

RECOMMANDATION UIT-R P.1623-1

**Méthode de prévision de la dynamique des évanouissements
sur les trajets Terre vers espace**

(Question UIT-R 201/3)

(2003-2005)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que pour divers services de radiocommunication, il faut obtenir des renseignements sur la dynamique des événements d'interruption pour satisfaire à certains objectifs nominaux;
- b) que, pour évaluer les paramètres associés au risque de panne qui sont nécessaires pour assurer une certaine qualité et fiabilité du service, il faut connaître la probabilité d'occurrence des évanouissements en fonction de leur durée;
- c) que, pour évaluer les paramètres internes d'une boucle de commande de la technique de réduction des évanouissements (FMT, *fade mitigation technique*) (qui est utilisée pour améliorer la qualité et la fiabilité du service), il faut connaître la probabilité d'occurrence de la pente d'évanouissement correspondant à un seuil d'affaiblissement donné;
- d) qu'il est nécessaire de fournir des renseignements d'ingénierie pour le calcul des statistiques de la durée des évanouissements, de l'intervalle inter-évanouissements et de la pente des évanouissements,

recommande

- 1 d'appliquer les méthodes décrites au § 2.2 de l'Annexe 1 pour calculer les statistiques de la durée des évanouissements dus aux effets combinés de l'affaiblissement (gaz, nuages et pluie) et de la scintillation sur les trajets Terre vers espace;
- 2 d'appliquer les méthodes décrites au § 3.2 de l'Annexe 1 pour calculer les statistiques de la pente des évanouissements dus à l'affaiblissement sur les trajets Terre vers espace.

Annexe 1**1 Introduction**

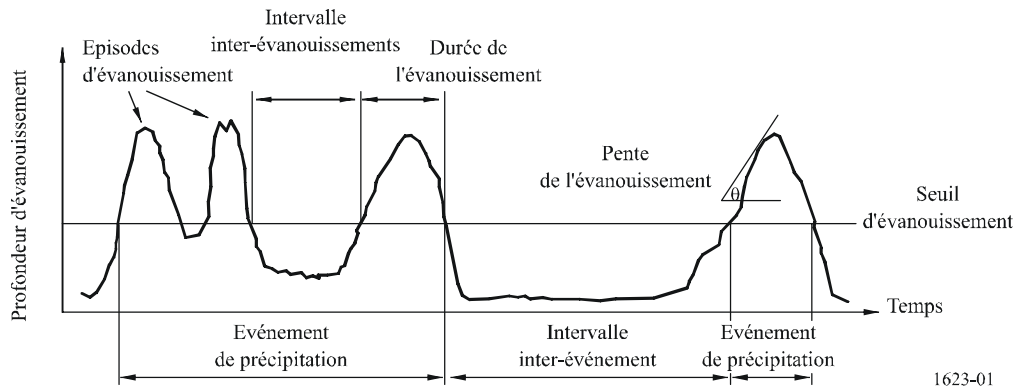
Lorsqu'on conçoit divers systèmes de télécommunication, les caractéristiques dynamiques des évanouissements dus à la propagation atmosphérique sont importantes pour optimiser la capacité du système et satisfaire aux critères de qualité et de fiabilité. On peut citer à titre d'exemple les réseaux fixes comprenant un segment spatial et les systèmes qui utilisent des FMT ou de partage des ressources.

Plusieurs échelles de temps peuvent être définies et il est utile d'obtenir des renseignements statistiques sur la pente d'évanouissement, la durée des évanouissements et l'intervalle inter-évanouissements pour un niveau d'affaiblissement donné (voir la Fig. 1).

On définit la durée des évanouissements comme étant l'intervalle de temps pendant lequel l'affaiblissement dépasse un seuil donné, l'intervalle inter-évanouissements étant l'intervalle de temps pendant lequel l'affaiblissement est inférieur à ce même seuil. La pente d'évanouissement correspond à la vitesse de l'affaiblissement en fonction du temps.

FIGURE 1

Caractéristiques de la dynamique des évanouissements



La distinction entre les évanouissements de durée inférieure ou supérieure à 10 s présente un intérêt particulier dans le contexte des critères de disponibilité. Par ailleurs, il est indispensable de connaître la distribution des durées d'évanouissement en fonction de la profondeur d'évanouissement pour pouvoir appliquer les concepts de prévision des risques à la fourniture de services de télécommunication.

En outre, il est essentiel de disposer de données sur la pente d'évanouissement prévue pour évaluer la vitesse de poursuite minimale que doit avoir un système de réduction des évanouissements.

2 Durée des évanouissements et des intervalles inter-évanouissements

2.1 Prescriptions relatives à la durée des évanouissements

La durée des évanouissements est un paramètre important dont il faut tenir compte lors de la conception d'un système, et ce pour plusieurs raisons:

- interruptions et indisponibilité du système: les statistiques sur la durée des évanouissements donnent des indications sur le nombre et la durée des interruptions et sur l'indisponibilité du système résultant de la propagation sur une liaison et pour un service donné;
- partage des ressources du système: il est important, pour un opérateur, d'avoir une idée de la durée statistique d'un événement afin d'attribuer la ressource à d'autres utilisateurs;
- FMT: la durée des évanouissements est importante pour définir la durée statistique de maintien d'un système en mode de compensation avant son retour en mode nominal;
- codage et modulation du système: la durée des évanouissements est un paramètre clé dans le choix des codes de correction d'erreur directe et du système de modulation le mieux adapté. Dans le cas d'un système de télécommunication par satellite, le canal de propagation ne génère pas des erreurs indépendantes, mais des blocs d'erreurs. La durée des évanouissements influence directement sur le choix du système de codage (taille du mot de code des codes complets, entrelacement des codes concaténés, etc.).

2.2 Méthode de prévision de la durée des évanouissements

Deux fonctions de distribution cumulative permettent de décrire la durée des évanouissements:

- 1 $P(d > D | a > A)$: probabilité d'occurrence d'évanouissements de durée d supérieure à D (s), pour un affaiblissement a supérieur à A (dB). On peut estimer cette probabilité en utilisant le rapport entre le nombre d'évanouissements de durée supérieure à D et le nombre total d'évanouissements observés d'affaiblissement supérieur au seuil A .

- 2 $F(d > D|a > A)$: probabilité cumulative de dépassement, ou encore fraction totale (entre 0 et 1) du temps d'évanouissement consécutif à des durées d'évanouissement d supérieures à D (s), lorsque l'affaiblissement a est supérieur à A (dB). On peut estimer cette probabilité à partir du rapport entre le temps d'évanouissement total consécutif à des durées d'évanouissement supérieures à D lorsqu'il y a dépassement du seuil A et le laps de temps total pendant lequel le seuil est dépassé.

Pour une période de référence donnée, on estime le nombre d'évanouissements d'une durée supérieure à D en multipliant la probabilité d'occurrence $P(d > D|a > A)$ par le nombre total d'évanouissements dépassant le seuil $N_{tot}(A)$. De même, on estime la durée totale de dépassement résultant d'évanouissements de durée supérieure à D en multipliant la fraction de temps $F(d > D|a > A)$ par le laps de temps total pendant lequel le seuil est dépassé, $T_{tot}(A)$.

Le modèle à deux composantes présenté ici comprend une fonction de distribution log-normale pour les évanouissements de longue durée et une fonction de distribution assimilable à une loi en puissance pour les évanouissements de courte durée. La limite entre ces deux types d'évanouissements est donnée par la durée de seuil D_t calculée pour ce modèle. Le modèle de loi en puissance s'applique aux durées d'évanouissement supérieures à 1 s. La contribution des évanouissements de plus courte durée au temps total d'interruption est négligeable.

On trouvera ci-après une estimation des paramètres à définir pour le modèle et une définition du modèle à deux composantes pour les deux fonctions de distribution, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence P et la probabilité de dépassement (ou fraction du temps) F .

Ce modèle s'applique en principe à des durées d'évanouissement supérieures à 1 s.

Ses paramètres d'entrée sont les suivants:

- f : fréquence (GHz): 10-50 GHz
 φ : angle d'élévation (degrés): 5°-60°
 A : seuil d'affaiblissement (dB).

Le calcul pas à pas de la distribution des durées d'évanouissements se fait de la façon suivante:

Etape 1: La durée moyenne D_0 de la distribution log-normale de la fraction du temps d'évanouissement consécutif à des évanouissements de longue durée, lorsque l'affaiblissement est supérieur à A est donnée par la formule suivante:

$$D_0 = 80 \varphi^{-0,4} f^{1,4} A^{-0,39} \quad \text{s} \quad (1)$$

Etape 2: L'écart type σ de la distribution log-normale de la fraction du temps d'évanouissement consécutif à des évanouissements de longue durée, est exprimé par la formule suivante:

$$\sigma = 1,85 f^{-0,05} A^{-0,027} \quad (2)$$

Etape 3: L'exposant γ de la distribution assimilable à une loi en puissance de la fraction du temps d'évanouissement consécutif à des évanouissements de courte durée est donné par la formule suivante:

$$\gamma = 0,055 f^{0,65} A^{-0,003} \quad (3)$$

Etape 4: La limite D_t entre les évanouissements de courte durée et les évanouissements de longue durée est donnée par la formule:

$$D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 + p_2 \sigma - 0,39} \quad \text{s} \quad (4)$$

où:

$$p_1 = 0,885\gamma - 0,814 \quad (5)$$

$$p_2 = -1,05\gamma^2 + 2,23\gamma - 1,61 \quad (6)$$

Etape 5: La durée moyenne D_2 de la distribution log-normale de la probabilité d'occurrence d'évanouissements de longue durée est donnée par la formule:

$$D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2} \quad s \quad (7)$$

Etape 6: La fraction de temps k résultant d'affaiblissements de durée inférieure à D_t est exprimée par la formule:

$$k = \left[1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2} (1 - \gamma) Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1} \quad (8)$$

où:

Q : fonction de distribution cumulative type d'une variable à distribution normale:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (9)$$

Etape 7: La probabilité d'occurrence d'un évanouissement de durée d supérieure à D pour un affaiblissement a supérieur à A est donnée par la formule:

$$\text{Pour } 1 \leq D \leq D_t \quad P(d > D | a > A) = D^{-\gamma} \quad (10)$$

$$\text{Pour } D > D_t \quad P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \quad (11)$$

Etape 8: La probabilité cumulative de dépassement, c'est-à-dire la fraction totale du temps d'évanouissement consécutive à des évanouissements de durée d supérieure à D est exprimée par la formule:

$$\text{Pour } 1 \leq D \leq D_t \quad F(d > D | a > A) = \left[1 - k \left(\frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (12)$$

$$\text{Pour } D > D_t \quad F(d > D | a > A) = (1 - k) \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)} \quad (13)$$

Etape 9: Le cas échéant, on peut calculer le nombre total d'évanouissements de durée d supérieure à D pour un seuil A donné, à l'aide de la formule suivante:

$$N(D, A) = P(d > D | a > A) \times N_{tot}(A) \quad (14)$$

De même, le temps total d'évanouissement résultant d'évanouissements de durée d supérieure à D pour le seuil A est donné par la formule suivante:

$$T(d > D | a > A) = F(d > D | a > A) \times T_{tot}(A) \quad \text{s} \quad (15)$$

pour la période de référence considérée, où $T_{tot}(A)$ est le laps de temps total pendant lequel le seuil A est dépassé et $N_{tot}(A)$ est le nombre total d'évanouissements dont la durée dépasse la durée minimale de 1 s. On obtient ces paramètres de la façon suivante:

$T_{tot}(A)$ doit être obtenu à partir de données locales. Si des données statistiques à long terme ne sont pas disponibles, on peut faire une estimation d'après la Recommandation UIT-R P.618. En pareil cas, la procédure consiste à calculer la fonction de distribution cumulative de l'affaiblissement total et le pourcentage de temps pendant lequel le seuil d'affaiblissement A considéré est dépassé, ainsi que la durée totale de dépassement associée $T_{tot}(A)$, pour la période de référence considérée.

Une fois obtenue la valeur de $T_{tot}(A)$, on calcule $N_{tot}(A)$ comme suit:

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1 - \gamma}{D_t^{1 - \gamma}} \quad (16)$$

Cette méthode a été testée par rapport à la banque de données sur les durées d'évanouissement de la Commission d'études 3 des radiocommunications aux fréquences comprises entre 11 et 50 GHz pour des angles d'élévation compris entre 6° et 60°. On a obtenu une moyenne arithmétique de l'erreur logarithmique (rapport entre la durée d'évanouissement prévue et la durée d'évanouissement mesurée pour un même niveau de probabilité) de 30% pour les durées d'évanouissement inférieures à 10 s et une moyenne comprise entre -25% et -80% pour les durées d'évanouissement supérieures à 10 s. On a constaté que l'écart type variait entre 80% et 150%, ce qui atteste de la forte variabilité naturelle de ce paramètre.

2.3 Intervalles inter-évanouissements

En plus des statistiques sur la durée des évanouissements, il est également utile de caractériser l'intervalle de temps séparant deux évanouissements consécutifs, appelé intervalle inter-évanouissements. Lorsque le niveau du signal reçu devient inférieur au seuil marginal à la suite d'une interruption, il est essentiel pour l'opérateur de savoir, au sens statistique, quand se produira la prochaine interruption.

Les résultats expérimentaux montrent que les intervalles inter-évanouissements peuvent suivre une distribution statistique log-normale. Néanmoins, les intervalles inter-évanouissements de courte durée dus aux scintillations troposphériques devraient suivre une distribution assimilable à une loi en puissance, comme pour les évanouissements de courte durée.

3 Pente d'évanouissement

3.1 Renseignements à obtenir concernant la pente d'évanouissement

Il est important de pouvoir quantifier la pente d'évanouissement pour les systèmes de télécommunication par satellite susceptibles d'utiliser des techniques de réduction des évanouissements. Il est utile de connaître la pente d'évanouissement du signal reçu pour concevoir

une boucle de commande capable de suivre les variations de ce signal, ou de permettre une meilleure prévision à court terme des conditions de propagation. Dans les deux cas, l'information à obtenir est la pente de la composante à variation lente du signal, ce qui suppose le filtrage de la scintillation et des variations rapides de l'affaiblissement dû à la pluie.

3.2 Méthode de prévision de la pente d'évanouissement

La distribution de probabilité de la pente d'évanouissement dépend de paramètres climatiques, de la distribution de la dimension des gouttes et, par conséquent, du type de pluie. La vitesse horizontale du vent perpendiculaire au trajet est un autre paramètre climatique important qui détermine la vitesse à laquelle le profil horizontal de pluie traverse le trajet de propagation. Par ailleurs, il est à prévoir que la pente d'évanouissement pour un niveau d'affaiblissement donné diminuera avec l'augmentation de la longueur de trajet, en raison de l'effet de lissage dû à la sommation des différentes contributions de pluie et que, par conséquent, la pente augmentera à mesure que l'angle d'élévation sur un trajet Terre vers espace augmente.

De plus, les paramètres dynamiques (ou constantes de temps) du système de réception ont une incidence sur la pente d'évanouissement mesurée. Si on augmente le temps d'intégration d'un récepteur, les variations instantanées des évanouissements diminuent et se répartissent sur une durée plus longue.

La distribution prévue de la pente d'évanouissement dépend du niveau d'affaiblissement $A(t)$ et de la longueur de l'intervalle de temps Δt . Elle dépend également de la fréquence de coupure à 3 dB du filtre passe-bas utilisée pour éliminer du signal les scintillations troposphériques et les variations rapides de l'affaiblissement dû à la pluie. Les résultats expérimentaux montrent qu'une fréquence de coupure à 3 dB de 0,02 Hz permet de filtrer correctement les scintillations et les variations rapides de l'affaiblissement dû à la pluie. En l'absence de filtrage, le signal présentera de fortes fluctuations et le modèle ne permettra de prévoir que les fluctuations consécutives à l'affaiblissement dû à la pluie. En pareil cas, la fréquence de coupure requise en entrée est la fréquence d'échantillonnage.

Dans le modèle, la pente d'évanouissement ζ à un instant donné est définie à partir des données filtrées au moyen de la formule suivante:

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2} \Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2} \Delta t\right)}{\Delta t} \quad \text{dB/s} \quad (17)$$

Le modèle est valable pour les gammes de valeurs suivantes des paramètres:

- fréquences comprises entre 10 et 30 GHz
- angles d'élévation compris entre 10° et 50°.

Les paramètres d'entrée suivants sont nécessaires:

A : niveau d'affaiblissement (dB): 0-20 dB

f_B : fréquence de coupure à 3 dB du filtre passe-bas (Hz): 0,001-1 Hz

Δt : longueur de l'intervalle de temps pendant lequel la pente d'évanouissement est calculée (s): 2-200 s.

Le calcul pas à pas de la distribution des pentes d'évanouissement se fait de la façon suivante:

Etape 1: Calculer la fonction F pour obtenir la dépendance à l'égard de l'intervalle de temps Δt et de la fréquence de coupure f_B à 3 dB du filtre passe-bas:

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{\left(1/f_B^b + (2\Delta t)^b\right)^{1/b}}} \quad (18)$$

où $b = 2,3$.

Etape 2: Calculer l'écart type σ_ζ de la pente d'évanouissement conditionnelle à un niveau d'affaiblissement:

$$\sigma_\zeta = s F(f_B, \Delta t) A \quad \text{dB/s} \quad (19)$$

où s est un paramètre dépendant du climat et de l'angle d'élévation; $s = 0,01$ est une valeur moyenne globale applicable en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique, à des angles d'élévation compris entre 10° et 50° .

Etape 3a: Calculer la probabilité conditionnelle (fonction de densité de probabilité) $P(\zeta|A)$ pour que la pente d'évanouissement soit égale à ζ pour une valeur d'affaiblissement donnée A , à l'aide de la formule suivante:

$$p(\zeta|A) = \frac{2}{\pi\sigma_\zeta (1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \quad (20)$$

Etape 3b: Le cas échéant, calculer la probabilité conditionnelle (fonction de distribution cumulative complémentaire) $P(\zeta|A)$ pour que la pente d'évanouissement ζ soit dépassée pour une valeur d'affaiblissement donnée A , à l'aide de la formule suivante:

$$P(\zeta|A) = \frac{1}{2} - \frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{\text{arctg}(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (21)$$

ou calculer la probabilité conditionnelle $P(|\zeta|>A)$ pour que la valeur absolue de la pente d'évanouissement ζ soit dépassée pour une valeur d'affaiblissement donnée A , à l'aide de la formule suivante:

$$P(|\zeta|>A) = \int_{-\infty}^{-\zeta} p(x|A) dx + \int_{\zeta}^{\infty} p(x|A) dx = 1 - \frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2 \text{arctg}(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (22)$$

Des données aux fréquences comprises entre 12,5 GHz et 50 GHz ont permis de tester le modèle décrit par l'équation (22). Les résultats ont fait apparaître une bonne concordance avec la forme de la fonction de distribution cumulative des pentes d'évanouissement ainsi qu'avec les variations de cette distribution en fonction du seuil d'affaiblissement A , de l'intervalle de temps Δt ou de la fréquence de coupure f_B à 3 dB du filtre passe-bas.