

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.679-4
(07/2015)

**Données de propagation nécessaires
pour la conception des systèmes de
radiodiffusion par satellite**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2016

© UIT 2016

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.679-4

**Données de propagation nécessaires pour la conception
des systèmes de radiodiffusion par satellite**

(Question UIT-R 206/3)

(1990-1992-1999-2001-2015)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes de radiodiffusion par satellite, il est nécessaire que l'on dispose 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 de radiodiffusion 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;
- e) que la Recommandation UIT-R P.2040 donne des indications sur les effets des propriétés des matériaux de construction et des structures des bâtiments sur la propagation des ondes radioélectriques,

recommande

1 que les données actuelles de propagation figurant dans l'Annexe 1 soient adoptées pour la planification des systèmes de radiodiffusion par satellite, en plus des méthodes préconisées dans la Recommandation UIT-R P.618.

Annexe 1

1 Introduction

Les questions de propagation qui interviennent dans le service de radiodiffusion par satellite (SRS) ne sont pas tout à fait comparables à celles que l'on rencontre dans le service fixe par satellite. Pour la transmission dans le sens espace-Terre, on a besoin de données sur l'affaiblissement sous la forme de moyennes statistiques et/ou de cartes de contours d'affaiblissement et de transpolarisation pour des zones de grande superficie. Des problèmes particuliers de coordination peuvent se présenter à la limite de la zone de service entre des systèmes SRS et des services de Terre ou d'autres services spatiaux. On trouve dans la Recommandation UIT-R P.618 l'exposé de méthodes générales de prévision des effets de la propagation sur le trajet Terre-espace. La présente Annexe contient des renseignements supplémentaires propres à la planification des systèmes SRS. Il convient de noter que les liaisons de connexion sont considérées comme faisant partie des services fixes par satellite, et non des services de radiodiffusion.

Pour les trajets espace-Terre des systèmes de radiodiffusion, il existe plusieurs effets de la propagation que l'on peut être amené à prendre en considération.

Ce sont notamment:

- des effets troposphériques, comprenant l'absorption par les gaz, l'affaiblissement et la transpolarisation dus à la pluie et à d'autres hydrométéores;
- des effets ionosphériques, tels que la scintillation et la rotation de Faraday (voir la Recommandation UIT-R P.531);
- des effets locaux de l'environnement, dont l'affaiblissement est dû à la présence de bâtiments et de végétation.

La présente Annexe passe en revue les effets susmentionnés et contient des références à d'autres Recommandations où l'on trouvera des compléments d'information. On a besoin de recueillir encore davantage de données afin de caractériser les dégradations que cause la propagation aux systèmes SRS.

2 Effets troposphériques

Les dégradations que la troposphère fait subir à un signal sont négligeables aux fréquences inférieures à 1 GHz environ et pour des angles d'élévation du trajet supérieurs à 10°.

A mesure que l'angle d'élévation diminue et/ou que la fréquence augmente, ces dégradations s'aggravent de plus en plus et les fluctuations de l'amplitude du signal et de son angle d'arrivée peuvent être notables (voir la Recommandation UIT-R P.618). Ces effets ont une importance particulière pour les zones de service de latitude élevée. L'élévation de la température de bruit du ciel provoquée par les précipitations (voir la Recommandation UIT-R P.618) réduiront encore le rapport C/N du signal reçu. En outre, des accumulations de neige et de glace sur les réflecteurs et les sources d'alimentation de l'antenne peuvent sérieusement dégrader les caractéristiques contrapolaires, ainsi que celles de pointage et de gain de l'antenne pendant des périodes importantes de l'année.

2.1 Affaiblissement troposphérique

La troposphère donne lieu à un affaiblissement des signaux dû à une absorption par les gaz, ainsi qu'à un affaiblissement dû à la pluie et autres hydrométéores. De plus, de faibles variations de l'indice de réfraction atmosphérique entraînent une scintillation qui contribue tant à des évanouissements qu'à des renforcements des signaux.

2.1.1 Affaiblissement par les gaz de l'atmosphère

L'exposé de la méthode recommandée pour prévoir l'affaiblissement par les gaz se trouve dans la Recommandation UIT-R P.618. Pour la plupart des fréquences, l'affaiblissement par les gaz est généralement très inférieur à l'affaiblissement dû à la pluie. Toutefois, dans la bande de 22 GHz attribuée dans certaines régions au SRS, l'absorption par la vapeur d'eau peut être tout à fait importante. Par exemple, à un emplacement où l'affaiblissement sur un trajet à 22,75 GHz est supérieur à 9,5 dB pendant 1% du mois le plus défavorable, l'affaiblissement par les gaz peut entrer pour environ 3 dB dans ce total de 9,5 dB.

2.1.2 Affaiblissement par les précipitations et les nuages

La méthode de prévision de l'affaiblissement par les précipitations et les nuages est exposée dans la Recommandation UIT-R P.618, ainsi qu'une méthode simple de similitude en fréquence des statistiques mesurées de l'affaiblissement. L'affaiblissement dû aux nuages sera peu prononcé pour les fréquences inférieures à 30 GHz; de toute façon, il en est tenu compte dans la méthode de

prévision de l'affaiblissement dû à la pluie. Si l'on connaît la teneur en eau liquide, l'utilisation de la méthode de la Recommandation UIT-R P.840 permet d'évaluer l'affaiblissement par le brouillard et les nuages.

2.1.3 Affaiblissement dû à la pluie pour le mois le plus défavorable

Pour la radiodiffusion par satellite, le paramètre qui présente habituellement le plus d'intérêt est l'affaiblissement dû à la pluie qui est dépassé pendant 1% du mois le plus défavorable. La méthode permettant de relier les pourcentages de temps pendant le mois le plus défavorable aux pourcentages annuels de temps pour l'affaiblissement dû à la pluie est décrite dans la Recommandation UIT-R P.618. On trouve dans la Recommandation UIT-R P.581 l'exposé détaillé du traitement du mois le plus défavorable et de la base sur laquelle il est fondé.

Les données disponibles sur l'affaiblissement dû à la pluie pendant le mois le plus défavorable sont compilées dans le Tableau II-2 des banques de données de la Commission d'études 3 des radiocommunications (voir la Recommandation UIT-R P.311).

2.1.4 Variation des évanouissements en fonction de l'heure du jour

L'influence exercée par l'heure du jour sur l'occurrence des évanouissements est un facteur non négligeable à considérer dans la conception du SRS. Les données obtenues dans différentes régions du monde révèlent une tendance générale à un accroissement des évanouissements pendant les heures de l'après-midi et en début de soirée. Dans les climats caractérisés par les orages, une plus grande probabilité d'occurrence des évanouissements profonds est associée aux heures pendant lesquelles se produit le niveau maximal de l'activité orageuse locale. Les régions tropicales, en particulier, peuvent être caractérisées par une grande asymétrie journalière.

Par ailleurs, les évanouissements peu profonds sont distribués avec une plus grande uniformité, au cours des saisons ou des heures du jour.

2.1.5 Scintillation

Les petites irrégularités du coïndice de réfraction de la troposphère peuvent donner lieu à de rapides fluctuations de l'amplitude des signaux. Cette scintillation n'intervient généralement pas d'une façon notable dans la performance des systèmes quand les fréquences sont inférieures à environ 10 GHz et quand les angles d'élévation des trajets dépassent 10° mais elle peut être importante quand les angles d'élévation sont plus petits ou quand la fréquence est plus grande – en particulier dans le cas des liaisons à faible marge. La méthode recommandée pour évaluer les évanouissements par scintillation est décrite dans la Recommandation UIT-R P.618.

2.2 Transpolarisation

Les hydrométéores (principalement les concentrations de particules de glace et de gouttes de pluie) peuvent causer statistiquement une transpolarisation importante des signaux aux fréquences supérieures à 2 GHz environ. On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.618 l'exposé de la méthode recommandée pour la prévision de ces effets.

3 Effets ionosphériques

Aux fréquences inférieures à 3 GHz environ, les effets ionosphériques sont importants sur certains trajets et en quelques emplacements. En vue d'ingénierie générale, le Tableau 1 donne pour différentes fréquences les valeurs maximales estimées des effets ionosphériques (obtenues à partir de la Recommandation UIT-R P.531). Les dégradations les plus à craindre sont essentiellement la scintillation et (en polarisation linéaire uniquement) la rotation de Faraday.

TABLEAU 1

**Valeurs estimées* des effets ionosphériques pour un angle d'élévation d'environ 30°
dans le cas d'une propagation transversale dans un seul sens****
(d'après la Recommandation UIT-R P.531)

Effet	Variation en fonction de la fréquence	0,5 GHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
Rotation de Faraday	$1/f^2$	1,2 rotation	108°	12°	1,1°
Temps de propagation	$1/f^2$	1 μ s	0,25 μ s	0,028 μ s	0,0025 μ s
Réfraction	$1/f^2$	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2''	< 0,36''
Variation de la direction d'arrivée (valeur quadratique moyenne)	$1/f^2$	48''	12''	1,32''	0,12''
Absorption (aurorale et/ou calotte polaire)	$\approx 1/f^2$	0,2 dB	0,05 dB	6×10^{-3} dB	5×10^{-4} dB
Absorption (latitudes moyennes)	$1/f^2$	< 0,04 dB	< 0,01 dB	< 0,001 dB	< 1×10^{-4} dB
Dispersion	$1/f^3$	0,0032 ps/Hz	0,0004 ps/Hz	$1,5 \times 10^{-5}$ ps/Hz	4×10^{-7} ps/Hz
Scintillation ⁽¹⁾			> 20 dB crête à crête	≈ 10 dB crête à crête	≈ 4 dB crête à crête

* Ces estimations sont fondées sur un contenu électronique total (CET) de 10^{18} électrons/m², qui est une valeur élevée du CET observée de jour aux basses latitudes en période de forte activité solaire.

** Les effets ionosphériques au-dessus de 10 GHz sont négligeables.

(1) Valeurs observées près de l'équateur géomagnétique pendant les premières heures de la nuit (heure locale) à l'équinoxe, pour un nombre élevé de taches solaires.

4 Effets de l'environnement local

Il existe des emplacements de réception où les effets des structures locales et de la végétation peuvent être importants. De récents résultats de mesures effectuées à 5 GHz montrent que l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments dépend fortement des angles d'élévation et d'azimut. Ces résultats s'ajoutent à ceux obtenus à partir des mesures dans les bandes inférieures à 3 GHz. Les données susceptibles d'être appliquées aux systèmes SRS sont malheureusement insuffisantes pour caractériser complètement ces effets.

4.1 Affaiblissement de pénétration dans les bâtiments

En ce qui concerne l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments, on trouvera des informations dans la Recommandation UIT-R P.2040.

4.2 Affaiblissement de pénétration dans un véhicule

On ne dispose que d'un corps de données limité quant aux mesures d'affaiblissement d'un signal pénétrant dans un véhicule, et les rares données disponibles ont été obtenues avec des méthodes de mesure au sol analogues aux méthodes décrites précédemment. Par exemple, dans un cas, les mesures ont été effectuées à 1 600 MHz avec des angles d'élévation de trajet simulé compris entre

8° et 90°, deux antennes différentes (réseau microruban et hélice quadrifilaire), différents types de véhicules (montés sur une plate-forme tournante permettant d'évaluer le niveau du signal en fonction de l'angle d'arrivée), enfin différentes positions de l'utilisateur du terminal dans le véhicule. Les mesures étaient faites avec les vitres du véhicule baissées. Les valeurs typiques de *l'affaiblissement supplémentaire sur le trajet* (qui correspond par définition à la différence entre le niveau moyen du signal dans le véhicule et le niveau d'affaiblissement moyen relevé en espace libre avec la même antenne et le corps de l'usager dans la même position que dans le véhicule) étaient comprises entre 3 et 8 dB pour la valeur médiane et entre 4 et 13 dB au 90ème percentile.

Les données recueillies permettent de formuler les observations et conclusions générales suivantes:

- dans les véhicules, la distribution des niveaux du signal est de type Rayleigh; on peut donc dire qu'il n'y a généralement pas de trajet de propagation en visibilité directe et que la puissance du signal dépend de la diffusion par trajets multiples provoquée par les arrêtes des ouvertures du véhicule (encadrements de vitres);
- au 90ème percentile, les valeurs d'affaiblissement sont de l'ordre de 15 à 20 dB pour tous les angles d'élévation de trajet;
- l'affaiblissement ne dépend pas seulement de l'angle d'élévation sur le trajet, mais la dépendance par rapport à l'angle d'élévation est différente selon que l'antenne est au niveau de la tête ou au niveau des hanches;
- le type de véhicule n'a pas d'incidence sensible sur l'affaiblissement de pénétration;
- la position du terminal de l'utilisateur dans le véhicule n'a pas d'effet sensible sur l'affaiblissement;
- la valeur médiane de l'affaiblissement supplémentaire (par rapport à des mesures en espace libre) présente une distribution log-normale;
- l'affaiblissement sur le trajet est moins important lorsque l'on utilise une antenne réseau plutôt qu'une antenne au niveau de la tête (une plus grande directivité entraîne une augmentation des affaiblissements en espace libre, dont les valeurs ne sont guère plus défavorables lorsque l'antenne est dans le véhicule);
- enfin, pour un angle d'élévation de 8°, la moyenne tous véhicules des valeurs médianes de l'affaiblissement supplémentaire est d'environ 3,7 dB pour une antenne au niveau de la tête, contre 3,2 dB à 900 MHz dans le cas d'un trajet horizontal dans une berline de dimensions importantes.

On peut supposer que ces résultats sont représentatifs du comportement général d'un signal pénétrant dans un véhicule.

4.3 Réflexions et effets d'écran dus aux bâtiments

Des mesures ont été effectuées avec un émetteur à polarisation circulaire installé au sommet d'une haute tour et qui émettait des signaux de radiodiffusion sonore MF à 839 MHz et 1 504 MHz; elles ont montré qu'à un angle d'élévation proche de 20° l'intensité de champ à proximité du niveau de la rue en zone urbaine présentait des fluctuations d'un emplacement à un autre d'environ 15 dB à 839 MHz et d'environ 18 dB à 1 504 MHz. Ces fluctuations sont pratiquement les mêmes à la réception, que l'on utilise des antennes à polarisation horizontale ou à polarisation verticale. La qualité du son est peu dégradée par des fluctuations de champ observées dans des conditions de propagation par trajets multiples, même dans des rues étroites et orientées de façon défavorable.

Dans les zones suburbaines et rurales, la réflexion par le sol peut devoir être prise en considération pour déterminer la polarisation préférée, puisque l'onde polarisée verticalement, après réflexion par le sol, passe par un minimum très faible à l'angle pseudo-brewstérien, alors que ce n'est pas le cas pour l'onde polarisée horizontalement. Après réflexion par le sol, l'onde polarisée horizontalement sera donc généralement plus forte que l'onde polarisée verticalement dans le cas d'une terre lisse et, partant, la somme de l'onde directe et de l'onde réfléchi par le sol donnera un minimum plus accentué et des crêtes plus élevées.

5 Distribution statistique pour des zones de grande superficie

Un satellite de radiodiffusion doit desservir, si possible avec la même qualité de service et pendant le même pourcentage du temps, une zone de grande superficie. Or, certaines parties de cette zone peuvent être affectées de façon différente par certains effets de la propagation (c'est par exemple le cas de zones climatiques différentes). Pour connaître ces différences, on peut procéder à des mesures coordonnées effectuées en plusieurs emplacements de réception répartis dans toute la zone de service. Les renseignements ainsi recueillis sont utiles à la fois pour évaluer les besoins en matériel de l'abonné et pour déterminer les conditions de brouillage aux limites de la zone de service, mais ces données sont peu nombreuses.

Les données disponibles montrent que la probabilité de précipitations pluvieuses simultanées en des emplacements distincts peut être de quelques pour-cent pour des distances de séparation allant jusqu'à 500 km et que l'indépendance statistique des précipitations ne peut être présumée pour des distances de séparation inférieures à 800 km environ. Dans le cas de deux emplacements séparés par une distance de 200 km, la probabilité d'intensités de précipitation simultanées de plus de 5 mm/h s'est révélée environ cinq fois supérieure à la probabilité obtenue dans l'hypothèse de l'indépendance statistique.

6 Distribution statistique et corrélation de fréquence de signaux

Des mesures faites en émettant un signal à 567,25 MHz à partir du sommet d'une tour de 515 m, pour simuler une transmission par satellite, ont montré que, pour la grande majorité des emplacements de réception, la distribution des valeurs instantanées de l'enveloppe du signal est très proche d'une distribution log-normale. Si des obstructions par des objets locaux introduisent un affaiblissement de plus de 15 dB par rapport au niveau moyen, la distribution des valeurs instantanées est proche d'une distribution de Rayleigh.

Au cours de la même expérience, on a mesuré la corrélation de fréquence de signaux espacés de 0,15 MHz, 0,5 MHz, 1,0 MHz, 2,2 MHz, 4,4 MHz et 6,5 MHz. On a observé que la corrélation de fréquence diminue à mesure qu'augmente l'écart de fréquence et qu'elle n'est qu'incidence et légèrement affectée par l'angle d'élévation.
