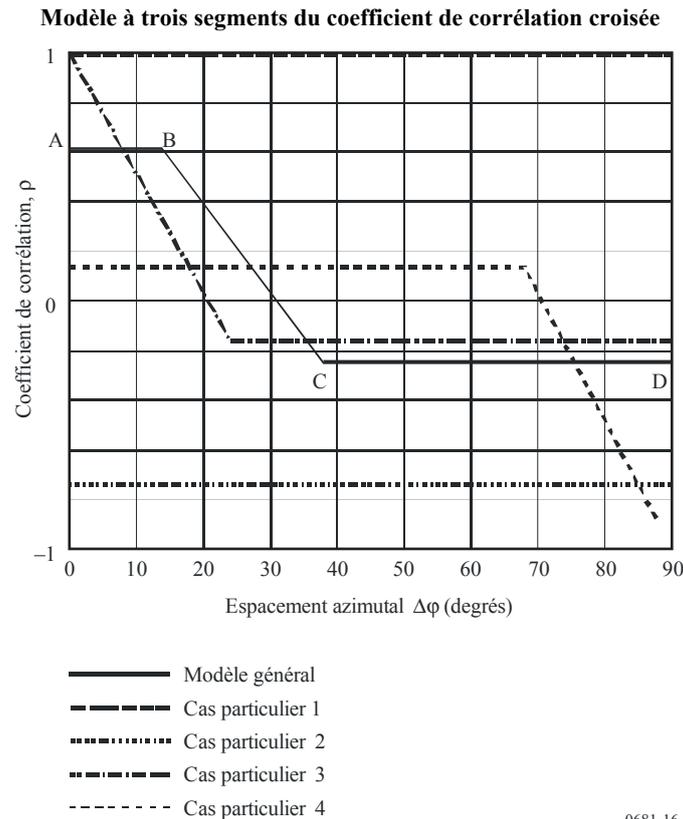
0681-15

L'espacement angulaire γ entre deux liaisons peut s'exprimer de façon plus commode par les angles suivants: les angles d'élévation θ_i et θ_j des deux satellites, et leur espacement azimutal $\Delta\phi$. Le coefficient de corrélation croisée d'occultation peut donc s'exprimer par le terme $\rho(\theta_i, \theta_j, \Delta\phi)$.

Des résultats typiques obtenus à partir de ce modèle sont représentés de façon schématique sur la Fig. 16, qui indique un comportement général caractérisé par un diagramme à trois segments que définissent les points A, B, C et D. Outre ce diagramme général, il existe plusieurs cas particuliers pour lesquels deux points ou plus parmi ces quatre points sont confondus.

La Fig. 16 indique qu'en général, il existe un lobe principal de valeurs de corrélation croisée positives et décroissantes pour les petits espacements azimutaux (généralement $\Delta\phi < 30^\circ$), alors que pour des valeurs plus grandes de $\Delta\phi$, le coefficient a tendance à s'établir à une valeur constante négative. Le lobe présentera des valeurs maximales plus élevées lorsque les deux satellites se trouveront à des angles d'élévation analogues. A mesure que s'accroîtra la différence des angles d'élévation ($\theta_i \gg \theta_j$), le lobe présentera des valeurs maximales beaucoup plus faibles.

FIGURE 16



On a aussi identifié des cas particuliers à ce modèle à trois segments: le cas particulier 1 se produit lorsque les deux satellites sont au-dessus du MKA pour un espacement azimutal quelconque. Dans ce cas, le coefficient de corrélation prend une valeur constante positive de 1 quel que soit $\Delta\phi$. Ce cas n'est pas pertinent car dans une telle situation la diversité de satellite n'est pas nécessaire. Le cas particulier 2 se produit lorsqu'un satellite est en permanence au-dessus du MKA alors que le second se trouve en permanence en dessous (sauf aux deux extrémités du canyon). Dans ce cas, le coefficient de corrélation prend une valeur constante négative. Le cas particulier 3 se produit lorsque les deux satellites ont le même angle d'élévation. Dans ce cas, le lobe de corrélation décroît à partir de la valeur maximale 1 (ce qui signifie que les satellites occupent la même position). Ce cas particulier s'applique aux systèmes fondés sur les satellites OSG, largement espacés en azimut mais présentant des angles d'élévation très proches. Enfin, le cas particulier 4 se produit pour des satellites ayant des angles d'élévation très différents ($\theta_i \gg \theta_j$). Le lobe de corrélation s'étend alors sur un intervalle d'espacements azimutaux beaucoup plus grand, mais présente de petites valeurs positives de corrélation.

Il faut souligner que, étant donné la géométrie du scénario (canyon urbain) et l'hypothèse selon laquelle l'utilisateur se trouve au milieu de la rue, les valeurs de corrélation sont symétriques pour chacun des quatre quadrants $\Delta\phi$: c'est pourquoi seul un quadrant est représenté sur la Fig. 16.

Les données d'entrée suivantes sont utilisées dans le modèle (voir la Fig. 15) les angles d'élévation θ_1 et θ_2 des satellites (degrés), la hauteur moyenne h du bâtiment (m), la largeur moyenne w de la rue (m) et la longueur de rue, l , considérée (m). Il est conseillé de choisir une grande valeur pour ce dernier paramètre, c'est-à-dire $l \geq 200$ m. De plus, on suppose que $\theta_2 \geq \theta_1$. La résolution $\Delta\phi$ de l'espacement azimutal du modèle est de 1° ; elle est valable pour toutes les bandes de fréquences, même si elle présente une précision accrue pour les bandes supérieures à environ 10 GHz.

Il faudra suivre les étapes suivantes pour calculer les valeurs du coefficient de corrélation croisée et les espacements azimutaux correspondant aux points A, B, C et D du modèle:

Etape 1: Calculer les valeurs auxiliaires x_1 , x_2 , M_1 et M_2 ainsi que les angles ξ_1 et ξ_2 (voir la Fig. 15):

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{h}{\text{tg } \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad \text{et} \quad x_2 = \sqrt{\left(\frac{h}{\text{tg } \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (26)$$

- Si $(x_{1,2})^2 < 0$, se reporter à l'Etape 6. Ce cas se produit lorsque le satellite 1 et/ou le satellite 2 sont toujours en condition de visibilité directe pour un espacement azimutal quelconque.
- Si $x_{1,2} > l/2$, prendre $x_{1,2} = l/2$. Ce cas se produit lorsque le satellite 1 et/ou le satellite 2 ne sont visibles qu'aux deux extrémités de la rue.

$$\xi_1 = \text{arrondi} \left(\arctg \frac{w/2}{x_1} \right) \quad \text{et} \quad \xi_2 = \text{arrondi} \left(\arctg \frac{w/2}{x_2} \right) \quad (27)$$

$$M_1 = \frac{\xi_1 + 0,5}{90} \quad \text{et} \quad M_2 = \frac{\xi_2 + 0,5}{90} \quad (28)$$

où «arrondi» signifie une approximation à la valeur entière la plus proche (degrés).

Etape 2: Calcul des informations auxiliaires relatives aux points A et D du modèle.

Pour le point A:

$$N_{11} = 4\xi_1 + 2 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad N_{01} = 4(\xi_2 - \xi_1) \quad N_{10} = 0 \quad (29)$$

Pour le point D:

- Si $\xi_1 + \xi_2 \leq 90$,

$$N_{11} = 0 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_1 - 4\xi_2 - 4 \quad N_{01} = 4\xi_2 + 2 \quad N_{10} = 4\xi_1 + 2 \quad (30a)$$

- Si $\xi_1 + \xi_2 > 90$,

$$N_{11} = 4\xi_1 + 4\xi_2 + 4 - 360 \quad N_{00} = 0 \quad N_{01} = 360 - 4\xi_1 - 2 \quad N_{10} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad (30b)$$

Etape 3: Calcul du coefficient de corrélation croisée aux points A et D.

$$\rho_{A,D} = \frac{1}{359} \frac{N_{11}(1-M_1)(1-M_2) + N_{00}(0-M_1)(0-M_2) + N_{10}(1-M_1)(0-M_2) + N_{01}(0-M_1)(1-M_2)}{\sigma(\theta_1)\sigma(\theta_2)} \quad (31)$$

$$\sigma^2(\theta_1) = \frac{(4\xi_1 + 2)(1-M_1)^2 + (360 - 4\xi_1 - 2)(0-M_1)^2}{359} \quad (32a)$$

$$\sigma^2(\theta_2) = \frac{(4\xi_2 + 2)(1-M_2)^2 + (360 - 4\xi_2 - 2)(0-M_2)^2}{359} \quad (32b)$$

Etape 4: Au point B, le coefficient de corrélation est le même qu'au point A et son espacement azimutal $\Delta\phi$ est donné par:

$$\text{Azimut}_{\text{Point B}} = \xi_2 - \xi_1 \quad \text{degrés} \quad (33)$$

Etape 5: Au point C, le coefficient de corrélation est le même qu'au point D et son espacement azimutal $\Delta\phi$ est donné par:

- Si $\xi_1 \xi_2 \leq 90$, $\text{Azimut}_{\text{Point C}} = \xi_1 - \xi_2$ degrés (34a)

$$- \quad \text{Si } \xi_1 + \xi_2 > 90, \quad \text{Azimut}_{\text{Point C}} = 180 - \xi_1 - \xi_2 \quad \text{degrés} \quad (34b)$$

Etape 6: Ce cas est celui pour lequel il y a toujours, pour un angle d'élévation ou pour les deux, des conditions de visibilité directe. On calcule ici le coefficient de corrélation d'une manière légèrement différente de celle utilisée dans l'Etape 3.

- Si les deux satellites sont toujours visibles, le coefficient de corrélation croisée est constant et égal à +1 pour une valeur quelconque de $\Delta\phi$.
- Si l'un des satellites est toujours visible, le coefficient de corrélation croisée est également constant et donné par:

$$\rho = \left(\frac{N_{11}}{180} - 1 \right) \quad (35)$$

où $N_{11} = 4\xi_1 + 2$, alors que ξ_1 se calcule de la même manière qu'à l'Etape 1.

8.2.2 Calculs de disponibilité

Dès que l'on dispose du coefficient de corrélation croisée, il est possible de calculer l'amélioration de disponibilité introduite par l'utilisation de la diversité de satellite. On trouvera ici des formules permettant de calculer la disponibilité du système pour le cas de la diversité à deux satellites. Etant donné les faibles marges (ou plages de commande de puissance) utilisées d'ordinaire pour les systèmes mobiles terrestres par satellite, seuls les effets d'occultation doivent être considérés. Ceci constitue une hypothèse de travail raisonnable puisque la disponibilité correspondra à des liaisons en condition de visibilité directe pour lesquelles les variations ayant pour origine les trajets multiples seront de type Rice, et seront donc très faibles. Dans le cas de conditions d'occultation (importante ou réduite), les liaisons seront interrompues même si les trajets multiples donnent lieu à des renforcements importants des niveaux des signaux.

Soient deux liaisons espacées angulairement présentant des probabilité d'indisponibilité p_1 et p_2 et un coefficient de corrélation croisée d'occultation ρ . L'improbabilité de disponibilité globale consécutive à la diversité de satellite est alors donnée par:

$$p_0 = \rho \sqrt{p_1(1-p_1)} \sqrt{p_2(1-p_2)} + p_1 p_2 \quad (36)$$

et la probabilité de disponibilité sera $1 - p_0$. Les valeurs possibles de ρ dans l'équation (36) se limitent à celles qui ne rendent pas p_0 négatif. Les probabilités p_1 et p_2 pour les zones urbaines peuvent être calculées en utilisant le modèle donné dans le § 4.2.

Des calculs globaux pour un intervalle de temps donné ou pour une période complète de constellation nécessitent de calculer les moyennes pondérées sur toutes les positions (en azimut et en élévation) des deux satellites par rapport au terminal de l'utilisateur.

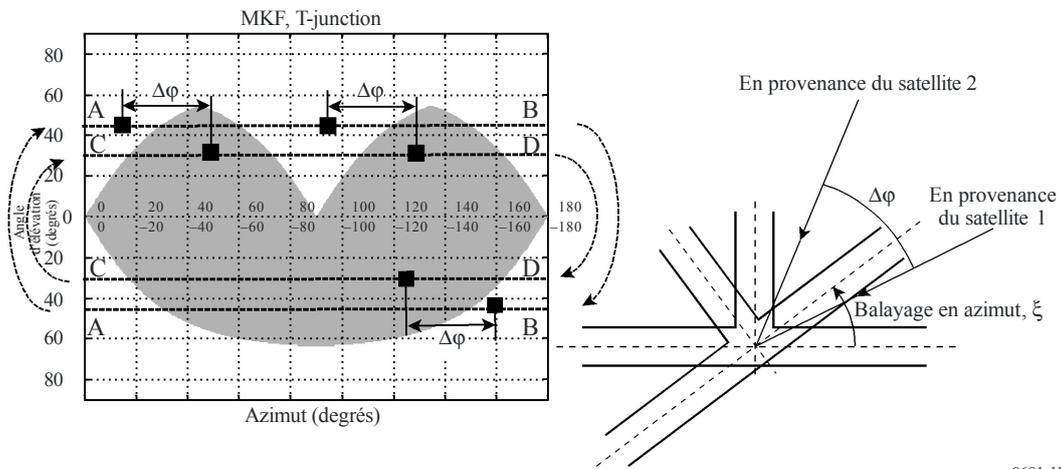
8.3 Modélisation des effets de diversité de satellite au moyen de MKF

Le calcul des disponibilités des liaisons multisatellites peut faire appel aux MKF définies au § 4.4. Les configurations géométriques des masques proprement dits impliquent d'ores et déjà une éventuelle corrélation partielle des effets d'occultation. La Fig. 17 illustre le calcul de la disponibilité d'un système constitué de deux satellites OSG. Les segments A-B et C-D désignent les trajets de balayage à suivre pour calculer la disponibilité combinée. Le segment A-B correspond à un balayage de 360° en azimut, pour un angle d'élévation θ_1 associé au satellite-1, et le segment C-D à un balayage de 360° en azimut, pour un angle d'élévation θ_2 associé au satellite-2. Afin de tenir compte de l'éventuelle corrélation croisée des effets d'occultation, le balayage sur 360° doit préserver l'espacement azimutal $\Delta\phi$ entre les deux satellites.

L'utilisation des MKF peut également être étendue au cas de plusieurs satellites OSG, comme à celui des constellations de satellites non OSG. Dans ce dernier cas, la méthode consisterait à itérer les calculs par balayage de l'orientation de la rue sur 360° pour un nombre suffisamment important de configurations instantanées. Dans ce contexte une configuration instantanée désigne les positions instantanées (azimut et angle d'élévation) des différents satellites au-dessus d'un angle d'élévation opérationnel minimal θ_{min} . Si l'on définit un pas temporel approprié ΔT et une période d'observation T_{obs} la disponibilité peut se calculer comme étant égale à la moyenne temporelle, pondérée selon l'orientation de la rue, des résultats obtenus pour chaque configuration instantanée. Le choix de $\Delta T = 1$ min et de T_{obs} égale à la période de la constellation donne des résultats adéquats.

FIGURE 17

Calcul de la disponibilité totale du système pour une constellation de deux satellites OSG par rapport à une jonction de rues



0681-17