

RECOMMANDATION UIT-R P.619-1*

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES À L'ÉVALUATION
DES BROUILLAGES ENTRE DES STATIONS DANS L'ESPACE
ET DES STATIONS SITUÉES À LA SURFACE DE LA TERRE**

(Question UIT-R 208/3)

(1986-1990-1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour évaluer convenablement des brouillages entre des stations dans l'espace et des stations situées à la surface de la Terre, il est nécessaire de posséder des données appropriées sur la propagation, qui soient fondées sur les facteurs d'influence du terrain et des conditions atmosphériques;
- b) que les données disponibles jusqu'à présent ne permettent pas de mettre au point des méthodes de prévision fiables et suffisamment précises pour toutes les régions du monde;
- c) qu'il existe cependant plusieurs méthodes qui offrent une précision suffisante, du moins dans certaines régions,

recommande

que, pour évaluer les brouillages entre des stations dans l'espace et des stations situées à la surface de la Terre, les administrations utilisent les méthodes de calcul de la propagation exposées dans l'Annexe 1.

ANNEXE 1

1. Introduction

Le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales, entre stations spatiales d'un même système et entre stations spatiales de systèmes distincts peut emprunter des trajets divers. On peut les résumer comme suit:

1.1 Brouillages entre stations spatiales et stations terriennes de systèmes distincts

Mode B1: émission d'une station spatiale d'un système spatial, brouillant la réception dans une station terrienne d'un autre système.

Mode B2: émission d'une station terrienne d'un système spatial, brouillant la réception dans une station spatiale d'un autre système.

1.2 Brouillages entre stations spatiales et stations de Terre

Mode C1: émission d'une station spatiale, brouillant la réception dans une station de Terre.

Mode C2: émission d'une station de Terre, brouillant la réception dans une station spatiale.

Les dégradations sont dues à trois principaux mécanismes qui créent des trajets de brouillage: la propagation en atmosphère claire, la diffusion par les précipitations et l'affaiblissement différentiel sur des trajets Terre-espace adjacents. Ils sont examinés ci-après.

Les effets de l'ionosphère sur la propagation entre la Terre et l'espace sont examinés dans la Recommandation UIT-R P.531. Ces effets, qui dépendent de la fréquence, comprennent la scintillation (scintillation équatoriale, scintillation aux latitudes moyennes et scintillation aux latitudes élevées), l'absorption (absorption aurorale, absorption dans la calotte polaire), les variations de la direction d'arrivée, le temps de propagation, la variation de fréquence et la rotation de Faraday.

* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

2. Propagation en atmosphère claire

Un certain nombre de mécanismes qui affectent la propagation peuvent faire varier l'affaiblissement de propagation en atmosphère claire. En général, ces mécanismes agissent individuellement avec d'autant plus de gravité que l'angle d'élévation du trajet Terre-espace est plus petit. Les phénomènes en atmosphère claire qui concernent les trajets Terre-espace à faible angle d'élévation comprennent:

- absorption par les gaz,
- affaiblissement par les nuages,
- affaiblissement par couche de fusion,
- scintillations troposphériques,
- évanouissements sous angles faibles,
- courbure des rayons,
- diminution du gain d'antenne,
- défocalisation (ou étalement du faisceau),
- conduits,
- réflexions sur le sol ou les immeubles.

La Recommandation UIT-R P.452 donne, pour les systèmes de Terre, des méthodes de prévision permettant de calculer la propagation en visibilité directe, la diffraction, la diffusion troposphérique et les effets de conduit par réflexion sur les couches. Parmi les phénomènes ci-dessus, seuls les scintillations troposphériques, les évanouissements sous angles faibles et la courbure des rayons font varier l'intensité des brouillages entre systèmes. Un système Terre-espace bien conçu ne doit pas présenter de réflexions sur le sol; on ne sait généralement prévoir l'amplitude et la phase des réflexions sur les immeubles qu'au moyen de modèles déterministes qui supposent une connaissance approfondie de l'environnement urbain. Avant d'évaluer des brouillages variables, on calcule d'habitude l'affaiblissement de propagation L_b sur un trajet de brouillage potentiel.

2.1 Affaiblissement de propagation

L'affaiblissement de propagation L_b peut s'exprimer comme suit:

$$L_b = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g + A_D - G_S \quad \text{dB} \quad (1)$$

où:

- f : fréquence (GHz)
- d : longueur du trajet (km)
- A_g : affaiblissement (dB) dû aux gaz de l'atmosphère
- A_D : affaiblissement (dB) dû à l'étalement du faisceau
- G_S : gain (dB) dû à la scintillation.

L'affaiblissement A_g dû aux gaz de l'atmosphère est décrit dans la Recommandation UIT-R P.676. Il est fonction de la concentration en vapeur d'eau au sol ρ , du rayon terrestre équivalent $R_e = 10^6 (157 - \Delta N)^{-1}$ et, à un moindre degré, de la température de l'air près du sol.

Les valeurs saisonnières et annuelles de la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre sont représentées sur les Fig. 1 à 5 de la Recommandation UIT-R P.836. En première approximation, on peut supposer que les données statistiques des variations temporelles de ρ ont une distribution gaussienne avec un écart type σ , égal à environ 0,25 fois la valeur moyenne de ρ . Par exemple, l'humidité absolue probablement dépassée pendant 99% du temps serait de $1 - (0,25 \times 2,4) = 0,4$ fois la valeur moyenne. De même, la valeur dépassée pendant 99,99% du temps serait de $1 - (0,25 \times 3,8) = 0,05$ fois la valeur moyenne.

ΔN est la décroissance moyenne (gradient) du coïndice dans une couche d'une épaisseur de 1 km à partir de la surface de la Terre. Les cartes mondiales des valeurs de la décroissance moyenne mensuelle de ΔN sont représentées aux Fig. 3 à 6 de la Recommandation UIT-R P.453.

Le «gain de scintillation», G_S , est fonction de la fréquence, du diamètre de l'antenne de la station terrienne, de l'angle d'élévation et du climat local; on peut le calculer à partir de l'intensité de la scintillation troposphérique prévue.

Il ressort de l'application des méthodes de prévision exposées dans la Recommandation UIT-R P.530 que dans quelques régions du monde, les effets combinés des évanouissements uniformes profonds par atmosphère claire et des évanouissements par trajets multiples sur le signal désiré (à des profondeurs d'évanouissements d'environ 25 dB) peuvent être au moins aussi importants à 23 GHz environ que l'affaiblissement dû à la pluie, même sur des trajets n'atteignant que 10 km. Il s'agit de régions dans lesquelles les conduits sont très répandus mais qui ont aussi des régimes hydrométéorologiques modérés (c'est-à-dire, régions chaudes ou régions désertiques de type arctique). La plupart des autres régions dans lesquelles les conduits sont très répandus sont des régions humides également sujettes à de graves affaiblissements dus à la pluie, qui devraient être la cause la plus importante d'interruption du signal désiré pour des marges d'environ 25 dB. L'Est-Anglie, au Royaume-Uni, est une région, dans les latitudes tempérées, où l'évanouissement par trajets multiples du signal désiré survient pendant le même pourcentage de temps que l'affaiblissement dû à la pluie sur un trajet de 10 km.

2.2 Scintillation troposphérique

La Recommandation UIT-R P.618 donne une méthode de prévision de la scintillation troposphérique dont la validité descend jusqu'à des angles d'élévation de 4°. Cette méthode permet de calculer l'intensité de la scintillation et la distribution cumulative des évanouissements effectifs. La scintillation troposphérique provoque aussi des renforcements du signal qui donnent des valeurs d'affaiblissement de transmission inférieures à celles que l'on obtient en espace libre. Il est possible d'avoir des niveaux notables de scintillation troposphérique pendant des pourcentages de temps bien supérieurs à 1% de l'année. Sur les trajets à très faible angle d'élévation, des modifications localisées de l'indice de réfraction associées à des mouvements quasi ondulatoires de l'atmosphère peuvent donner de sévères évanouissements sous angles faibles.

2.3 Evanouissements sous angles faibles

Pour des angles d'élévation inférieurs à 5° et de faibles pourcentages du temps, on peut observer de substantiels renforcements et évanouissements du signal. Des mesures effectuées à 7 GHz ont révélé des renforcements du signal qui atteignaient 6 dB à des angles d'élévation compris entre 1° et 2°, tandis que, pour un angle d'élévation du trajet de 3,3° on a mesuré des renforcements qui atteignent 8 dB et des évanouissements d'une profondeur de 16 dB par atmosphère pratiquement claire. On n'a pas encore recommandé de modèle pour prévoir ces niveaux d'évanouissement sous angles faibles.

2.4 Courbure des rayons

La courbure des rayons provient des variations de l'indice de réfraction le long du trajet. Ces variations ne sont d'habitude sensibles que dans le sens vertical car à toute altitude la basse atmosphère est généralement assez bien stratifiée. Un faisceau d'antenne n'est pas infiniment mince et par conséquent ses portions inférieures et supérieures seront courbées de façon différente car elles ont un angle d'élévation différent dans la basse atmosphère. La courbure différentielle des rayons aura donc pour effet d'étaler le faisceau. La Fig. 1 présente l'étalement du faisceau dans un plan vertical.

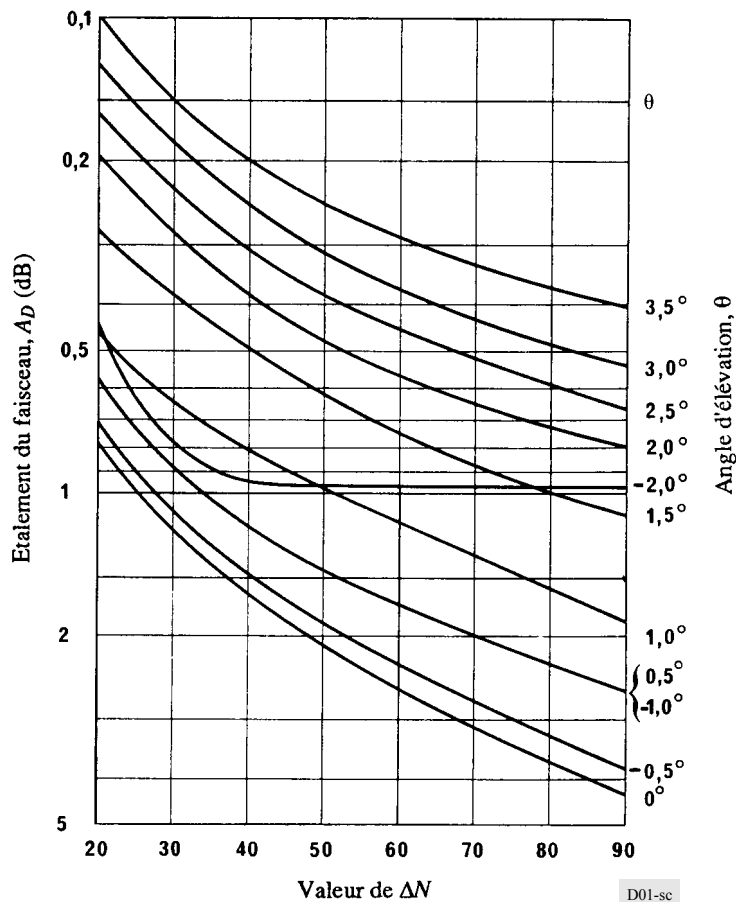
3. Diffusion par les précipitations

Il peut y avoir brouillage quand l'énergie que rayonne un système est diffusée par les précipitations et pénètre dans le faisceau d'antenne d'un autre système. Cela ne se produit que si les faisceaux principaux des deux systèmes se coupent dans une portion de l'atmosphère où il y a des hydrométéores. Dans ces conditions, il apparaît un volume commun où les hydrométéores sont présents pendant une durée appréciable et il peut en résulter des niveaux de signal non désiré renforcés. Bien que de tels brouillages puissent être notables, ils ne sont en général pas assez gênants pour limiter la qualité du système et on peut normalement les éviter tout à fait en choisissant les trajets de façon judicieuse pour éviter le risque qu'apparaissent des volumes communs.

La méthode de calcul de la diffusion par les précipitations est exposée dans la Recommandation UIT-R P.452.

FIGURE 1

Etalement du faisceau dans le cas d'ondes radioélectriques se propageant quasi horizontalement



Le brouillage causé par un satellite d'énergie solaire soulève de graves difficultés dans ce contexte. A l'aide des données dont on dispose sur le contenu probable d'harmoniques, on peut montrer que, même sur le quatrième harmonique, le niveau du signal brouilleur, à une distance de 50 km de la cellule de pluie, est comparable au niveau du signal reçu dans le service fixe par satellite. A la fréquence fondamentale, cependant, le rayonnement direct des lobes latéraux du satellite d'énergie solaire en direction de la station de Terre dépassera probablement le signal provenant de la diffusion par les précipitations.

4. Affaiblissement différentiel sur des trajets adjacents

4.1 Influence de la pluie

Si deux stations spatiales fonctionnant à la même fréquence sont séparées l'une de l'autre par un petit angle, il peut arriver que l'affaiblissement dû à la pluie sur le trajet à partir d'une station spatiale diminue suffisamment la puissance du signal pour qu'une station spatiale voisine puisse causer un brouillage à la station terrienne de réception.

Dans ce cas, il est indispensable d'étudier les effets combinés de l'affaiblissement dû à la pluie A_c du signal désiré et de l'affaiblissement dû à la pluie A_i du signal brouilleur.

Il convient, pour les calculs du brouillage, d'utiliser les distributions conditionnelles de $\Delta A = A_c - A_i$ et A_c . Comme base pour l'obtention de statistiques de dépassement total pour diverses régions, dans lesquelles les statistiques d'affaiblissement sur un trajet unique sont différentes, on a calculé les statistiques ΔA dépassées pour 1% du temps avec la condition: $0,5 \text{ dB} < A_c < A_m$, où A_m est l'affaiblissement maximal admissible du signal désiré. On a constaté que les résultats obtenus par la formule empirique:

$$\Delta A(1\%) = 0,036 (0,45 f + \operatorname{cosec} \theta) \cdot [\log_e (\varphi + 1) \cdot \log_e (A_m + 1)]^{1,15} \quad \text{dB} \quad (2)$$

où:

f : fréquence (GHz): $11 \leq f \leq 30$ GHz

θ : angle d'élévation de la station terrienne (degrés): $5^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$

φ : séparation angulaire en azimut (degrés) des deux trajets: $0^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$

concordaient assez bien avec les données enregistrées dans les gammes des valeurs des paramètres considérées.

Afin de déterminer le pourcentage de temps pendant lequel une valeur particulière de ΔA est dépassée pour une valeur donnée de A_m , il convient de multiplier le chiffre de 1% par la valeur de probabilité pour que $0,5 \text{ dB} < A_c < A_m$. On peut obtenir cette dernière à partir d'une distribution cumulative mesurée ou prévue pour un trajet unique (voir la Recommandation UIT-R P.618).

Il reste à vérifier la validité de la formule (2) pour des valeurs de la fréquence et de l'angle d'élévation s'étendant sur un vaste intervalle. Néanmoins, les résultats obtenus pour des azimuts assez fortement différents ($31,5^\circ$) semblent bien concorder avec ce que laisse prévoir la formule (2). En conséquence, l'affaiblissement différentiel dû à la pluie sur des trajets Terre-espace distincts ne semble pas devoir causer de brouillages inacceptables.

4.2 Influence de la scintillation

Des mesures effectuées en diversité d'altitude à un angle d'élévation de $3,3^\circ$ et sur la fréquence 11,198 GHz ont montré qu'avec un espacement de 15,1 m les scintillations qui affectaient les deux antennes n'étaient pas du tout corrélées. Cela signifie qu'à un angle d'élévation de $3,3^\circ$, il suffit d'un écart angulaire d'élévation de $0,1^\circ$ entre deux trajets Terre-espace pour que les scintillations ne soient pas corrélées. Avec des satellites très voisins, et même avec ceux qui occupent la même position, on peut avoir une scintillation tout à fait décorrélée et il faudra évaluer avec soin les risques de brouillage entre de tels systèmes, surtout si une régulation de puissance est appliquée à la liaison montante.