

RECOMMANDATION UIT-R P.681-3*

DONNÉES DE PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION MOBILES TERRESTRES TERRE-ESPACE

(Question UIT-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997)

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, de blocage et de trajets multiples en utilisant une antenne à forte directivité placée en des sites 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 de blocage et d'écran. Elle s'appuie sur des mesures à 1,5 GHz (bande L) et à 870 MHz dans la gamme des ondes décimétriques.

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

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

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

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 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'étape 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 tels que $0,85 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$:

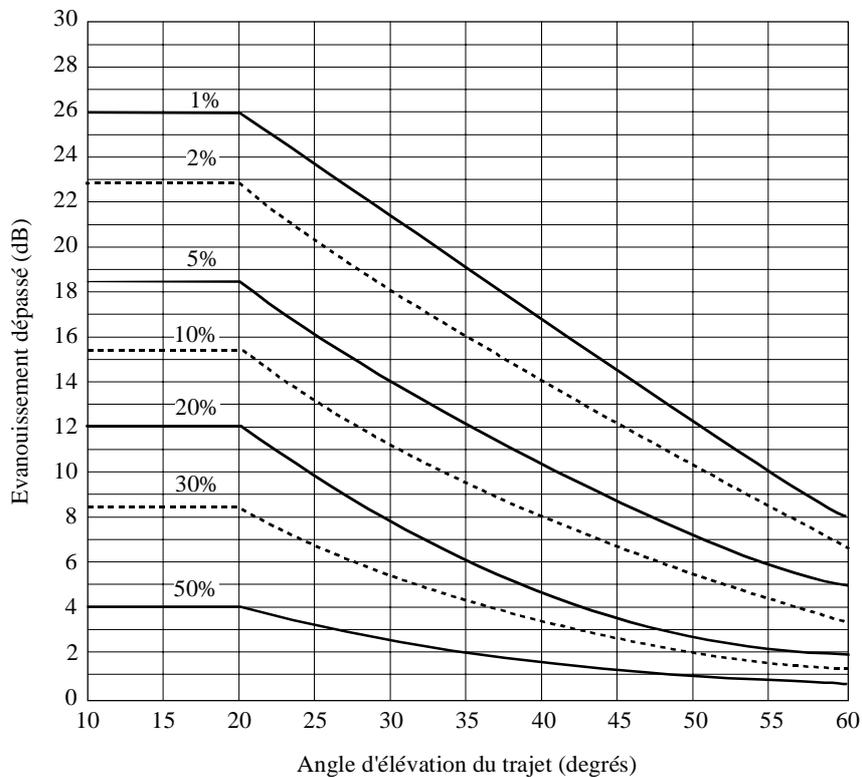
$$A(p, \theta, f) = A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left(\frac{80}{p} \right) \quad \text{pour} \quad 80\% \geq p > 20\% \quad (5)$$

$$= A_{20}(p, \theta, f) \quad \text{pour} \quad 20\% \geq p > 1\%$$

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%.

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



0681-01

4.1.1 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° .

TABLEAU 1

Évanouissements 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

4.1.2 Application du modèle d'effet d'écran des accotements à des systèmes du service mobile terrestre par satellite (SMTS) du type 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.

4.2 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:

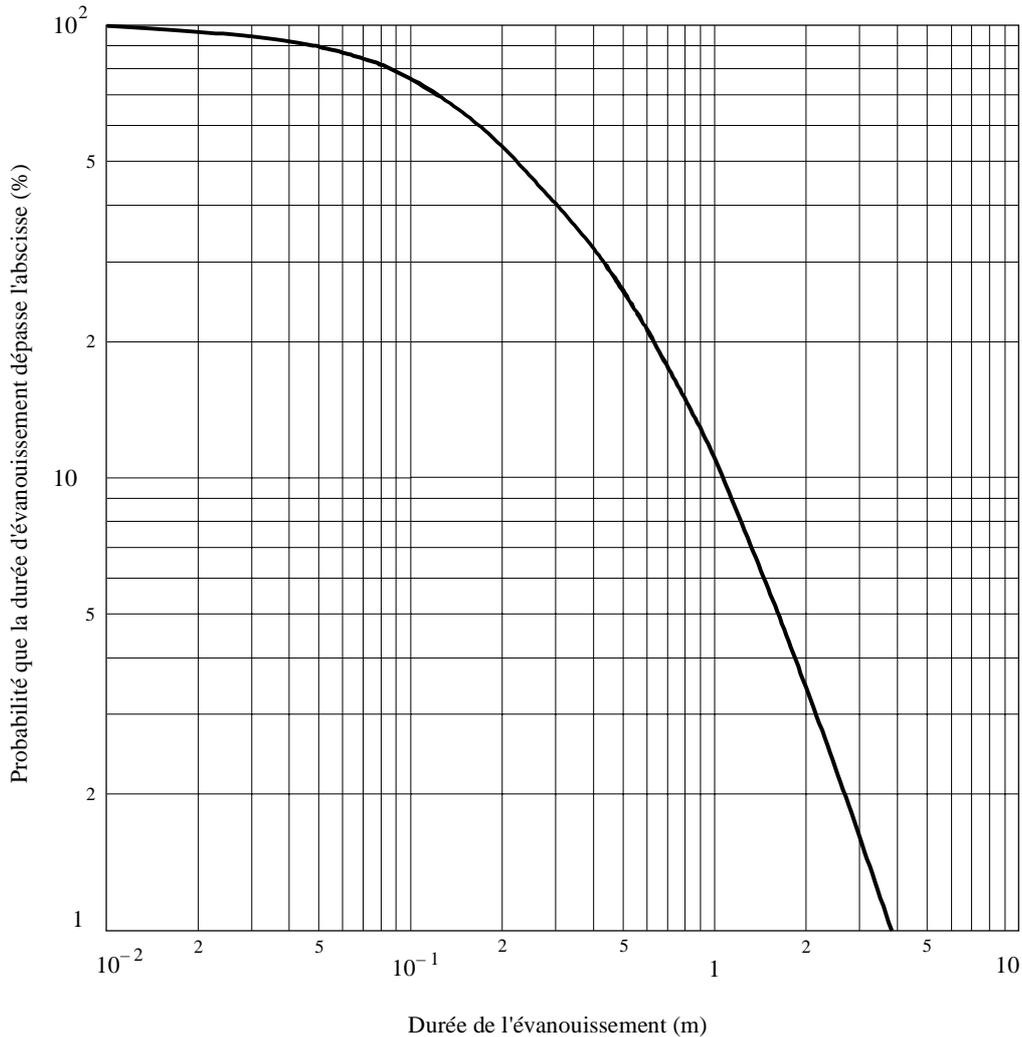
$$P(FD > dd \mid A > A_q) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right) \quad (6)$$

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.

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



0681-02

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.

4.3 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:

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

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 .

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

4.4 Cas particulier des équipements terminaux tenus à la main (blocage 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 basses (systèmes GSO, 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 de blocage 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 avec satellites sur orbites basses. 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 § 4.1.2). 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. 3a 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. 3b montre comment le niveau relatif du signal varie en fonction de l'angle d'azimut ϕ de la Fig. 3a. On voit, dans la Fig. 3b, que la diminution maximale du niveau du signal sous l'effet du blocage provoqué 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. 3b 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.

5 Modèles de trajets multiples en visibilité directe par temps clair

Dans de nombreux cas, le terminal mobile est en visibilité directe par temps clair (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 gain 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 3a

Positions respectives de la tête de l'utilisateur et de l'antenne

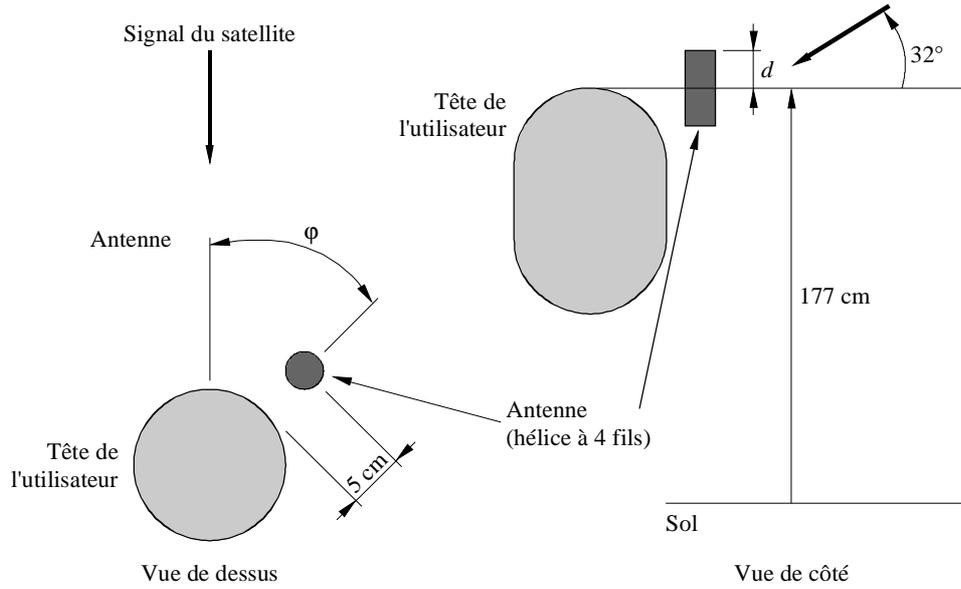
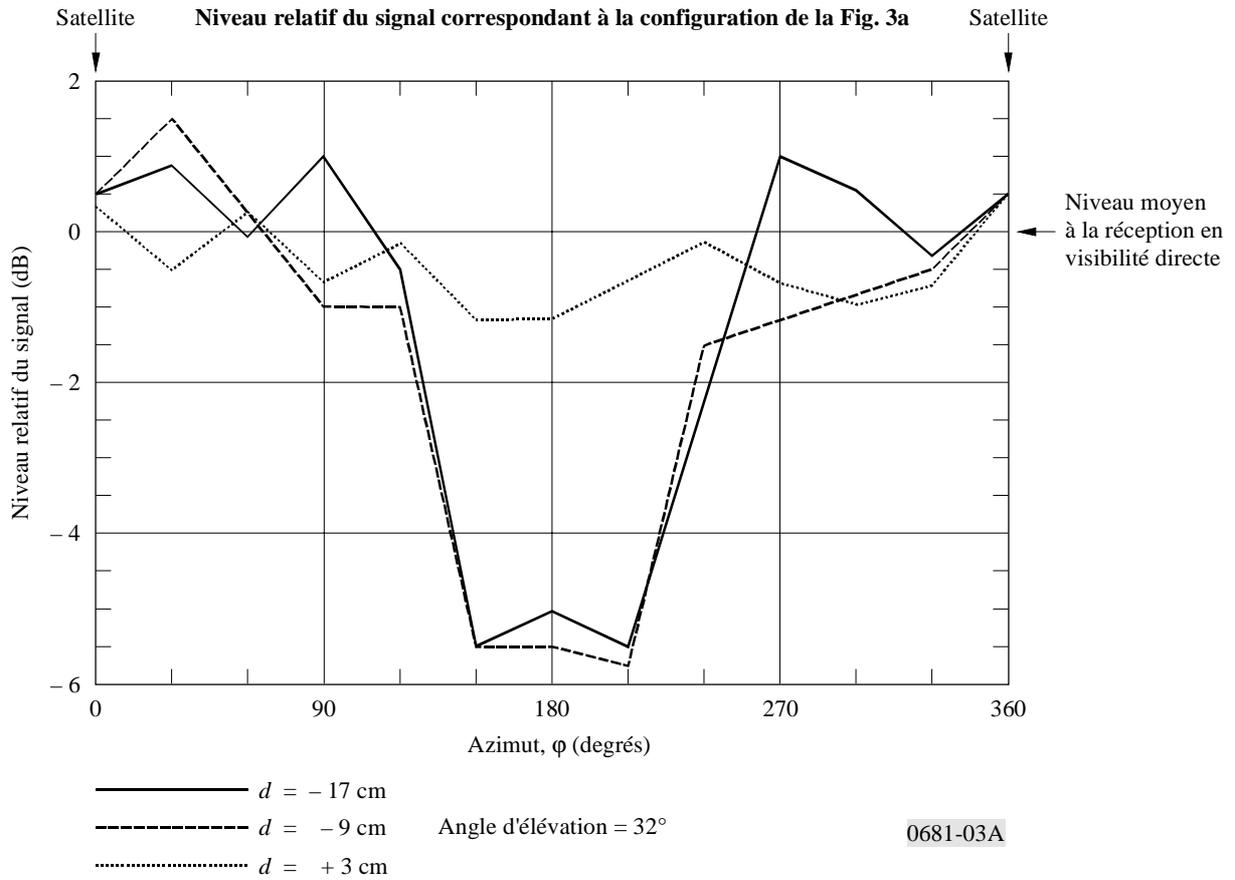


FIGURE 3b



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:

$$p = a A^{-b} \quad (8)$$

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. 4 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:

$$p = u \exp(-vA) \quad (9)$$

pour:

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

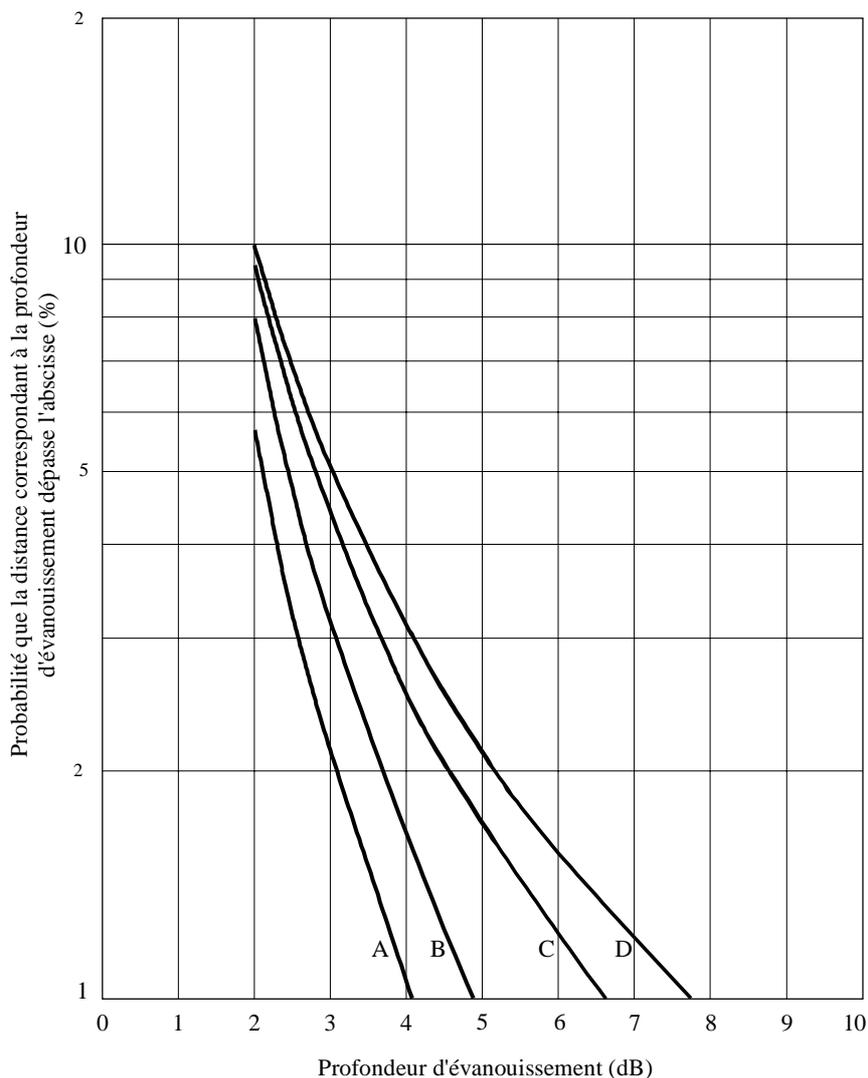
où:

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

A : dépassement du seuil d'évanouissement (dB).

FIGURE 4

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°

0681-04

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.

TABLEAU 4

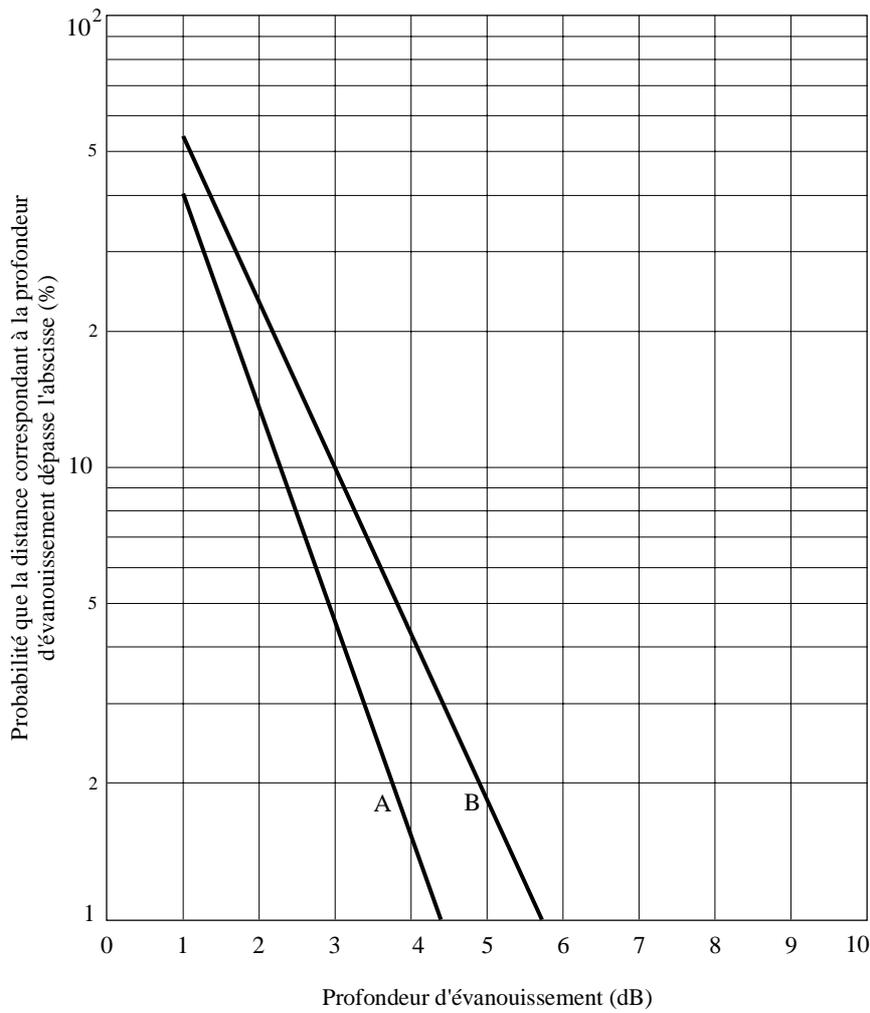
Paramètres d'ajustement optimal des distributions cumulatives exponentielles des évanouissements par trajets multiples le long de routes bordées d'arbres

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. 5 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 5

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



Courbes A: 870 MHz
 B: 1,5 GHz

0681-05