

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.682-4
(08/2022)

**Données de propagation nécessaires pour
la conception de systèmes de
télécommunication aéronautiques
mobiles 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 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 œuvre 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

(Également 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	Émissions 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, 2023

© UIT 2023

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.682-4

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

(Question UIT-R 207/3)

(1990-1992-2007-2012-2022)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit les effets de la propagation qui revêtent une importance particulière pour les systèmes aéronautiques mobiles par satellite. Elle passe en revue les dégradations dues à la propagation ionosphérique et troposphérique et fait référence aux Recommandations UIT-R donnant des indications sur ces effets. Elle présente enfin des modèles de prévision des effets de la propagation causés par les trajets multiples et la diffusion des signaux depuis la surface de la Terre.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes de télécommunication aéronautiques mobiles 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 aéronautiques mobiles par satellite sont nécessaires pour donner une précision adéquate dans toutes les conditions d'exploitation;
- d) qu'il existe cependant des méthodes qui donnent une précision suffisante pour de nombreuses applications,

recommande

d'adopter les méthodes de l'Annexe 1 pour la planification des systèmes de télécommunication Terre-espace du service aéronautique mobile, en plus des méthodes préconisées dans la Recommandation UIT-R P.618.

Annexe 1**1 Introduction**

Dans le service mobile aéronautique par satellite, les effets de la propagation sont différents de ceux que l'on observe dans le service fixe par satellite et les autres services mobiles par satellite parce que:

- les antennes utilisées sur les avions sont petites et que leur qualité de fonctionnement peut être influencée par la cellule;
- les grandes vitesses des avions produisent des étalements par effet Doppler importants;

- les terminaux des aéronefs doivent offrir une gamme dynamique étendue en émission et en réception;
- pour des raisons de sécurité, les communications doivent être extrêmement fiables: les dégradations dues à la propagation, même de courte durée, sont donc très significatives; la fiabilité des communications doit être maintenue en dépit des virages inclinés et des mouvements sur les trois axes.

La présente Annexe est consacrée à l'examen des données et des modèles spécifiques de caractérisation des dégradations sur le trajet, c'est-à-dire:

- des effets troposphériques, notamment de l'affaiblissement dû au gaz, l'affaiblissement dû aux nuages et à la pluie, l'affaiblissement dû au brouillard, la réfraction et la scintillation;
- des effets ionosphériques tels que la scintillation;
- des effets dus aux réflexions par le sol (trajets multiples);
- des effets du milieu (mouvements de l'aéronef, état de la mer, relief).

Les systèmes mobiles aéronautiques par satellite peuvent fonctionner à l'échelle mondiale et comporter des trajets de propagation à faible angle d'élévation. Les paramètres de la propagation par trajets multiples au-dessus de la terre et de la mer ont été mesurés dans plusieurs configurations. Dans certains cas, des simulations en laboratoire ont permis de comparer les valeurs obtenues et de vérifier les paramètres du modèle. Le signal reçu est considéré en termes de ses composantes possibles: une onde directe sujette aux effets atmosphériques et une onde réfléchie qui, en général, est essentiellement formée d'une composante diffuse.

On s'intéresse actuellement, pour les systèmes mobiles aéronautiques par satellite, aux fréquences avoisinant 1,5 GHz. Les données de cette Recommandation s'appliquent principalement à ces fréquences, la plupart des expériences ayant été faites dans cette bande. On estime que d'autres fréquences pourront être utilisées à mesure que les systèmes aéronautiques progresseront.

2 Effets troposphériques

Dans le cas des services aéronautiques, l'altitude de l'antenne mobile est un paramètre important. On peut évaluer l'affaiblissement troposphérique au moyen des méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R P.618.

Le signal reçu peut être influencé à la fois par une réfraction à grande échelle et par les scintillations induites par les turbulences atmosphériques. Ces effets diminuent à haute altitude.

3 Effets ionosphériques

Les effets ionosphériques sur des trajets obliques sont examinés dans la Recommandation UIT-R P.531. Il s'agit de phénomènes importants sur de nombreux trajets à des fréquences inférieures à 10 GHz, surtout à $\pm 15^\circ$ de l'équateur géomagnétique et, dans une moindre mesure, dans les zones aurorales et les régions des calottes glaciaires. Les effets ionosphériques sont les plus marqués en période d'activité solaire maximale.

Les dégradations causées par l'ionosphère ne diminuent pas aux altitudes couramment utilisées par les aéronefs. Une brève description des effets ionosphériques qui présentent un intérêt particulier pour les systèmes mobiles par satellite est donnée dans la Recommandation UIT-R P.680. Pour la plupart des signaux de télécommunication, les dégradations les plus marquées sont sans doute celles qui résultent de la scintillation ionosphérique. Le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.680 indique les valeurs maximales estimées des effets ionosphériques jusqu'à 10 GHz pour un angle d'élévation de 30° .

4 Évanouissements dus aux réflexions à la surface de la Terre et à la diffusion

4.1 Considérations générales

Dans le cas des services mobiles aéronautiques par satellite, les évanouissements par trajets multiples dus aux réflexions à la surface de la Terre sont différents des évanouissements observés avec d'autres systèmes mobiles par satellite parce que les vitesses et les altitudes des avions sont de loin supérieures à celles des autres éléments mobiles.

4.2 Évanouissements dus aux réflexions par la mer

On peut analyser les caractéristiques d'évanouissement dans le cas des systèmes aéronautiques au moyen de méthodes similaires à celles utilisées pour les systèmes maritimes, décrites dans la Recommandation UIT-R P.680, en tenant soigneusement compte de la sphéricité de la Terre, dont l'influence croît à mesure qu'augmente l'altitude de l'antenne au-dessus de la surface réfléchissante.

4.2.1 Influence de la hauteur d'antenne et du gain de l'antenne

La méthode simple suivante, fondée sur un modèle théorique, fournit des estimations approximatives de la puissance par trajets multiples, ou de la profondeur d'évanouissement, pouvant être utilisées dans les applications techniques.

La méthode se présente comme suit:

Gamme applicable:

Fréquence: 1-2 GHz

Angle d'élévation: $\theta_i \geq 3^\circ$ et $G(1,5\theta_i) \geq -10$ dB

où $G(\theta)$ est le diagramme du lobe principal de l'antenne donné par:

$$G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{dB} \quad (1)$$

où:

G_m : valeur maximale du gain d'antenne (dB)

θ : angle mesuré à partir de la ligne de visée (degrés).

Polarisation: circulaire et horizontale; polarisation verticale pour $\theta_i \geq 8^\circ$

État de la mer: vagues de 1 à 3 m (la composante incohérente est totalement développée).

Étape 1: Calculer les angles rasants déterminés par le point de réflexion spéculaire, θ_{sp} et l'horizon, θ_{hr} , au moyen de:

$$\theta_{sp} = 2 \gamma_{sp} + \theta_i \quad \text{degrés} \quad (2a)$$

$$\theta_{hr} = \cos^{-1} [R_e / (R_e + H_a)] \quad \text{degrés} \quad (2b)$$

où:

$$\gamma_{sp} = 7,2 \times 10^{-3} H_a / \text{tg } \theta_i$$

R_e : rayon de la Terre = 6 371 km

H_a : hauteur de l'antenne (km).

Étape 2: Déterminer le gain relatif d'antenne G dans la direction médiane entre le point spéculaire et l'horizon. Le gain relatif d'antenne se calcule approximativement par la formule (1), où $\theta = \theta_i + (\theta_{sp} + \theta_{hr})/2$ (degrés).

Étape 3: Calculer le coefficient de réflexion de Fresnel de la mer:

$$R_H = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad (\text{polarisation horizontale}) \quad (3a)$$

$$R_V = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}}{\sin \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}} \quad (\text{polarisation verticale}) \quad (3b)$$

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{polarisation circulaire}) \quad (3c)$$

$$\eta = \varepsilon_r(f) - j60 \lambda \sigma(f)$$

où:

$\varepsilon_r(f)$: permittivité relative de la surface à la fréquence f (d'après la Recommandation UIT-R P.527)

$\sigma(f)$: conductivité (S/m) de la surface à la fréquence f (d'après la Recommandation UIT-R P.527)

λ : longueur d'onde en espace libre (m).

Étape 4: Calculer le facteur de correction C_θ (dB):

$$C_\theta = \begin{cases} 0 & \text{pour } \theta_{sp} \geq 7^\circ \\ (\theta_{sp} - 7)/2 & \text{pour } \theta_{sp} < 7^\circ \end{cases} \quad (4)$$

Étape 5: Calculer le facteur de divergence D (dB) dû à la courbure de la Terre:

$$D = -10 \log_{10} \left[1 + \frac{2 \sin \gamma_{sp}}{\cos \theta_{sp} \sin(\gamma_{sp} + \theta_i)} \right] \quad (5)$$

Étape 6: La puissance incohérente moyenne, P_r , des ondes réfléchies par la mer relative à celle de l'onde directe est donnée par:

$$Pr = G + R + C\theta + D \quad \text{dB} \quad (6)$$

où:

$$R = 20 \log_{10} |R_i|$$

avec $R_i = R_H, R_V$ ou R_C des formules (3).

Étape 7: La profondeur d'évanouissement est calculée de la façon suivante:

Étape 7a: La puissance du signal de référence (l'onde directe) est de 1 (0 dB).

Étape 7b: La puissance incohérente moyenne, P_r , des ondes réfléchies par la mer par rapport à celle de l'onde directe (c'est-à-dire la puissance par trajets multiples) est de dB, voir l'étape 6.

Étape 7c: la puissance totale reçue est de $10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right)$ dB.

Étape 7d: Calculer la puissance du signal reçu dépassée pendant $1 - p\%$ du temps. La profondeur d'évanouissement dépassée pendant $p\%$ du temps peut être calculée comme le rapport entre la puissance du signal par onde directe et la puissance du signal dépassée pendant $1 - p\%$ du temps. Dans l'hypothèse d'une distribution de probabilité de Nakagami-Rice, la puissance totale est égale à 0 dB dans la Fig. 1 et on suppose que la puissance du signal reçu dépassée pendant $1 - p\%$ du temps est de A dB.

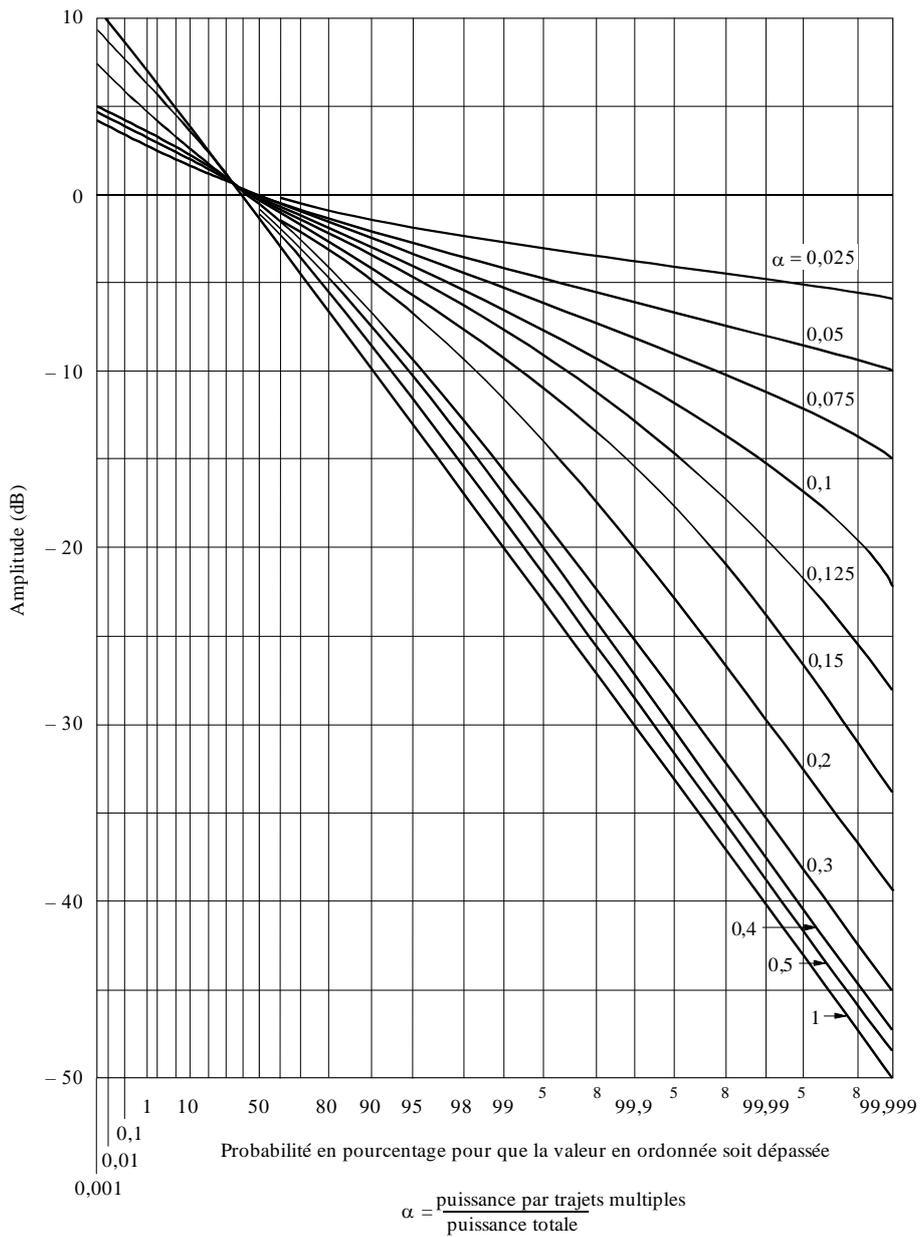
Étape 7e: Étant donné que la puissance totale reçue est de $10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right)$ dB, ce qui est différent de la Fig. 4, la puissance du signal reçu dépassée pendant $1 - p\%$ du temps est de $A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right)$ dB.

Étape 7f: Sachant que la profondeur d'évanouissement est positive en cas de perte de signal et négative en cas de renforcement du signal, la profondeur d'évanouissement $F_d(p)$ dépassée pendant $p\%$ est donnée par la formule:

$$F_d(p) = 0 - \left[A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right) \right] = - \left[A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right) \right] \text{ dB} \quad (7)$$

FIGURE 1

Distribution de Nakagami-Rice pour une puissance totale constante avec le paramètre α

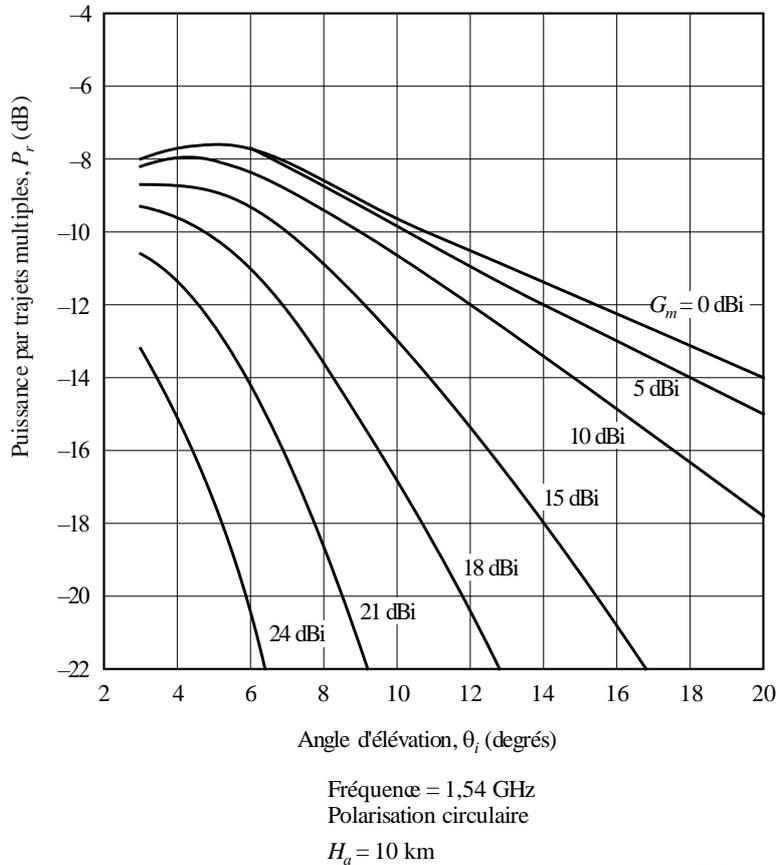


$$\alpha = \frac{\text{puissance par trajets multiples}}{\text{puissance totale}}$$

Pour ce cas, $\alpha = \frac{10^{\frac{P_r}{10}}}{1 + 10^{\frac{P_r}{10}}}$

La Fig. 2 représente la puissance moyenne par trajets multiples de la composante incohérente, obtenue au moyen de la méthode ci-dessus, en fonction de l'angle d'élévation et pour différents gains. Par comparaison avec le cas des systèmes mobiles maritimes par satellite (Fig. 2 de la Recommandation UIT-R P.680), on constate que la puissance P_r de l'onde réfléchie est, dans le cas des systèmes mobiles aéronautiques par satellite, réduite de 1 à 3 dB aux faibles angles d'élévation.

FIGURE 2
Puissance moyenne par trajets multiples relative à la puissance du signal direct,
en fonction de l'angle d'élévation pour différents gains d'antenne



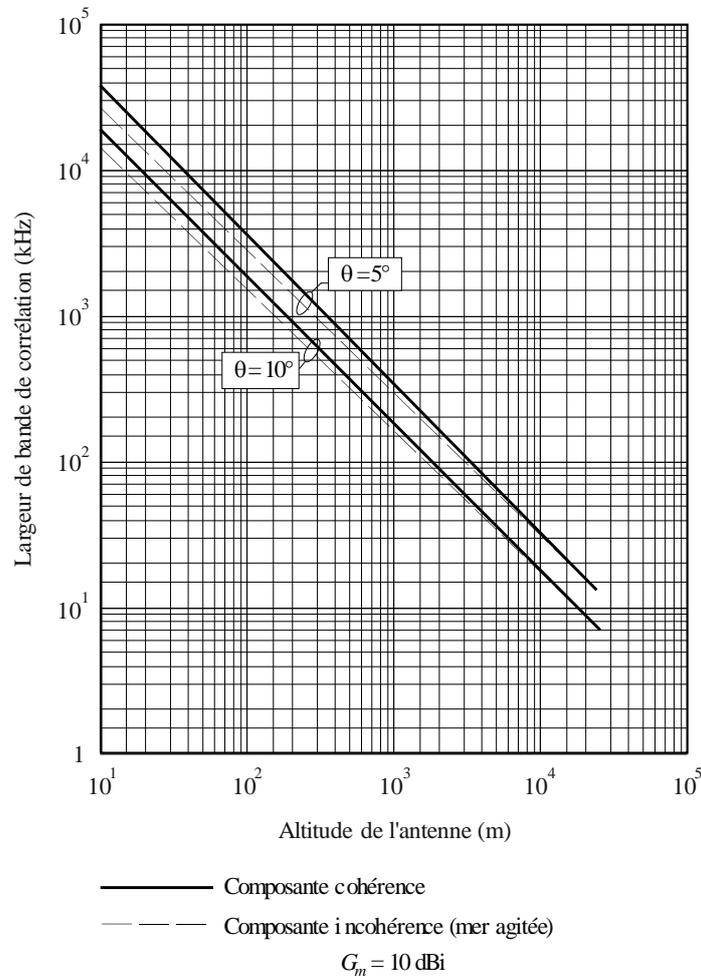
NOTE 1 – Des études analytiques et expérimentales ont fait apparaître que, pour les ondes à polarisation circulaire autour de 1,5 GHz et un gain d'antenne de 7 dB, la profondeur des évanouissements dus aux trajets multiples par mer agitée est de 8 à 11 dB environ à basse et moyenne altitudes de vol et de 7 à 9 dB environ à haute altitude (plus de 2 km). La profondeur des évanouissements dus aux trajets multiples est d'environ 2 dB plus faible pour un gain d'antenne de 15 dB.

4.2.2 Temps de propagation et largeur de bande de corrélation

Le signal reçu est constitué des ondes directe et réfléchie. Étant donné que le temps de propagation de la composante réfléchie est plus long que celui de la composante directe, le signal composite reçu peut être sujet à des évanouissements sélectifs en fréquence. La corrélation des signaux diminue avec l'accroissement de l'espacement des fréquences. L'influence du gain de l'antenne sur la corrélation est faible pour les gains inférieurs à 15 dB. La Fig. 3 illustre la relation entre la hauteur d'antenne et la largeur de bande de corrélation, définie dans ce cas comme l'espacement pour lequel le coefficient de corrélation entre deux ondes radioélectriques est égal à 0,37 ($1/e$). La largeur de bande de corrélation décroît à mesure que la hauteur d'antenne augmente; elle est comprise entre 10 et 20 kHz (temps de

propagation de 6 à 12 μ s) pour une altitude de 10 km. Aussi, dans les systèmes aéronautiques, les évanouissements dus aux trajets multiples peuvent avoir des caractéristiques sélectives en fréquence.

FIGURE 3
 Largeur de bande de corrélation en fonction de l'altitude de l'antenne,
 pour un gain d'antenne de 10 dBi



P.0682-03

4.3 Mesure des effets des trajets multiples dus à la réflexion sur la mer

De nombreuses expériences ont été faites dans la bande 1,5 à 1,6 GHz. Les résultats de ces mesures, résumés dans ce paragraphe, pourront être utilisés lors de la conception des systèmes.

Le Tableau 1 est un résumé des paramètres des trajets multiples observés au-dessus de l'océan, auxquels on a ajouté les valeurs obtenues au moyen d'un modèle analytique. Les étalements des retards de propagation indiqués dans le Tableau 1 sont les profils temporels de puissance du signal à réflexion diffuse arrivant au récepteur. La largeur de bande de corrélation donnée dans le Tableau 1 est la largeur de bande à 3 dB de la fonction d'autocorrélation de fréquence (transformée de Fourier du spectre des retards). L'étalement par effet Doppler est déterminé à partir de la largeur de la densité spectrale de la puissance Doppler. Le temps de décorrélation est la largeur à 3 dB de la fonction d'autocorrélation temporelle (transformée de Fourier inverse du spectre Doppler).

TABLEAU 1

Paramètres des trajets multiples obtenus à partir de mesures océaniques

Paramètre	Gamme mesurée	Valeur typique à l'angle d'élévation spécifié		
		8°	15°	30°
Puissance normalisée des trajets multiples (dB)				
Polarisation horizontale	-5,5 à -0,5	-2,5	-1	-1
Polarisation verticale	-15 à -2,5	-14	-9	-3,5
Étalement des retards de propagation ⁽¹⁾ (µs)				
Valeur à 3 dB	0,25-1,8	0,6	0,8	0,8
Valeur à 10 dB	2,2 -5,6	2,8	3,2	3,2
Largeur de bande de corrélation ⁽²⁾ (kHz)				
Valeur à 3 dB	70-380	160	200	200
Étalement par effet Doppler ⁽¹⁾ (Hz)				
Dans le plan principal				
Valeur à 3 dB	4-190	5	70	140
Valeur à 10 dB	13-350	44 40 ⁽³⁾	180	350
Dans le plan croisé				
Valeur à 3 dB	79-240	79	110	190
Valeur à 10 dB	180-560	180 80 ⁽³⁾	280	470
Temps de décorrélation ⁽²⁾ (ms)				
Valeur à 3 dB	1,3-10	7,5	3,2	2,2

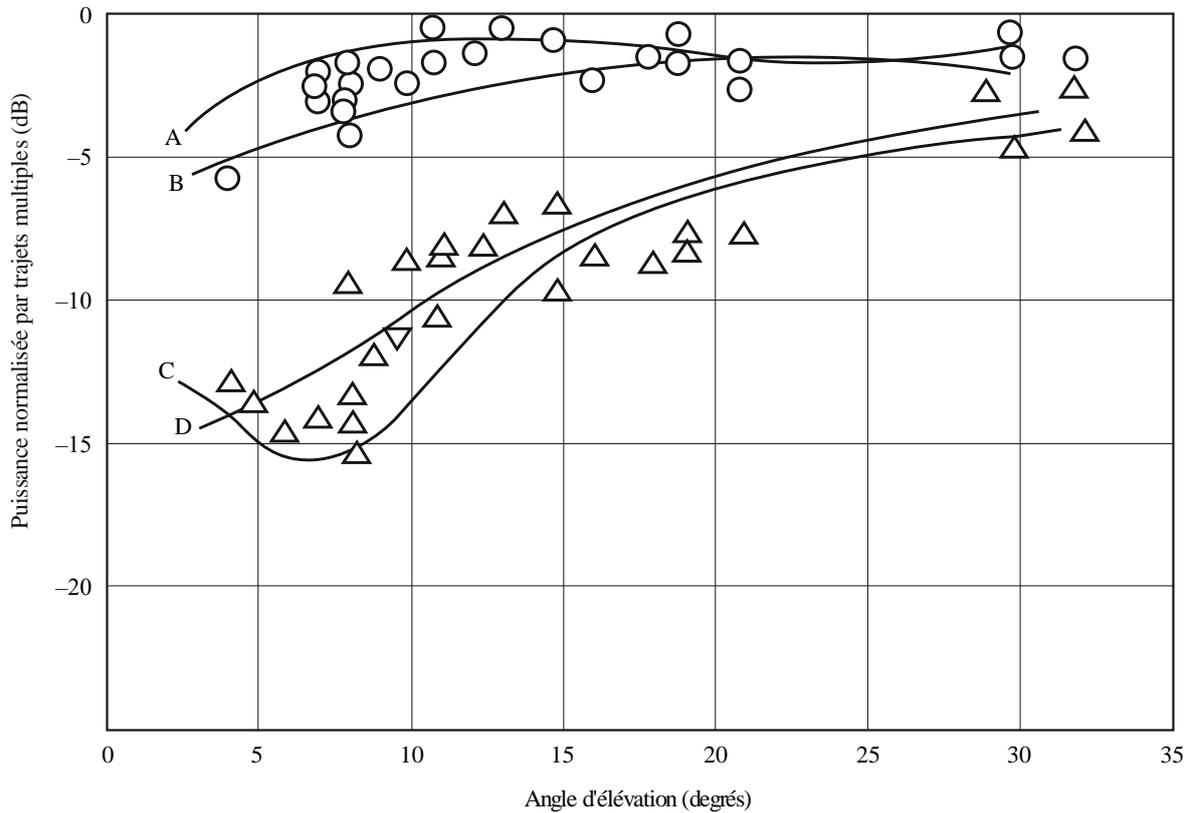
⁽¹⁾ Bilatéral(e).

⁽²⁾ Monolatéral(e).

⁽³⁾ Données obtenues à partir du modèle de trajets multiples pour des altitudes de vol de 10 km et des vitesses de 1 000 km/h.

Dans la Fig. 4, la puissance normalisée par trajets multiples pour les polarisations d'antenne horizontale et verticale et par mer calme et agitée est donnée en fonction de l'angle d'élévation, de même que les prévisions obtenues à partir d'un modèle optique physique. L'état de la mer a moins d'importance aux angles d'élévation supérieurs à 10 degrés environ. La concordance entre les valeurs mesurées et celles prévues pour une Terre plate et lisse, corrigées par le coefficient de divergence dû à la sphéricité terrestre, augmente à mesure que la mer se calme.

FIGURE 4
**Puissance normalisée par trajets multiples au-dessus de l'océan
 en fonction de l'angle d'élévation à 1,6 GHz**



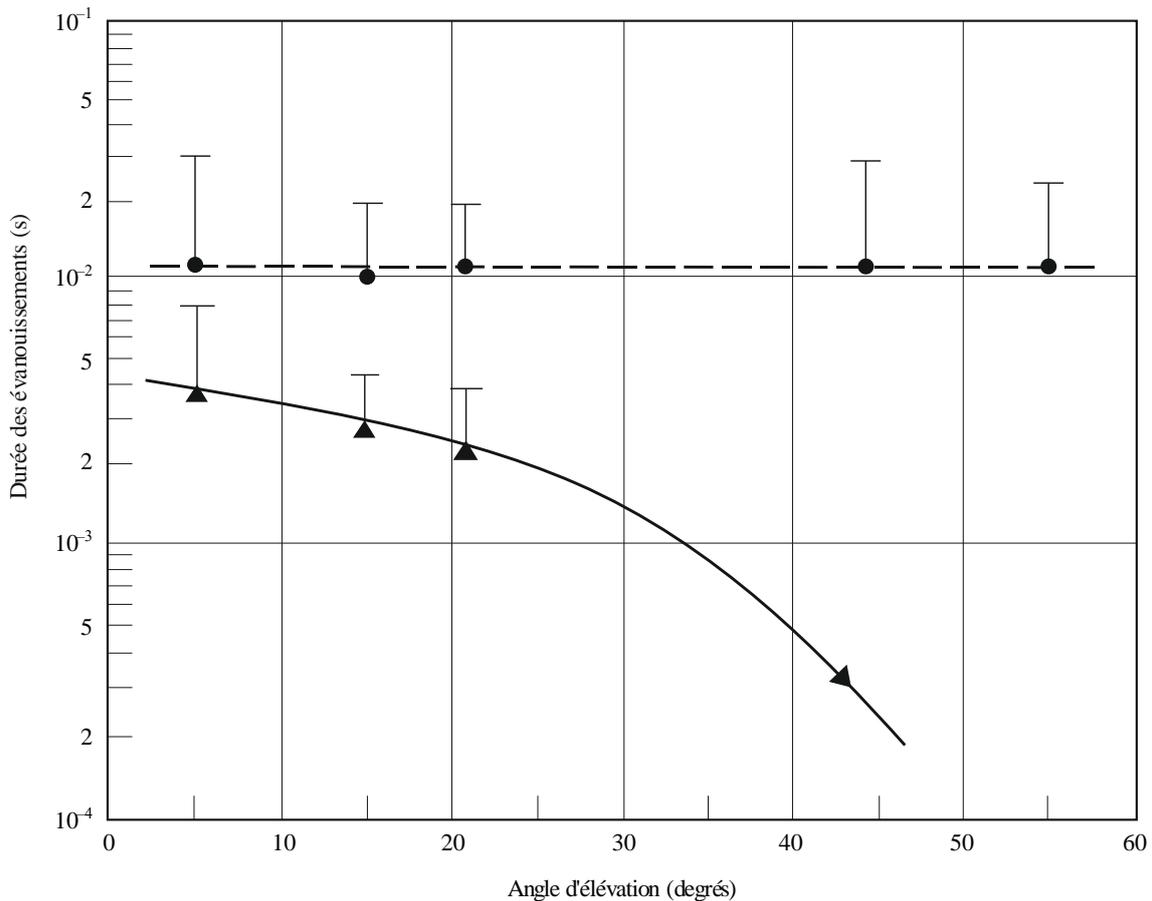
- O : mesures avec polarisation horizontale
- Δ : mesures avec polarisation verticale
- Courbes A : prévision avec polarisation horizontale, mer calme
- B : prévision avec polarisation horizontale, mer agitée
- C : prévision avec polarisation verticale, mer calme
- D : prévision avec polarisation verticale, mer agitée

P0682-0 4

Les données relatives à la propagation par trajets multiples ont été obtenues par une série de mesures effectuées dans le service mobile aéronautique par satellite au-dessus de l'océan Atlantique et de certaines parties de l'Europe. La Fig. 5 indique les valeurs moyennes mesurées ainsi que les écarts types des durées d'évanouissement à 1,6 GHz en fonction de l'angle d'élévation pour de tels vols (on a utilisé à cet effet une antenne à doublets croisés ayant un gain de 3,5 dBi; l'aéronef volait à une altitude nominale de 10 km et à une vitesse nominale par rapport au sol de 700 km/h).

FIGURE 5

Durée des évanouissements en fonction de l'angle d'élévation pour une polarisation circulaire à 1,6 GHz (gain d'antenne = 3,5 dBi); données obtenues au-dessus de l'Atlantique et de l'Europe occidentale



- : Moyenne avec seuil de 0 dB
- ▲: Moyenne avec seuil de -5 dB
- T: Écart type ajouté

P.0682-0 5

4.4 Mesure des effets des trajets multiples dus à la réflexion sur la terre

Le Tableau 2 regroupe des paramètres de propagation par trajets multiples mesurés au cours de vols au-dessus de la terre; les définitions des paramètres sont identiques à celles qui s'appliquent au Tableau 1. Les signaux se propageant par trajets multiples au-dessus de la terre sont très variables. Aucune influence systématique de l'angle d'élévation n'a été établie, peut-être en raison de la nature très variable du terrain (sols humides et secs, marais, neige sèche et mouillée, glace, lacs, etc.).

NOTE 1 – Taux d'erreur irréductible; les évanouissements dus aux trajets multiples dans les canaux mobiles donnent lieu à un taux d'erreur irréductible qu'on ne peut compenser par des augmentations de la puissance du signal direct. Des simulations font apparaître que le taux d'erreur irréductible est plus élevé pour un canal mobile aérien par satellite que pour un canal mobile terrestre par satellite.

TABLEAU 2

Paramètres relatifs à la propagation par trajets multiples au-dessus de la terre

Paramètre	Gamme mesurée	Valeur typique
Puissance normalisée des trajets multiples (dB)		
Polarisation horizontale	-18 à 2	-9
Polarisation verticale	-21 à -3	-13
Étalement des retards de propagation ⁽¹⁾ (µs)		
Valeur à 3 dB	0,1-1,2	0,3
Valeur à 10 dB	0,2-3	1,2
Largeur de bande de corrélation ⁽²⁾ (kHz)		
Valeur à 3 dB	150-3 000	600
Étalement par effet Doppler ⁽¹⁾ (Hz)		
Valeur à 3 dB	20-140	60
Valeur à 10 dB	40-500	200
Temps de décorrélation ⁽²⁾ (ms)		
Valeur à 3 dB	1-10	4

⁽¹⁾ Bilatéral(e).

⁽²⁾ Monolatéral(e).

4.5 Modèle de propagation par trajets multiples pour les avions pendant la phase d'approche au-dessus du sol et pendant l'atterrissage

En ce qui concerne les systèmes de communication et de navigation aéronautiques, il importe de tenir compte des faibles décalages des temps d'arrivée dus à la propagation par trajets multiples, en particulier pour les signaux à large bande. Les réflexions sur la structure de l'avion produisent des dégradations importantes. Les réflexions par le sol et les réflexions par le fuselage entraînent d'importants phénomènes de propagation, en particulier pendant l'approche finale, lorsque la disponibilité et la fiabilité des communications ainsi que la précision et l'intégrité de la navigation sont essentielles.

Même s'il est destiné principalement aux applications de navigation, ce modèle peut évidemment être utilisé avec tout type de signal satellite. Toutefois, compte tenu de son utilisation première, l'antenne est censée se trouver au-dessus du cockpit (où est généralement située une antenne de navigation). Le modèle complet doit servir de simulateur statistique. Étant donné que les largeurs de bande observées des réflexions sont très étroites, on n'obtiendra pas suffisamment de données statistiques pendant la durée de l'approche, qui est de 200 s. Pour simuler une erreur de navigation valable d'un point de vue statistique, on doit appliquer le modèle à un grand nombre d'approches. Pour obtenir l'erreur de navigation minimale, maximale et moyenne, il faut établir la moyenne des résultats de simulation de ces approches.

Une mise en œuvre logicielle du modèle est disponible dans la partie du site web de l'UIT-R consacrée à la Commission d'études 3 des radiocommunications.

4.5.1 Effets physiques

Les conditions de propagation par trajets multiples pour un aéronef se répartissent selon deux critères principaux:

- la structure de l'aéronef; et
- la réflexion par le sol.

Les importantes réflexions que subit la structure de l'aéronef concernent uniquement le fuselage (lorsque l'antenne est installée au-dessus du cockpit). Ces signaux réfléchis avec un faible décalage des instants d'arrivée varient peu dans le temps et sont dominants sur le canal.

On n'a pas observé une forte réflexion par les ailes (lorsque l'antenne est montée au-dessus du cockpit).

La réflexion par le sol varie fortement dans le temps et est décalée par effet Doppler en fonction de la vitesse de descente de l'aéronef.

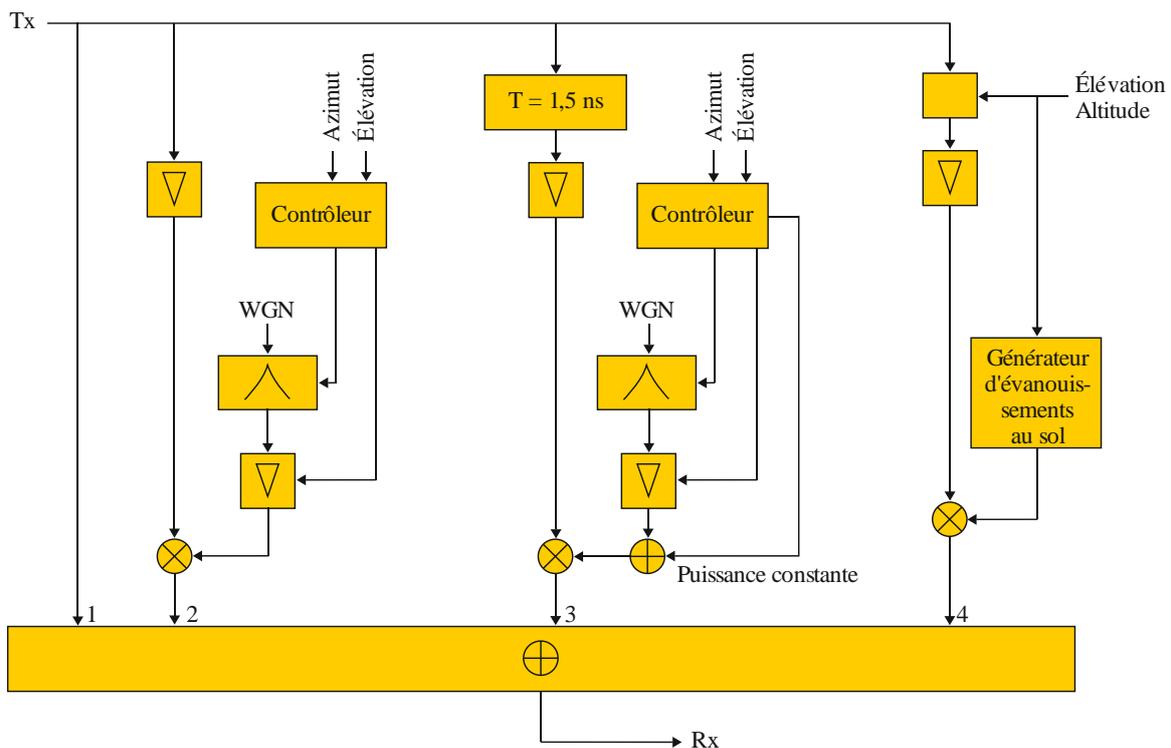
4.5.2 Gamme de fréquences applicables

Le modèle est utilisable pour des fréquences comprises entre 1 GHz et 3 GHz. L'azimut du satellite peut varier entre 10 et 170 degrés, ou entre 190 et 350 degrés. L'angle d'élévation par rapport au satellite peut varier entre 10 et 75 degrés.

4.5.3 Modèle

4.5.3.1 Vue d'ensemble

FIGURE 6
Modèle complet de canal aéronautique



La Fig. 6 représente le modèle aéronautique complet pour l'approche finale. La première branche représente le signal direct (branche 1), suivi de la partie du signal présentant un évanouissement plat qui modélise la modulation en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) (branche 2). La troisième branche (branche 3) représente le processus d'évanouissement par trajets multiples des signaux réfléchis par le fuselage, qui est retardé de 1,5 ns. La dernière branche (branche 4) représente l'écho au sol, dont le temps de propagation dépend de l'élévation et de l'altitude.

Les paramètres d'entrée variables dans le temps de ce modèle sont les suivants:

- l'azimut du satellite, $\varphi(t)$
- l'élévation du satellite, $\theta(t)$
- l'altitude de l'aéronef (au-dessus du sol), $h(t)$, où t désigne le temps.

Le modèle nécessite en outre les données relatives à la géométrie de l'aéronef et à la dynamique de vol. Des coefficients empiriques sont présentés pour les types d'aéronefs suivants:

- Vereinigte Flugzeugwerke VFW 614 (ATTAS), représentant un petit jet
- Airbus A 340, représentant un grand jet commercial.

La dépendance des évanouissements par trajets multiples en fonction de l'azimut et de l'élévation unité «contrôleur» dans le schéma ci-dessus, est prise en considération par la fonction polynomiale de l'équation (10). Le temps de propagation dû à la réflexion par le sol dépend en outre de l'élévation et de l'altitude; voir l'équation (16).

Les évanouissements et les blocs variables dans le temps ont des paramètres d'entrée permettant d'adapter le modèle à différentes positions du satellite (élévation et azimut). Les évanouissements sont fortement dépendants du type d'aéronef.

TABLEAU 3

Paramètres du modèle de canal – Vue d'ensemble

	Temps de propagation (ns)	Puissance relative (dB)	Largeur de bande Doppler (Hz)
LoS Composante continue Processus d'évanouissement	0	0 (-14,2 – moyenne)	0 < 0,1
Fuselage Composante continue Processus d'évanouissement	1,5	-14,2 (-14,2 – moyenne)	< 0,1
Sol	900-10 (dans le sens descendant)	-15 à -25	< 20 (selon la vitesse de descente)

4.5.3.2 Trajet direct

Mis à part le signal LoS (branche 1), ce trajet subit une forte modulation (branche 2), qui présente une distribution d'amplitude de Rice. Ce processus d'évanouissement est représenté par les équations (8), (9), (10) et (11).

4.5.3.3 Réflexions par les ailes

Si l'antenne est placée au-dessus du cockpit (ce qui est obligatoire pour les antennes de navigation par satellite), le signal entrant est dispersé selon une large gamme de valeurs angulaires. La puissance totale des réflexions par les ailes est par conséquent négligeable (inférieure à -35 dB).

Pour les antennes situées à d'autres emplacements (par exemple, pour les systèmes de communication), en particulier pour celles placées entre les ailes, une réflexion par les ailes est possible.

4.5.3.4 Réflexions par le fuselage

Pour générer une série chronologique des valeurs des signaux réfléchis par le fuselage, il est essentiel de connaître la densité spectrale de puissance de ces signaux. Le modèle utilisé repose sur un processus stochastique, p_{proc} . On peut procéder par filtrage du bruit blanc complexe, la densité spectrale de puissance étant donnée dans l'équation (8), où b_2 et b_3 sont les coefficients du processus exponentiel:

$$p_{proc}(\text{dB}) = b_1 + b_2 \cdot e^{b_3|f|} \quad (8)$$

Outre cette composante de bruit, le signal réfléchi par le fuselage contient une composante moyenne (continue) de $-14,2$ dB, et la constante b_1 a été déterminée comme étant:

$$b_1 = 14,2 - \text{moyenne} \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

Comme il a été indiqué auparavant, les valeurs valables de l'angle d'élévation sur le trajet sont comprises entre 10 et 75 degrés. En conséquence, l'azimut peut être compris respectivement entre 15 et 165 degrés et entre 195 et 335 degrés.

Pour calculer la *moyenne* ainsi que les coefficients b_2 et b_3 , une fonction polynomiale à 2 dimensions du quatrième ordre est donnée pour chaque paramètre (*moyenne*, b_2 , b_3). Par exemple,

$$\text{moyenne}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \theta^4 & \theta^3 & \theta^2 & \theta & 1 \end{bmatrix} \cdot A_{\text{moyenne}} \cdot \begin{bmatrix} \varphi^4 \\ \varphi^3 \\ \varphi^2 \\ \varphi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

donne la valeur moyenne en fonction de l'élévation θ et de l'azimut φ , où A_{moyenne} est une matrice 5×5 de coefficients polynomiaux. On calcule les coefficients b_2 et b_3 de la même façon.

Pour les deux exemples d'aéronefs (ATTAS et A340), ces matrices sont données respectivement par:

$$A_{media,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,0057e-12 & 5,0499e-10 & -4,6114e-8 & 1,8053e-6 & -2,4773e-5 \\ 2,8598e-10 & -7,4259e-8 & 7,0553e-6 & -2,9116e-4 & 0,0043 \\ -1,1568e-8 & 3,2474e-6 & -3,3846e-4 & 0,0156 & -0,2698 \\ 3,8681e-8 & -2,2536e-5 & 0,0038 & -0,2512 & 6,3140 \\ 1,9434e-6 & -3,5747e-4 & 0,0133 & 0,8133 & -28,1329 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,8398e-12 & 4,2182e-10 & -3,3813e-8 & 1,0855e-6 & -1,0875e-5 \\ 2,6665e-10 & -6,0897e-8 & 4,8490e-8 & -1,5346e-4 & 0,0015 \\ -1,2870e-8 & 2,9171e-6 & -2,2947e-4 & 0,0071 & -0,0629 \\ 2,3542e-7 & -5,2520e-5 & 0,0040 & -0,1193 & 0,9153 \\ 1,2058e-6 & 2,5797e-4 & -0,0187 & 0,5027 & -4,1128 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,9148e-11 & 8,8672e-9 & -7,0048e-7 & 2,2069e-5 & -2,1492e-4 \\ 6,0699e-9 & -1,3708e-6 & 1,0784e-4 & -0,0034 & 0,0322 \\ -3,2203e-7 & 7,2344e-5 & -0,0057 & 0,1747 & -1,6206 \\ 6,7649e-6 & -0,0015 & 0,1162 & -3,5328 & 31,6814 \\ -4,4741e-5 & 0,0098 & -0,7383 & 21,9981 & -142,3524 \end{bmatrix}$$

(11)

$$A_{media,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,6220e-12 & 6,0886e-10 & -5,0686e-8 & 1,8074e-6 & -2,3633e-5 \\ 4,3848e-10 & -1,0231e-7 & 8,6113e-6 & -3,1465e-4 & 0,0044 \\ -2,3577e-8 & 5,5538e-6 & -4,7815e-4 & 0,0184 & -0,2872 \\ 3,9552e-7 & -9,2657e-5 & 0,0082 & -0,3431 & 6,9937 \\ -1,5225e-6 & 3,3690e-4 & -0,0312 & 1,7110 & -32,8066 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,2021e-12 & 2,7780e-10 & -2,2626e-8 & 7,4413e-7 & -7,5120e-6 \\ 1,7647e-10 & -4,0725e-8 & 3,3131e-6 & -1,0855e-4 & 0,0011 \\ -8,6470e-9 & 1,9871e-6 & -1,6099e-4 & 0,0052 & -0,0488 \\ 1,6123e-7 & -3,6656e-5 & 0,0029 & -0,0946 & 0,8204 \\ -8,5647e-7 & 1,8942e-4 & -0,0149 & 0,4826 & -5,5011 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,1880e-11 & 7,2724e-9 & -5,8454e-7 & 1,9069e-5 & -1,9707e-4 \\ 4,7229e-9 & -1,0775e-6 & 8,6761e-5 & -0,0028 & 0,0293 \\ -2,3471e-7 & 5,3437e-5 & -0,0043 & 0,1413 & -1,4541 \\ 4,4756e-6 & -0,0010 & 0,0812 & -2,6731 & 27,5448 \\ -2,5361e-5 & 0,0056 & -0,4459 & 14,8917 & -109,1083 \end{bmatrix}$$

4.5.3.5 Réflexions par le sol

La réflexion par le sol est décalée par effet Doppler par la vitesse de descente de l'aéronef (vitesse verticale), $v_{vert}(t)$. Son effet Doppler est donné par la formule:

$$f_{sol}(t) = \frac{v_{vert}(t)}{\lambda} \quad (12)$$

où λ désigne la longueur d'onde. Au voisinage de la fréquence moyenne, donnée dans l'équation (12), le spectre Doppler de la réflexion par le sol est bien représenté par la distribution normale gaussienne:

$$P_{Gr(\text{dB})} = P_{g(\text{dB})} + 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (13)$$

P_g désigne la puissance de la réflexion par le sol donnée par le modèle de Markov, la valeur de la déviation obtenue expérimentalement étant de:

$$\sigma = 2,92 \text{ Hz} \quad (14)$$

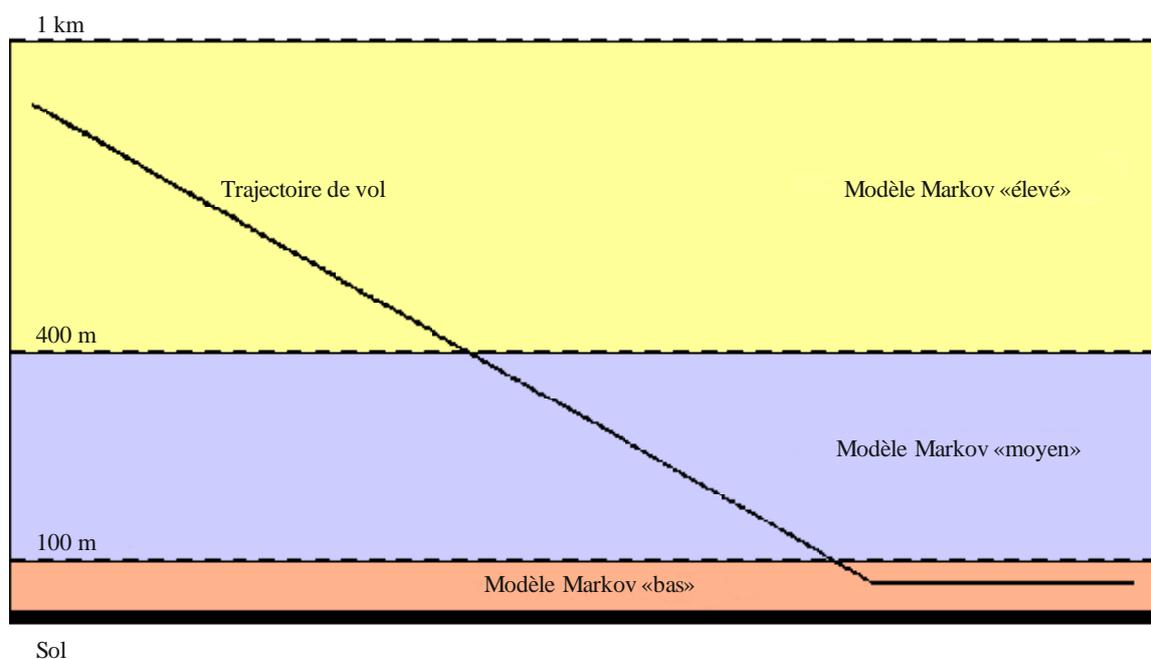
Pour modéliser la réflexion par le sol, on subdivise l'approche finale en trois sections d'altitude différentes (altitudes haute, moyenne et basse). Dans chaque section, la réflexion par le sol est caractérisée par un modèle à états de Markov.

TABLEAU 4

Sections d'altitude pour le modèle de Markov

	Entre (m)	et (m)
Niveau «élevé»	1 000	400
Niveau «moyen»	400	100
Niveau «bas»	100	0

FIGURE 7
Sections d'altitude selon le modèle de réflexion par le sol



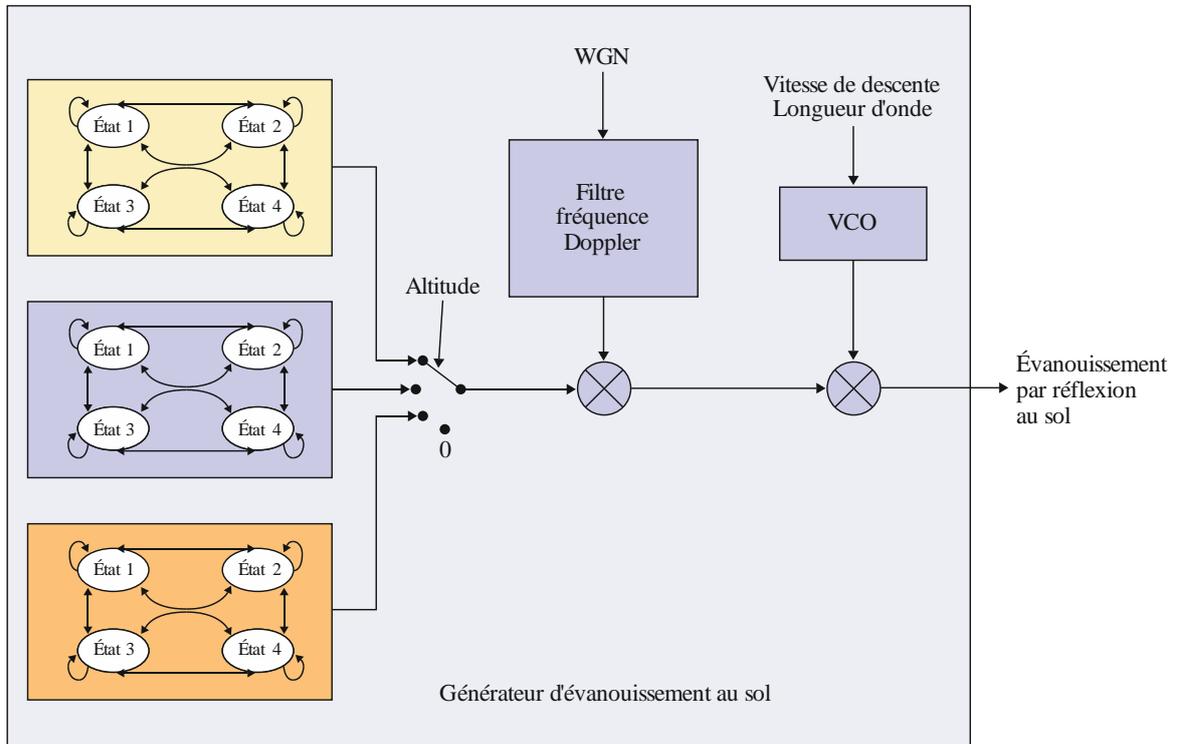
P.0682-0 7

TABLEAU 5
Évanouissements au sol:
états du modèle de Markov

État	Puissance (dB)
1 ⁽¹⁾	< -25
2	-23
3	-19
4	-15

⁽¹⁾ Aucune réflexion par le sol.

FIGURE 8
Réalisation du générateur d'évanouissements au sol



P.0682-0 8

On obtient les probabilités de transition de Markov à partir des données de mesure quantifiées. On détermine indépendamment pour chaque section d'altitude la matrice de transition P , où $P_{x,y}$ est la probabilité de passage de l'état x à l'état y .

L'évanouissement au sol est généré au moyen d'un modèle de Markov dépendant de l'altitude pour une fréquence d'échantillonnage de 25,4 Hz. À noter que ces probabilités de transition ne sont valables que pour cette fréquence. Les altitudes de transition sont données dans le Tableau 4 et illustrées dans la Fig. 7.

Les états de puissance de sortie du modèle sont représentés dans le Tableau 5 et illustrés dans la Fig. 8.

À partir des mesures relevées, on a obtenu les matrices de probabilité de transition ci-après:

$$P_{400-1500} = \begin{bmatrix} 0,9866 & 0,0087 & 0,0047 & 0 \\ 0,6087 & 0,3043 & 0,0870 & 0 \\ 0,2143 & 0,3571 & 0,4286 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{100-400} = \begin{bmatrix} 0,9842 & 0,0130 & 0,0028 & 0 \\ 0,6667 & 0,2222 & 0,0889 & 0,0222 \\ 0,0667 & 0,1167 & 0,5000 & 0,3166 \\ 0 & 0 & 0,3279 & 0,6721 \end{bmatrix}$$

(15)

$$P_{10-100} = \begin{bmatrix} 0,9645 & 0,0310 & 0,0045 & 0 \\ 0,7308 & 0,1538 & 0,1154 & 0 \\ 0,6250 & 0,1250 & 0,2500 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{0-10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

où P_{x-y} désigne la probabilité de transition dans la section d'altitude $h(t) \geq x$ et $h(t) < y$.

À noter que ce modèle de Markov décrit un atterrissage à l'aéroport de Graz en Autriche. Cette région est dominée par des forêts, des prairies et des routes isolées. Les conditions météorologiques, l'environnement, la géométrie du vol et de nombreux autres paramètres peuvent avoir une incidence sur les caractéristiques de l'écho au sol. L'utilisateur doit par conséquent adapter les valeurs de ces paramètres dans le cas d'un autre type de région. En particulier, une approche au-dessus d'une étendue d'eau salée ou d'une zone comprenant un grand nombre de canaux devrait présenter un comportement relativement différent.

On peut calculer facilement le temps de propagation dû à la réflexion par le sol en fonction de l'angle d'élévation du trajet, en considérant un environnement plat autour de l'aéroport, de la façon suivante:

$$\tau_{sol}(t) = \frac{2 \cdot h(t) \cdot \sin(\theta)}{c} \quad (16)$$

où:

- c : vitesse de la lumière
- $h(t)$: altitude de l'aéronef
- θ : angle d'élévation.
