

RECOMMANDATION UIT-R P.679-3

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

(Question UIT-R 206/3)

(1990-1992-1999-2001)

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,

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 µs	0,25 µs	0,028 µs	0,0025 µs
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

Le Tableau 2 donne l'affaiblissement représentatif des signaux en ondes décimétriques transmis par satellite, observé dans des pièces adjacentes à un mur extérieur d'une habitation privée charpentée en bois. Pour les pièces de l'intérieur, il faut majorer de 0,6 dB les valeurs inscrites dans le tableau. Dans les bâtiments charpentés en bois, l'affaiblissement varie peu selon les conditions météorologiques ou l'angle d'élévation mais, comme l'indique le tableau, l'affaiblissement varie systématiquement avec la fréquence, la polarisation, les matériaux de construction, l'isolation et la position à l'intérieur de la structure. L'affaiblissement dû à certains matériaux de construction ou d'isolation (feuille d'aluminium) peut atteindre 20 dB.

TABLEAU 2

**Affaiblissement (dB) des signaux en ondes décimétriques
traversant des bâtiments charpentés en bois***

Constitution du bâtiment		Fréquence (MHz) et polarisation (horizontale: H, verticale: V)			
Gros œuvre	Présence d'une isolation autre que métallique	860 H	860 V	1 550 V	2 569 V
Tout en bois	Plafond seulement	4,7	2,9	5,0	5,8
	Plafond seulement	6,3	4,5	6,6	7,4
Parements briques	Plafond et murs	5,9	4,1	6,2	7,0
	Plafond et murs	7,5	5,7	7,8	8,6

* Ce tableau est applicable à des pièces adjacentes à un mur extérieur; pour des pièces limitées par des cloisons intérieures, il faut ajouter 0,6 dB aux valeurs indiquées.

Des mesures d'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments ont été effectuées dans les bandes de 700 MHz à 1,8 GHz et de 500 MHz à 3 GHz. L'émetteur de satellite était simulé par des tours de 18 à 20 m de hauteur. Il s'agissait de déterminer l'affaiblissement moyen et les variations spatiales à l'intérieur de bâtiments de divers types. On ne dispose pas de suffisamment de données pour établir des méthodes de prévision précises, mais on trouvera des indications utiles dans les Tableaux 3 à 5.

TABLEAU 3

**Répartitions des valeurs de niveau du signal (position moyenne et meilleure position)
dans certains types de bâtiments (fréquences comprises entre 700 et 1 800 MHz)**

Numéro du bâtiment	Type de construction	Angle d'élévation	Position moyenne		Meilleure position	
			Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)	Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)
1	Bureau d'extrémité, grandes fenêtres, bâtiment en rez-de-chaussée. Murs en plots de béton, placoplâtre, double-vitrage. Toit en béton sur poutrelles métalliques	27,5° (visibilité directe à travers la fenêtre, angle d'azimut entre le mur et le trajet de visibilité directe: 50°)	7,9	5,5	4,2	4,2
2	Petite pièce, fenêtres occupant 5/8 de la surface du mur extérieur	18° (trajet de visibilité directe à travers la fenêtre, angle d'azimut entre le mur et le trajet de visibilité directe: 50°)	9,1	4,4	5,4	3,7
3	Hall d'extrémité, large porte en verre réfléchissant occupant la moitié d'un mur extérieur. Murs extérieurs en béton, parois intérieures en placoplâtre sur cadre métallique	16° (trajet de visibilité directe à travers la fenêtre, angle d'azimut entre un mur et le trajet de visibilité directe: 45°, les deux murs extérieurs étant illuminés par l'émetteur)	15,4	8,4	9,7	6,7

TABLEAU 3 (fin)

Numéro du bâtiment	Type de construction	Angle d'élévation	Position moyenne		Meilleure position	
			Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)	Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)
4	Abri en tôle, intérieur en contreplaqué. Une petite fenêtre sans volet sur chacun des deux côtés, porte doublée métal	25° (angle d'azimut entre un mur et le trajet de visibilité directe: 60°)	9,7	6,3	5,2	4,9
5	Maison en bois à un étage, matériau isolant: laine minérale (murs et grenier); revêtement placoplâtre, sans écran thermique métallique. Pas de volets métalliques sur les fenêtres. Toiture: tuiles de bois	25° (angle d'azimut entre un mur et le trajet de visibilité directe: 45°)	9,0	4,5	5,4	3,7
6	Mobile home vide, parois métalliques, fenêtres à menuiserie métallique, volets métalliques	25° (angle d'azimut entre les parois et le trajet de visibilité directe: 45°)	24,9	3,8	19,8	3,4

TABLEAU 4

**Perte moyenne en position moyenne et en meilleure position dans un bâtiment,
en fonction de la fréquence**

(Mêmes caractéristiques de construction et angles d'élévation que dans le Tableau 3)

Numéro du bâtiment	Position moyenne	Meilleure position
(Idem Tableau 3)	750-1 750 MHz	750-1 750 MHz
1	5-11 dB	2-6 dB
2	5-14 dB	2-5 dB
3	17-18 dB	12-13 dB
4	9-11 dB	5-6 dB
5	5-11 dB	3-5 dB
6	20 à > 24 dB	16-22 dB

TABLEAU 5

**Répartition des niveaux du signal en position moyenne dans des bâtiments
(estimations pour la gamme de fréquences 500-3 000 MHz)**

Numéro du bâtiment	Type de construction	Angle d'élévation (degrés)	Position moyenne	
			Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)
1	Hall d'entrée, bâtiment en rez-de-chaussée, murs en panneaux de béton préfabriqué, toit goudronné	18	13	10
2	Bureau administratif, bâtiment en rez-de-chaussée – murs de brique, toit goudronné	38	9	7
3	Ferme à structure en bois, un étage, toit métallique, sans écran thermique en aluminium	33	5	4
4	Hall et salle de séjour de maison de bois, un étage, toit métallique, écran thermique en aluminium	41	19,5	12
5	Chambre de motel, bâtiment à un étage, briques, toit en matériau composite	37	13	6
6	Hall d'entrée d'un bâtiment à un étage, verre et béton, toit goudronné	26	12	5

Dans le cas des trois premiers bâtiments, l'angle d'élévation était tel que la pièce était illuminée par un signal à travers une fenêtre en vue directe de l'émetteur. Les angles d'élévation étaient inférieurs à 30°, de sorte que les bâtiments étaient également illuminés par les côtés.

Dans le cas du bâtiment N° 3, la porte de verre réfléchissant, lorsqu'elle était fermée, occasionnait un surcroît d'affaiblissement de 15 dB.

Une autre étude a donné des résultats analogues, avec des niveaux d'affaiblissement moyens (dans la gamme de fréquences 500-3000 MHz) compris entre 5 dB (maison à structure en bois, toit en métal, sans écran thermique en aluminium) et 20 dB (maison de même type mais dotée d'un écran thermique en aluminium). Les valeurs d'affaiblissement moyennes mesurées sont résumées au Tableau 5.

Il convient de noter que, dans certains cas, les valeurs moyennes indiquées tiennent compte des mesures effectuées à proximité d'une fenêtre ou d'une porte ouverte. Dans le motel (bâtiment N° 6), l'affaiblissement augmentait de 15 à 30 dB, par rapport à un trajet en visibilité directe, lorsque le trajet direct passait par une paroi de briques. Les niveaux relevés à l'intérieur du bâtiment N° 4 étaient inférieurs de 25 à 45 dB aux valeurs de visibilité directe, en raison du toit métallique et de l'écran thermique en aluminium.

Il convient par ailleurs de noter que les mesures ont été effectuées sur des trajets stationnaires. Il semblerait que certains effets de propagation par trajets multiples de proximité donnent lieu à des fluctuations du niveau du signal reçu lorsque l'émetteur, ou le récepteur, n'est pas fixe, et cette

observation a certaines conséquences, notamment pour les systèmes en orbite terrestre basse (LEO, *low Earth-orbiting*), puisque dans de telles configurations l'émetteur se déplace rapidement par rapport au récepteur.

Les mesures font apparaître que l'affaiblissement s'accroît en fonction de la fréquence d'environ 1 à 3 dB par GHz dans les bâtiments N° 1, 2, 4 et 6 et de 6 dB par GHz dans le bâtiment où l'affaiblissement est le moins important (bâtiment N° 3), tandis que, dans le cas du bâtiment N° 5, aux parois de verre, on n'observe pour ainsi dire aucune variation en fonction de la fréquence. Du fait que les valeurs indiquées ci-dessus sont des moyennes dans la gamme de fréquences de 500 MHz à 3 GHz, ces valeurs devraient être légèrement optimistes pour la gamme 1-3 GHz.

Pour les six bâtiments mentionnés dans le Tableau 5, des mesures à 1,6 GHz et à 2,5 GHz ont été réalisées et analysées afin de déterminer les niveaux médian, à 5% et à 95% de la perte relative du signal lorsque les antennes sont déplacées horizontalement sur des intervalles multiples de 80 cm. Les bâtiments étaient illuminés sur le côté et les signaux reçus à l'intérieur du mur extérieur (pénétration à travers un seul mur). Des antennes omnidirectionnelles en azimut ont été utilisées pour recevoir les signaux émis. Les statistiques tirées de ces mesures sont résumées à la Fig. 1. Ces données indiquent l'amplitude et les variations de l'évanouissement auquel peut être soumise l'émission d'un signal à travers les murs d'un bâtiment. A noter que, parfois, la propagation par trajets multiples conduit à des niveaux relatifs dépassant 0 dB.

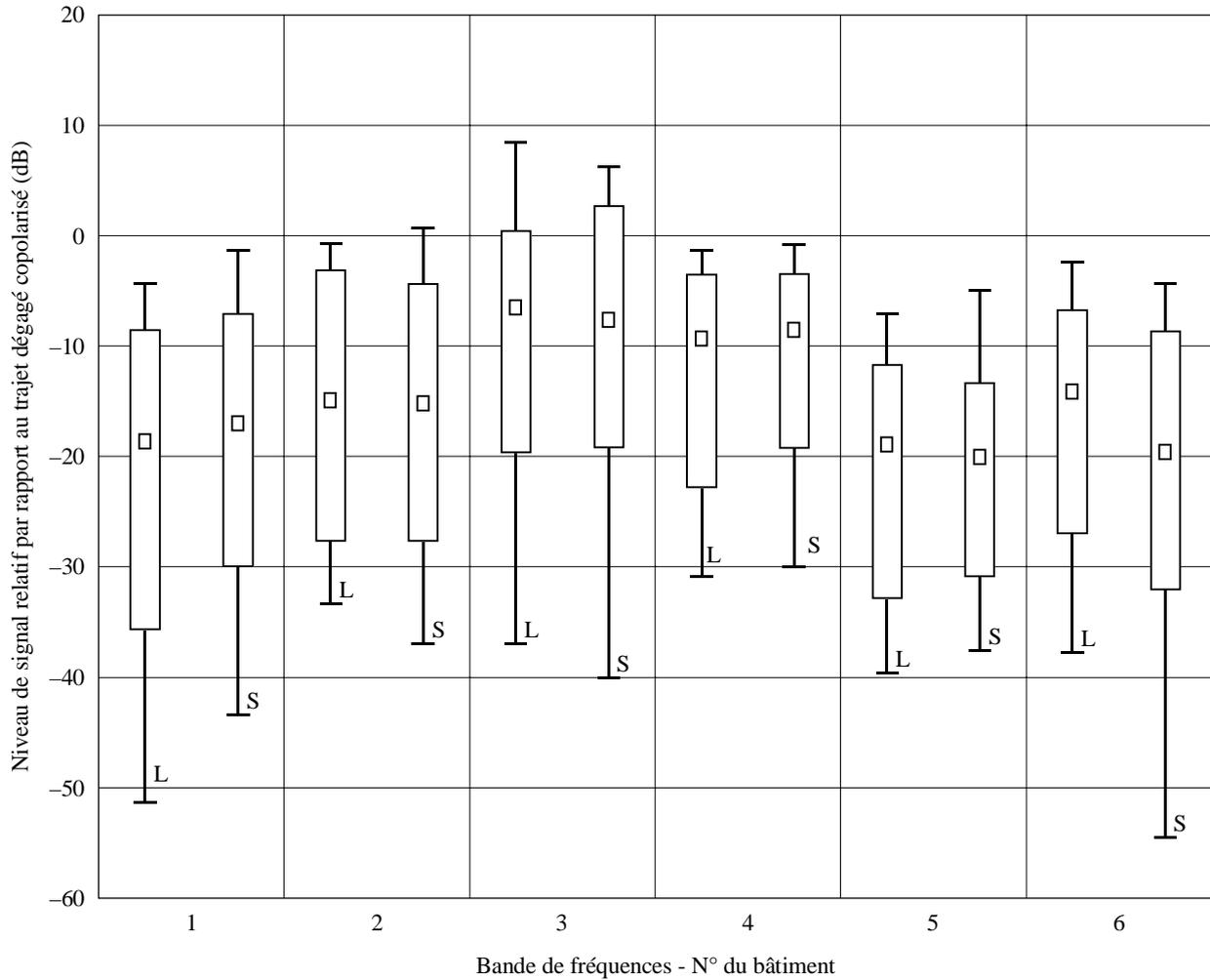
Aucune des mesures effectuées dans des bandes de fréquence inférieures à 3 GHz ne donne des informations pour les angles d'élévation supérieurs à 41°. Toutefois, les importantes valeurs d'affaiblissement observées dans le cas de structures métalliques (bâtiment N° 6 des Tableaux 3 et 4, bâtiment N° 4 du Tableau 5) donnent à penser que l'affaiblissement, dans le cas d'un trajet direct à travers un toit métallique, sera de l'ordre de 20 dB. Les valeurs de 15 à 30 dB indiquées dans le cas du bâtiment N° 4 du Tableau 5 (mur de briques) s'appliquent également aux valeurs d'angle d'élévation supérieures.

Les études consacrées à la propagation de Terre dans les bâtiments indiquent qu'à 2 GHz, dans un bâtiment de type bureaux administratifs, la formule de calcul de l'affaiblissement (dB) d'un étage à l'autre est de forme $15 + 4(n - 1)$ où n est le nombre de niveaux. Dans le cas d'un bâtiment de type résidentiel, l'affaiblissement est en général de 4 dB par étage, et l'on peut utiliser cette valeur pour estimer l'affaiblissement additionnel subi par signal provenant d'un satellite pénétrant un bâtiment selon un angle d'élévation important.

Les variations de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments en fonction des angles d'élévation et d'azimut dans la bande de fréquences des 5 GHz ont été mesurées pour différentes positions dans un bâtiment de huit étages, sur trois étages différents. On a utilisé un hélicoptère pour simuler un émetteur de satellite. Le signal reçu a été enregistré de façon continue, ainsi que la position de l'hélicoptère repérée par un récepteur de système mondial de radiorepérage (GPS) différentiel. Les conditions expérimentales et les résultats correspondant aux moyennes des mesures sont résumés dans le Tableau 6. La Fig. 2 indique la variation de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments en fonction de l'angle d'élévation du trajet. La Fig. 3 présente la variation de cet affaiblissement en fonction de l'azimut, pour des angles d'élévation de 15° et de 30°.

La variation de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments en fonction de l'angle d'élévation a également été mesurée dans la bande des 5 GHz pour deux angles d'élévation différents, en utilisant des bâtiments de grande hauteur pour simuler la réception de signaux de satellite. Dans une pièce de type bureau, les valeurs médianes mesurées pour l'affaiblissement supplémentaire de pénétration dans les bâtiments étaient respectivement de 20 et 35 dB pour des angles d'élévation de 15° et 55°.

FIGURE 1



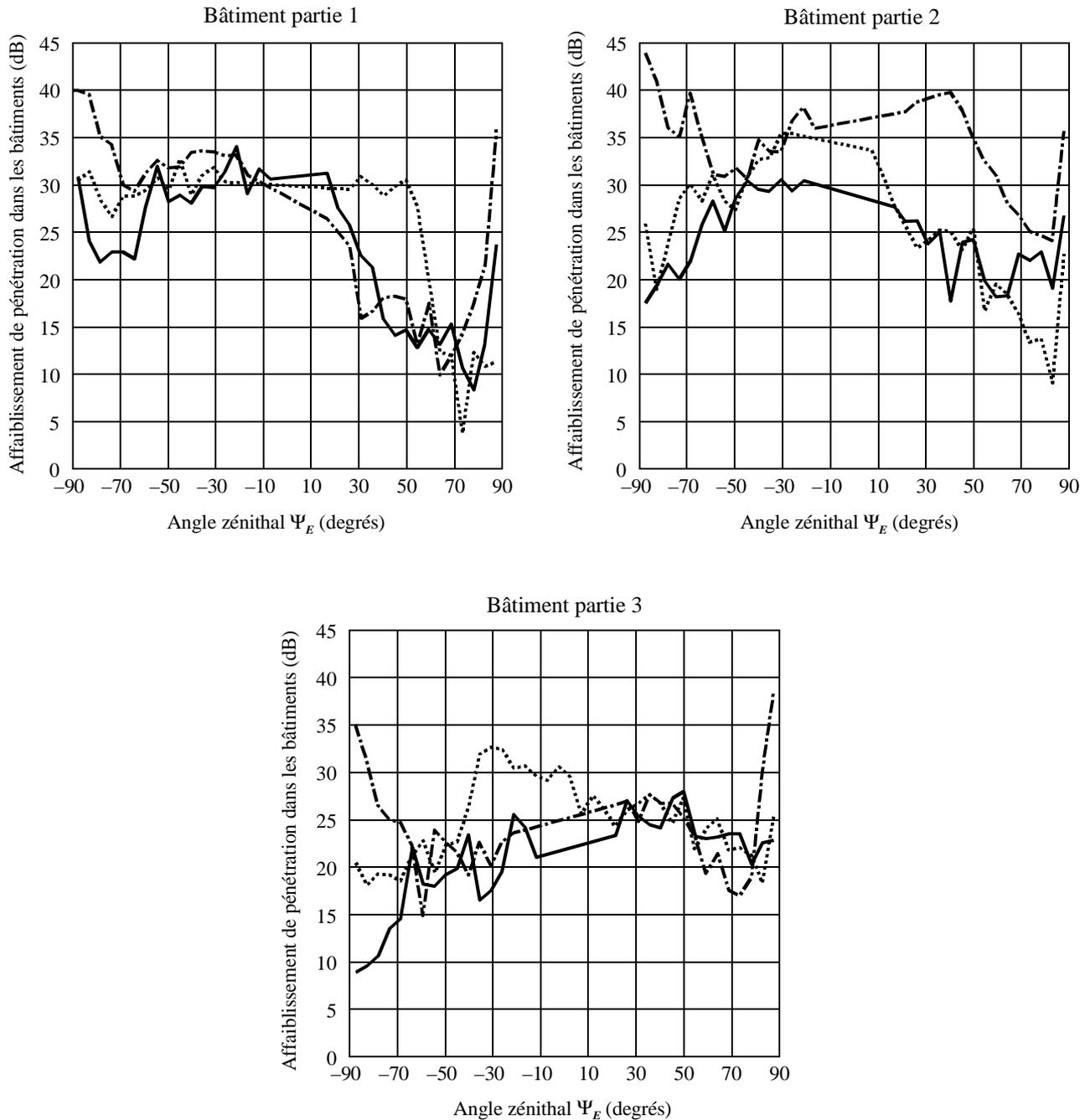
 Gamme nominale des valeurs mesurées
 95%-5%
 Niveau médian

Niveaux médian, à 5% et à 95% de perte de puissance d'entrée dans les bâtiments en fonction d'une propagation sans obstacle en visibilité directe à 1,6 GHz et 2,5 GHz pour les 6 bâtiments mentionnés au Tableau 5 (désignés par les chiffres 1 à 6 dans la Figure). Pour chaque bâtiment, les statistiques correspondant à 1,6 GHz (L) et à 2,5 GHz (S) sont indiquées séparément.

FIGURE 2

Affaiblissement de pénétration dans les bâtiments à 5,1 GHz pour les parties 1, 2 et 3 des étages numéros 2, 5 et 6. L'angle Ψ_E est défini positivement vers le nord et négativement vers le sud.

$$|\Psi_E| = 90^\circ - \epsilon \text{ où } \epsilon \text{ est l'angle d'élévation}$$



- Etage 2
- Etage 5
- Etage 6

Bâtiment partie 1: pièces avec fenêtres faisant face à l'hélicoptère à bord duquel est embarqué l'émetteur.

Bâtiment partie 2: centre du couloir.

Bâtiment partie 3: pièces avec fenêtres ne faisant pas face à l'hélicoptère à bord duquel est embarqué l'émetteur.

FIGURE 3

Affaiblissement de pénétration dans les bâtiments à 5,1 GHz pour des angles d'élévation de 15° et 30°, pour quatre positions d'antenne différentes à l'intérieur du bâtiment. Les positions 1 et 2 correspondent à des emplacements proches du mur extérieur, alors que les positions 3 et 4 se sont situées dans le couloir

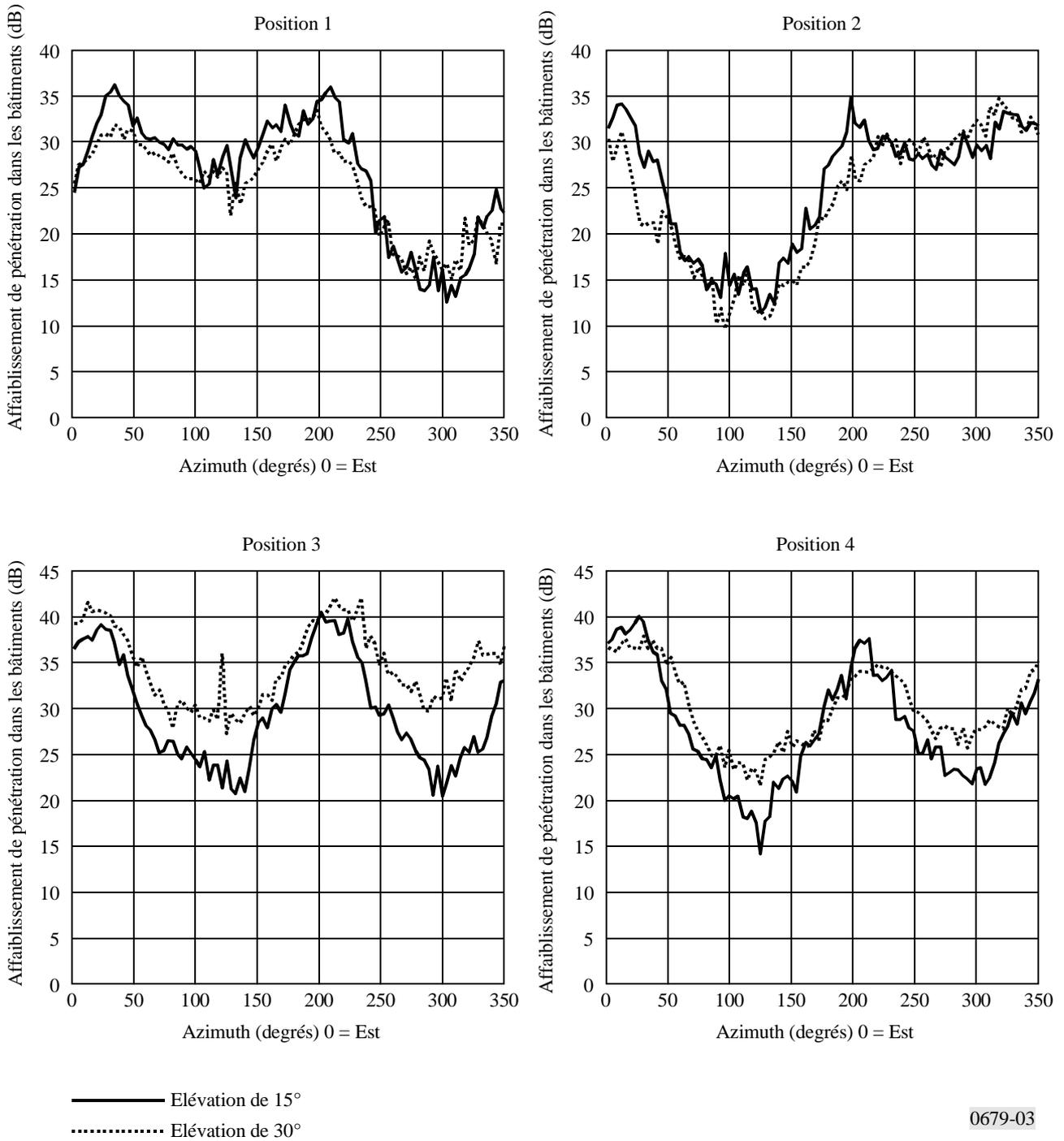


TABLEAU 6

Moyenne des valeurs médianes de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments, et dynamique observée des valeurs médianes de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments. Mesures effectuées à 5,1 GHz pour différentes positions dans un bâtiment de type bureaux administratifs

	Type de mesures: (trajectoire de l'hélicoptère)	Moyenne des valeurs médianes de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments pour différentes positions du récepteur dans le bâtiment (dB)	Dynamique observée pour les valeurs médianes de l'affaiblissement de pénétration dans les bâtiments (dB)
Bâtiment de huit étages avec sept étages au-dessus du sol et un étage supplémentaire situé sur le toit, des murs de brique et des fenêtres se succédant par rangée: derrière le mur de brique se trouve un mur en béton de 10 cm d'épaisseur; des fenêtres constituées de deux couches de verre plat non thermique, des étages séparés de 3,5 m avec 2,5 m entre le sol et le plafond, deux couches de plâtre séparées par des lattes de bois séparent les pièces; les murs intérieurs faisant face au couloir sont pour la plupart en verre, les pièces étant meublées de façon classique par des bureaux et des étagères; chaque étage comprend trois parties, un couloir avec des bureaux de chaque côté	Mesures en fonction de l'angle d'élévation (linéaire, perpendiculaire à la longueur du bâtiment)	19,1	~ 5-45
	Mesures en fonction de l'angle d'azimut (circulaire, à des angles d'élévation de 15° et 30°)	22,3	~ 10-42

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'utilisateur 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 90^e 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 90^e 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 dûs 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 réfléchiée 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.
