

Propagation des ondes radioélectriques à travers l'atmosphère

par **Laurent CASTANET**

Ingénieur de recherche
Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA)

et **Patrick LASSUDRIE-DUCHESNE**

Directeur d'études
École nationale supérieure des télécommunications de Bretagne

1. Propagation à travers la troposphère	E 1 163 –	2
1.1 Atténuation	–	2
1.1.1 Atténuation due aux gaz	–	2
1.1.2 Atténuation due aux nuages	–	3
1.1.3 Atténuation due à la pluie	–	3
1.2 Scintillation	–	5
1.3 Dépolarisation	–	5
1.4 Augmentation de la température de bruit des antennes	–	6
1.5 Conclusion	–	6
2. Propagation à travers l'ionosphère	–	7
2.1 Indice de réfraction de l'ionosphère	–	7
2.2 Retard de groupe	–	7
2.3 Dispersion fréquentielle	–	8
2.4 Effet Faraday	–	8
2.5 Scintillations ionosphériques	–	8
2.6 Conclusion	–	9
Pour en savoir plus	Doc. E 1 163	

Une liaison radioélectrique entre le sol et un satellite traverse l'**atmosphère terrestre**. Celle-ci comporte deux régions susceptibles d'influencer la propagation des ondes : la troposphère et l'ionosphère.

La **troposphère** désigne les couches basses de l'atmosphère où se produisent les phénomènes météorologiques. Ceux-ci ont une influence notable sur la propagation Terre-espace. En règle générale, cette influence tend à augmenter avec la fréquence de l'onde.

L'**ionosphère** est une région de la haute atmosphère où les composants sont partiellement ionisés par le rayonnement solaire. Cette ionisation exerce également une influence sur la propagation des ondes. À l'inverse de la troposphère, les effets ionosphériques sont prépondérants aux basses fréquences, en dessous de 1 GHz, et diminuent avec la fréquence.

1. Propagation à travers la troposphère

La troposphère est la région de l'atmosphère, comprise entre le sol et environ 12 km d'altitude, où se produisent les phénomènes météorologiques. L'air sec, dont la densité décroît quasi exponentiellement avec l'altitude ainsi que la présence de vapeur d'eau en quantité variable confèrent à ce milieu un indice de réfraction légèrement supérieur à l'unité et provoque une absorption des ondes électromagnétiques. Les hydrométéores (pluie, neige, grêle, nuages, brouillard) provoquent une absorption supplémentaire dépendant des conditions météorologiques locales.

La troposphère induit des effets de propagation notables sur les liaisons Terre-satellite pour des fréquences supérieures à 5 GHz. Pour les fréquences comprises entre 1 GHz et 1 000 GHz, ces effets troposphériques peuvent être classifiés en quatre grandes catégories : l'atténuation (§ 1.1), la scintillation (§ 1.2), la dépolarisation (§ 1.3) et l'augmentation de la température de bruit des antennes (§ 1.4).

1.1 Atténuation

L'atténuation est un effet qui se traduit par une perte du signal reçu en raison d'un phénomène d'absorption dû à la présence de particules gazeuses ou d'hydrométéores le long de la liaison. Aux fréquences comprises entre 1 et 1 000 GHz, les constituants gazeux qui interviennent sont l'air sec (essentiellement l'oxygène moléculaire) et la vapeur d'eau. Les hydrométéores qui atténuent les signaux reçus sont principalement les nuages et les précipitations (pluie, neige).

1.1.1 Atténuation due aux gaz

Aux fréquences inférieures à 1 000 GHz, l'atténuation due à l'air clair est essentiellement provoquée par l'oxygène moléculaire présent dans l'atmosphère. Le spectre de l'oxygène moléculaire se caractérise par un spectre de raies d'absorption à différentes fréquences (figure 1) dont une série de raies rapprochées entre 50 et 70 GHz qui forment un continuum de raies d'absorption aux faibles latitudes (pour des valeurs élevées de la pression atmosphérique). D'autres raies isolées sont également présentes, notamment à 118,7 GHz ainsi qu'à des fréquences supérieures à 300 GHz.

La forme de ces raies d'absorption dépend de deux paramètres météorologiques : la pression et la température moyenne annuelle. La température moyenne annuelle peut être obtenue n'importe où à la surface du globe grâce à la carte donnée par la recommandation ITU-R P.1511 (figure 2).

La recommandation ITU-R P.676 permet de calculer la distribution cumulative de l'atténuation due à l'oxygène sur le trajet considéré aux différentes fréquences (figure 3) en fonction de la pression et de la température moyenne annuelle.

L'atténuation due à la vapeur d'eau se caractérise également par un spectre de raies d'absorption avec des pics de résonance situés à 22,23, 183 et 320 GHz (voir figure 1), ainsi qu'à d'autres raies en ondes millimétriques et dans l'infrarouge. La forme de ces raies d'absorption dépend de trois paramètres météorologiques : la pression, la température et la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. Le contenu intégré en vapeur d'eau peut être obtenu n'importe où à la surface du globe grâce aux cartes données par la recommandation ITU-R P.836 (figure 4).

La recommandation ITU-R P.676 permet de calculer l'atténuation due à la vapeur d'eau sur le trajet considéré aux différentes fréquences (figure 5) en fonction de la pression, de la température moyenne annuelle et surtout du contenu intégré en vapeur d'eau (défini comme le contenu intégré en vapeur d'eau dans une colonne de 1 m² de section).

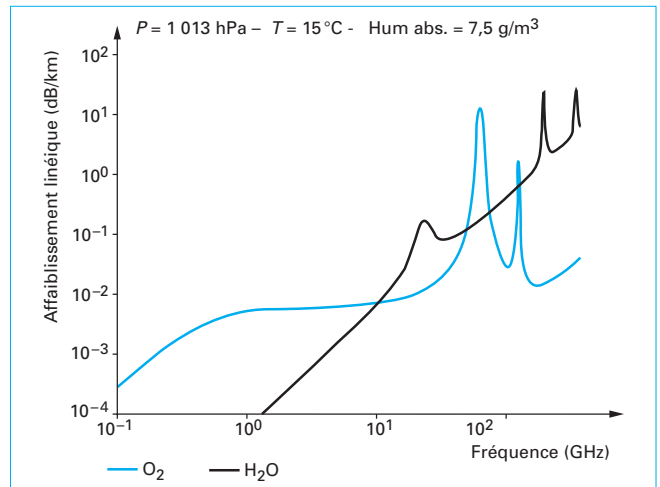


Figure 1 – Variation en fréquence de l'affaiblissement linéique dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau calculé par la recommandation ITU-R P.676

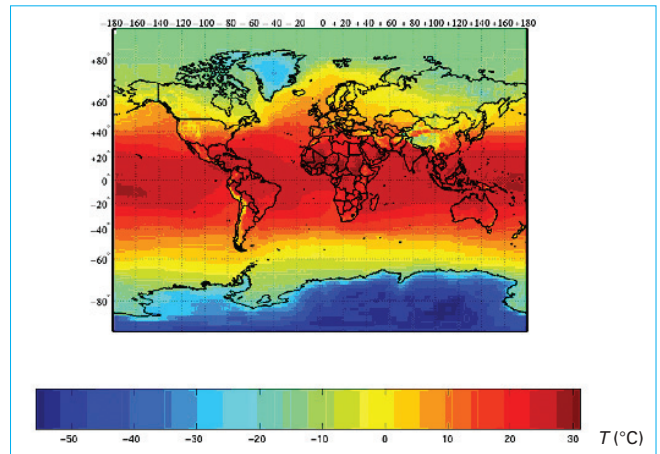


Figure 2 – Température annuelle moyenne à la surface de la mer

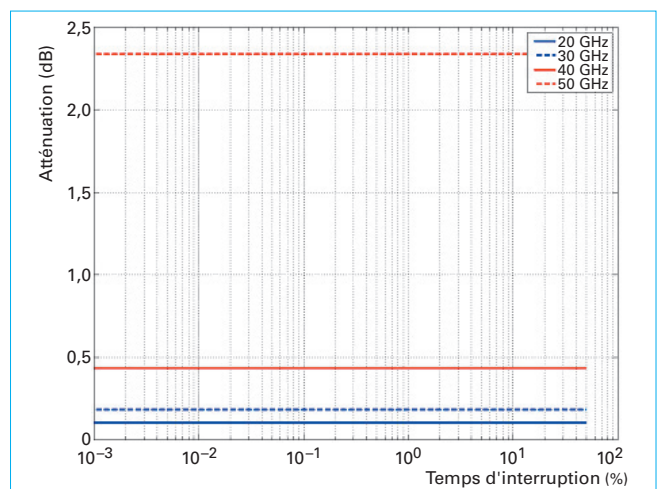


Figure 3 – Distribution cumulative d'atténuation due à l'oxygène prédite par la recommandation ITU-R P.676, ville de Milan, liaison à 38' d'élévation

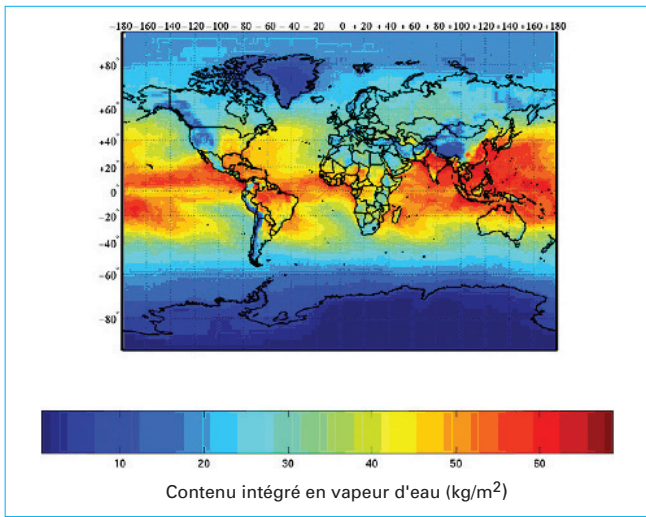


Figure 4 – Contenu intégré en vapeur d'eau dépassé pendant 1 % d'une année moyenne

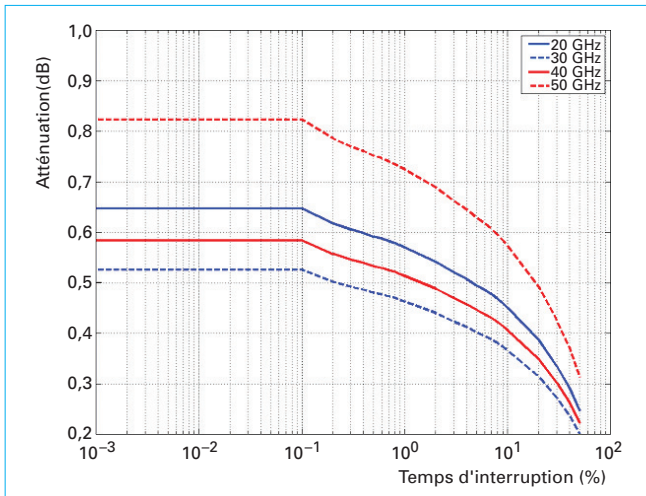


Figure 5 – Distribution cumulative d'atténuation due à la vapeur d'eau prédite par la recommandation ITU-R P.676, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

1.1.2 Atténuation due aux nuages

Les nuages et les brouillards sont constitués de gouttes d'eau en suspension qui peuvent être considérées comme de taille négligeable par rapport à la longueur d'onde pour des fréquences inférieures à 300 GHz. L'approximation de Rayleigh de la théorie de la diffusion de Mie peut alors être utilisée pour calculer l'atténuation due aux nuages en fonction de deux paramètres météorologiques : le contenu en eau liquide des nuages et la température dans le nuage. La figure 6 présente la variation en fréquence du coefficient d'affaiblissement linéique dû aux nuages.

Le contenu intégré en eau liquide peut être obtenu n'importe où à la surface du globe grâce aux cartes données par la recommandation ITU-R P.840 (figure 7).

La recommandation ITU-R P.840 permet de calculer l'atténuation due aux nuages sur le trajet considéré aux fréquences inférieures à 100 GHz (figure 8) en fonction du contenu intégré en eau liquide (défini comme le contenu intégré en eau liquide dans une colonne de 1 m² de section).

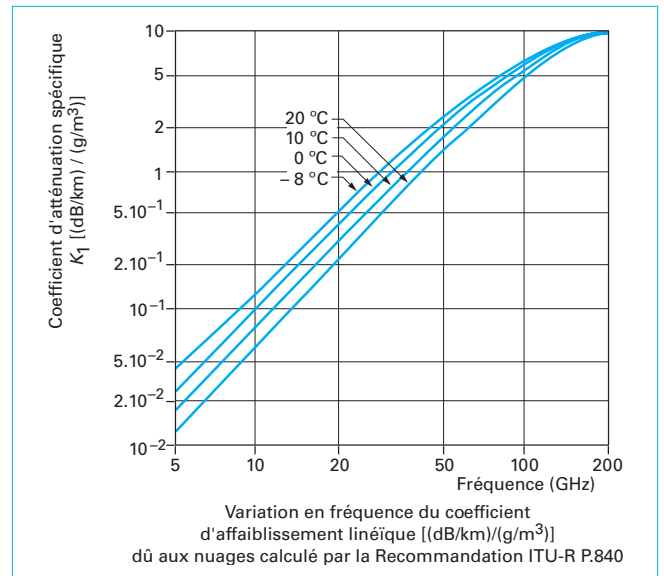


Figure 6 – Variation en fréquence du coefficient d'affaiblissement linéique dû aux nuages calculé par la recommandation ITU-R P.840

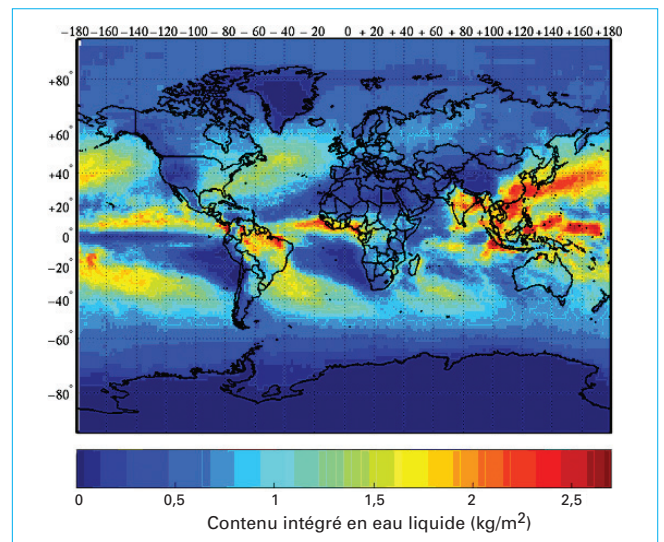


Figure 7 – Contenu intégré en eau liquide dépassé pendant 1 % d'une année moyenne

1.1.3 Atténuation due à la pluie

L'atténuation due à la pluie est l'effet d'atténuation dominant pour les communications par satellite opérant dans la bande de fréquence de 10 à 50 GHz. L'atténuation linéique due à la pluie augmente avec la quantité d'eau précipitante et peut être déterminée à partir de l'intensité de la précipitation (exprimée en mm/h) comme indiqué sur la figure 9. Aux fréquences inférieures à 15 GHz, ce paramètre est suffisant pour calculer l'atténuation linéique due à la pluie car les gouttes de pluie sont alors de dimension faible devant la longueur d'onde. Aux fréquences supérieures à 20 GHz, la distribution du diamètre des gouttes de pluie influence l'atténuation due à la pluie, deux distributions de gouttes différentes pouvant donner lieu à deux valeurs différentes d'atténuation pour une même intensité de précipitation.

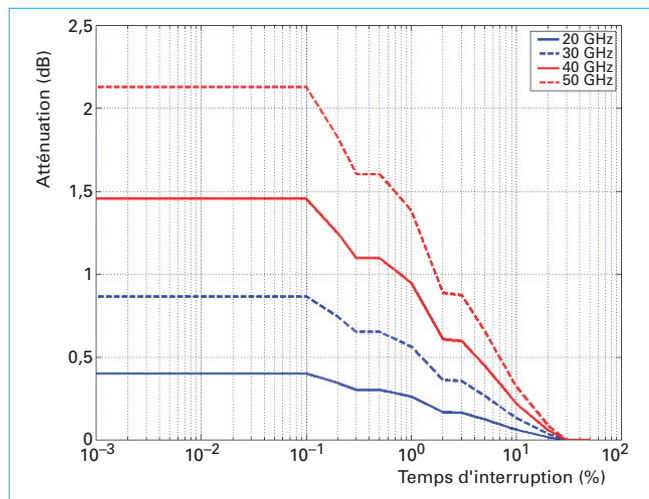


Figure 8 – Distribution cumulative d'atténuation due aux nuages prédite par la recommandation ITU-R P.840, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

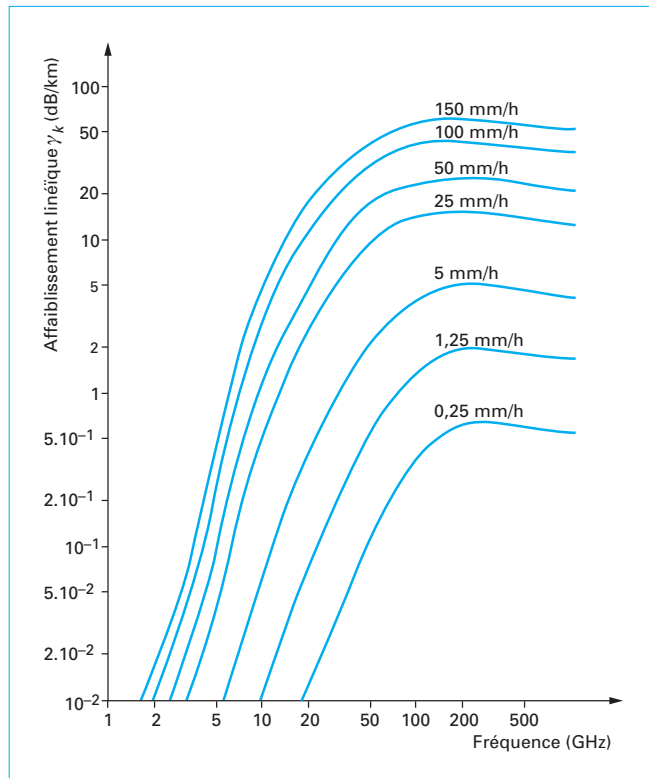


Figure 9 – Variation en fréquence de l'affaiblissement linéique dû à la pluie calculé par la recommandation ITU-R P.838

Comme la pluie présente une variabilité importante à la fois dans l'espace et dans le temps, l'intensité de précipitation dépend de la probabilité d'occurrence ou, en d'autres termes, du pourcentage du temps, ainsi que des caractéristiques climatiques. Des modèles statistiques doivent donc être utilisés pour caractériser l'intensité de précipitation. La distribution de l'intensité de précipitation peut être prédite en tout point de la planète grâce à la recommandation ITU-R P.837 (figures 10 et 11).

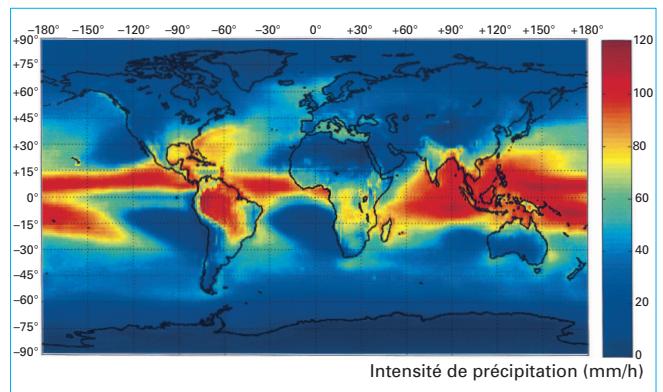


Figure 10 – Intensité de précipitation dépassée pendant 0,01 % d'une année moyenne prédite par la recommandation ITU-R P.837-5

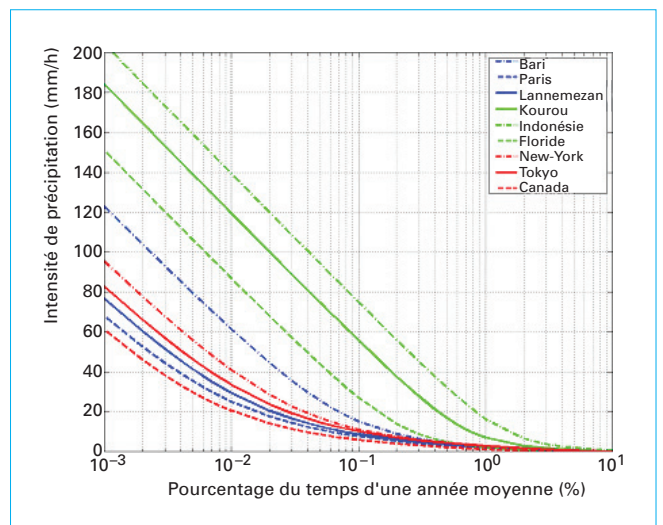


Figure 11 – Exemples de distributions cumulatives d'intensité de précipitation prédites par la recommandation ITU-R P.837

Par ailleurs, la variabilité spatiale des précipitations présente un fort impact sur l'atténuation due à la pluie subie par une liaison. Deux grandes catégories de précipitations peuvent être identifiées : d'une part, les **précipitations stratiformes** qui sont des précipitations d'intensité modérée s'étendant sur des distances très importantes (quelques centaines de kilomètres) et survenant principalement en hiver et au printemps et, d'autre part, les **précipitations convectives** qui sont des précipitations intenses relativement confinées à l'intérieur de cellules de pluie (quelques kilomètres) et survenant principalement à la fin du printemps, en été et à l'automne pour les latitudes tempérées. Les dimensions du volume de pluie et l'intensité des précipitations dépendent du type de pluie ; la hauteur de pluie est un autre paramètre important qui va conditionner l'importance de l'atténuation sur le trajet considéré. La recommandation ITU-R P.839 permet de prédire la hauteur de pluie en tout point du globe (figure 12) en assimilant celle-ci à l'altitude de l'isotherme $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La recommandation ITU-R P.618 permet de calculer l'atténuation due à la pluie sur le trajet considéré (figure 13) en fonction des caractéristiques géométriques (altitude et latitude de la station terrestre, élévation), des caractéristiques radioélectriques (fréquence, polarisation) de la liaison ainsi que de l'intensité de précipitation dépassée pendant 0,01 % d'une année moyenne et de la hauteur de pluie moyenne annuelle.

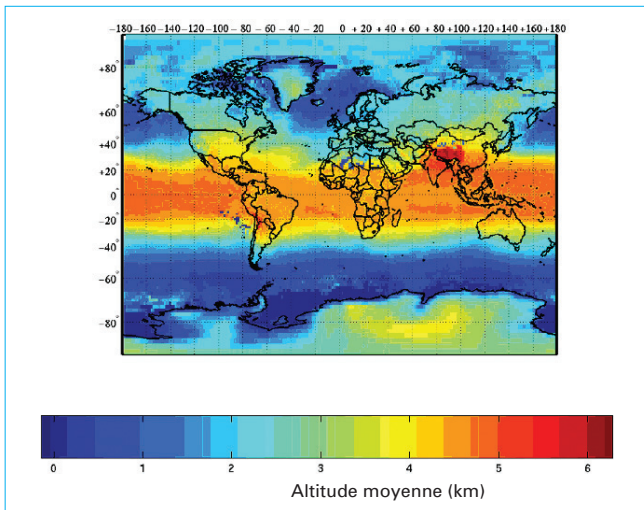


Figure 12 – Altitude moyenne annuelle de l'isotherme 0 °C au-dessus du niveau moyen des océans prédit par la recommandation ITU-R P.839

1.2 Scintillation

La scintillation est le résultat de fluctuations rapides d'amplitude, de phase et d'angle d'arrivée des signaux reçus à la traversée de l'atmosphère. Sur les liaisons Terre-satellite, de la **scintillation ionosphérique** ou de la **scintillation troposphérique** peut être observée suivant la bande de fréquence considérée. Pour les fréquences supérieures à 10 GHz, la scintillation troposphérique est le seul phénomène responsable de fluctuations rapides de signal parce que la scintillation ionosphérique diminue en fonction de la fréquence alors que c'est le contraire pour la scintillation troposphérique.

La scintillation troposphérique est due à des inhomogénéités à petite échelle de l'indice de réfraction provoquées par la présence de turbulence atmosphérique dans les basses couches de la troposphère. Sur les liaisons Terre-satellite, les effets de scintillation les plus pénalisants sont attribués à de fortes turbulences dans les nuages et lors des épisodes d'air clair au cours des périodes chaudes de l'année.

Du point de vue météorologique, la scintillation troposphérique augmente essentiellement en fonction de la température et de l'humidité (ou de la partie humide du co-indice de réfraction qui peut être calculée à partir de la recommandation ITU-R P.453) (figure 14). L'intensité de la scintillation sera donc importante lors des périodes les plus chaudes de la journée, en été et dans les régions de forte humidité comme les régions tropicales et équatoriales.

Du point de vue radioélectrique, l'intensité de la scintillation troposphérique augmente avec la fréquence et l'angle d'élévation et diminue avec la taille d'antenne. La recommandation ITU-R P.618 permet de calculer la profondeur d'évanouissement due à la scintillation sur le trajet considéré (figure 15) en fonction des caractéristiques géométriques (altitude et latitude de la station terrienne, élévation), des caractéristiques radioélectriques (fréquence, polarisation, diamètre et rendement d'antenne) de la liaison ainsi que de la valeur médiane de la partie humide du co-indice de réfraction.

1.3 Dépolarisation

La réutilisation de polarisation est une méthode qui permet de doubler la capacité d'un système en transmettant les informations simultanément sur les deux polarisations orthogonales. Cependant, des effets atmosphériques peuvent limiter les performances système en terme d'isolation entre polarisations.

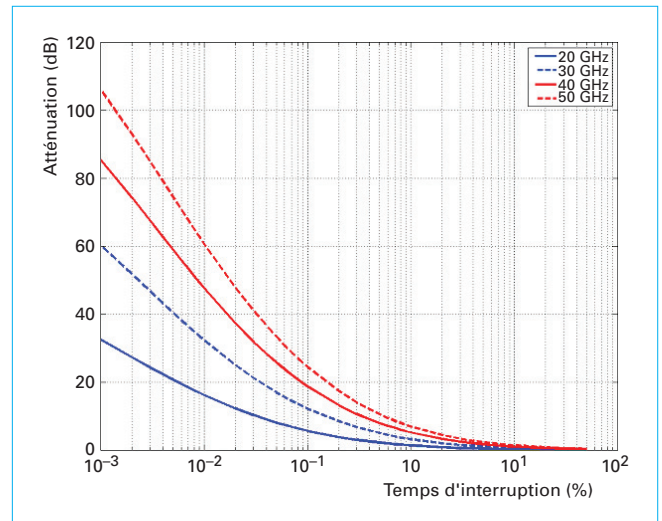


Figure 13 – Distribution cumulative d'atténuation due à la pluie prédite par la recommandation ITU-R P.618, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

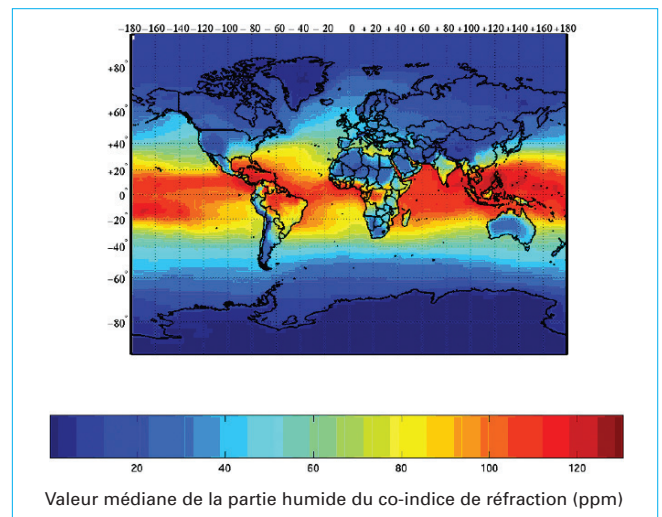


Figure 14 – Valeur médiane de la partie humide du co-indice de réfraction prédit par la recommandation ITU-R P.453

Ces effets de dépolarisation sont différents dans l'ionosphère et dans la troposphère. Pour les fréquences supérieures à 10 GHz, les effets ionosphériques comme la rotation Faraday peuvent être négligés. La dépolarisation dans la troposphère est quant à elle causée par la présence d'hydrométéores non sphériques (gouttes de pluie, cristaux de glace, flocons de neige...), et cet effet est renforcé s'ils suivent une trajectoire oblique. Cela entraîne alors des valeurs d'atténuation différentielle et de phase différentielle différente sur chaque direction de polarisation orthogonale, entraînant une rotation du plan de polarisation et donc une augmentation du couplage entre les deux polarisations. Entre 10 et 15 GHz (bande Ku), la dépolarisation est provoquée essentiellement par les fortes précipitations (averses, orages) qui entraînent également de fortes atténuations. Dans la bande Ka (20 à 30 GHz) et plus particulièrement dans la bande Q/V (40 à 50 GHz), la dépolarisation due à la glace peut également atteindre des valeurs importantes (nuages de glace de haute altitude, couche de fusion des précipitations stratiformes qui produisent des atténuations simultanées plutôt modérées).

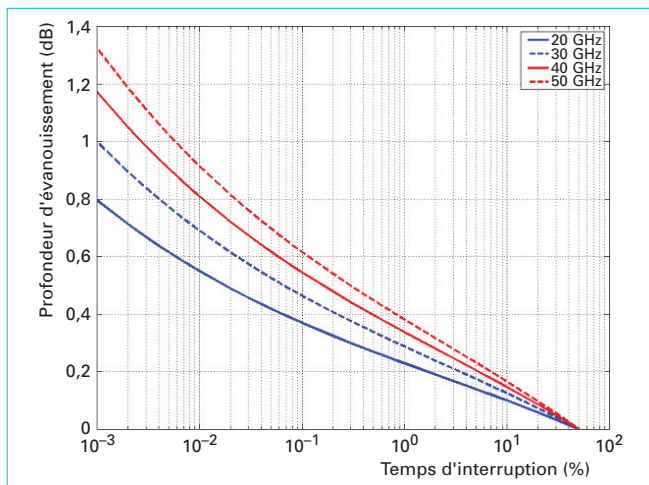


Figure 15 – Distribution cumulative de profondeur d'évanouissement due à la scintillation troposphérique prédite par la recommandation ITU-R P.618, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

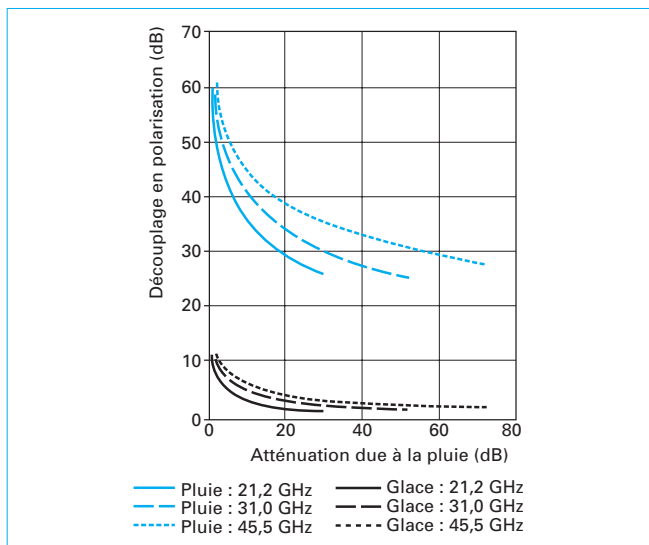


Figure 16 – Distribution cumulative du découplage en polarisation prédit par la recommandation ITU-R P.618, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

La dépolarisation due aux précipitations et à la glace peut être prédite grâce à la recommandation ITU-R P.618 (figure 16). Le calcul de la dépolarisation par la pluie est fonction de l'atténuation due à la pluie et d'un certain nombre de coefficients dépendant de la fréquence, de la polarisation, de l'élévation et de l'angle d'obliquité des gouttes de pluie. La dépolarisation due à la glace est quant à elle calculée à partir de la dépolarisation due à la pluie et d'une expression empirique fonction du pourcentage du temps.

1.4 Augmentation de la température de bruit des antennes

L'atténuation, la scintillation et la dépolarisation ne sont pas les seules causes de dégradation du bilan d'une liaison Terre-satellite. En effet, lorsqu'un phénomène d'absorption (gaz, nuages, pluie) est présent sur la liaison, la température du ciel augmente et par conséquent, la température de bruit des antennes de réception également.

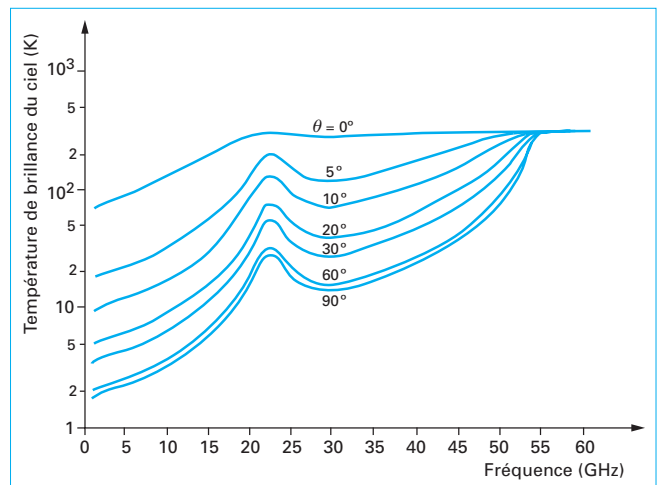


Figure 17 – Variation en fréquence de la température de brillance du ciel pour différents angles d'élévation

La recommandation ITU-R P.618 présente une méthode de prédiction pour estimer l'augmentation de la température de bruit des antennes de réception due à la présence d'une perturbation atmosphérique. La contribution atmosphérique à la température de bruit de l'antenne de réception est donnée par l'équation :

$$T_s = T_m \cdot (1 - 10^{-A/10})$$

où T_m est la température effective du milieu (comprise entre 260 °K et 280 K en conditions nuageuses ou en présence de pluie) et A l'atténuation atmosphérique sur le trajet.

En conditions d'air clair, la température de bruit d'une antenne s'exprime par la relation :

$$T_A = T_{ciel} + T_{sol}$$

En conditions nuageuses ou en présence de pluie, la température de bruit d'une antenne s'exprime par la relation :

$$T_A = \frac{T_{ciel}}{A} + T_s + T_{sol}$$

où T_{ciel} , température de bruit du ciel vu par l'antenne de réception, peut être estimée par la recommandation ITU-R P.372 (figure 17) et T_{sol} est la température de bruit captée par les lobes secondaires, diffus et arrière de l'antenne de réception.

Utilisant cette méthode de calcul, il est possible de calculer l'augmentation de la température de bruit d'une antenne et donc la dégradation correspondante de son facteur de mérite (ou G/T) causés par une atténuation donnée. Partant de la distribution cumulative d'atténuation, il est donc possible de calculer la distribution cumulative de la dégradation du facteur de mérite (voir exemple donné sur la figure 18).

1.5 Conclusion

Les effets de la troposphère sur la propagation Terre-espace sont : l'atténuation, la scintillation, la dépolarisation et l'augmentation de la température de bruit des antennes. D'une manière générale, ces effets augmentent avec la fréquence. Dans les gammes millimétriques, l'atténuation due aux hydrométéores et la scintillation ne peuvent plus être compensées par une marge fixe dans le bilan de liaison. Il convient alors d'avoir recours à des techniques de **compensation des affaiblissements de propagation** en adaptant en temps réel la puissance d'émission (amplification, gain d'antenne) ou la forme d'onde (codage, modulation, débit) ou en évitant les événements d'atténuation (dans l'espace ou dans le temps) [2].

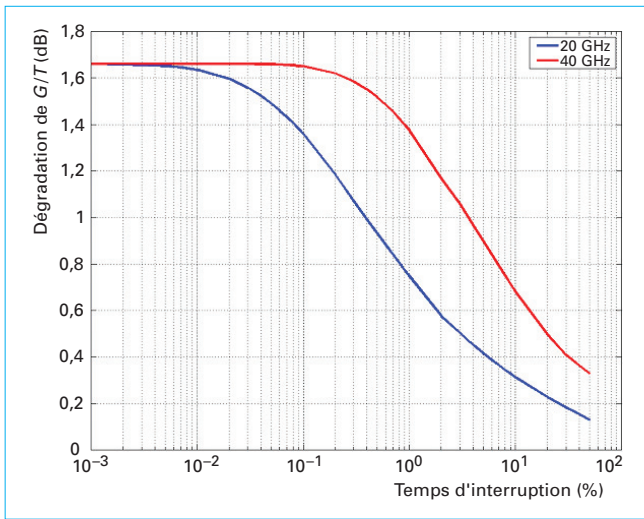


Figure 18 – Distribution cumulative de la dégradation du facteur de mérite d'une antenne de 1,20 m prédite par la recommandation ITU-R P.618, ville de Milan, liaison à 38° d'élévation

2. Propagation à travers l'ionosphère

Au-delà de 70 km d'altitude, on rencontre l'ionosphère. Il s'agit d'un milieu partiellement ionisé par le rayonnement solaire X et UV. L'ionisation produite pendant le jour se maintient la nuit en raison du faible taux de recombinaison entre les électrons et les ions à ces altitudes. L'ionisation se mesure par la concentration électronique N_e (nombre d'électrons libres par unité de volume) qui présente un maximum à une altitude comprise entre environ 250 km le jour et 400 km la nuit. La concentration électronique N_e dépend donc de l'altitude et de l'heure locale. Elle dépend également du lieu géographique et présente de fortes variations journalières. On constate que l'ionisation moyenne de l'ionosphère suit d'assez près les variations du cycle d'activité solaire.

Les électrons libres présents dans l'ionosphère interagissent avec une onde incidente pour modifier les caractéristiques de celle-ci, qui présente alors un changement de polarisation, une avance de phase et un retard de groupe par rapport à une propagation dans le vide. Le milieu de propagation ionosphérique présente une caractéristique importante : il est dispersif en fréquence. Cette propriété est souvent mise à profit dans les systèmes par satellites pour corriger les effets de l'ionosphère sur la propagation transionosphérique des signaux.

2.1 Indice de réfraction de l'ionosphère

La propagation d'une onde électromagnétique dans l'ionosphère est influencée par la présence d'électrons libres au sein du milieu. En l'absence de champ magnétique statique et en négligeant l'effet des collisions, ces derniers obéissent à une équation du mouvement de la forme :

$$m \frac{dv}{dt} = eE$$

où m est la masse de l'électron, e sa charge et v sa vitesse. E représente le champ électrique de l'onde incidente, supposée harmonique de la forme $\exp(j\omega t)$. Pour un milieu contenant N_e

électrons libres par unité de volume, le mouvement des électrons fait apparaître une densité de courant de conduction :

$$J_c = N_e e v = -j \frac{N_e e^2}{\omega m} E$$

D'après les équations de Maxwell, le courant de conduction J_c , le champ magnétique H et le déplacement électrique D de l'onde sont liés par :

$$\text{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} + J_c$$

avec $D = \epsilon_0 E$, d'où :

$$\text{rot} H = j\omega \epsilon_0 E + J_c = j\omega \epsilon_0 \left(1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}\right) E$$

Par analogie avec un diélectrique, on peut écrire :

$$\text{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} = j\omega \epsilon E$$

avec :

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}\right)$$

Les propriétés électromagnétiques du milieu ionosphérique peuvent donc être représentées par son indice de réfraction :

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$$

où f est la fréquence de travail (Hz) et f_p la fréquence plasma du milieu (Hz), donnée par la relation :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m}} \approx 9 \sqrt{N_e}$$

avec N_e en m^{-3} . La fréquence plasma peut s'interpréter comme représentant la fréquence propre de relaxation des électrons au sein du milieu.

Les fréquences utilisées pour les liaisons Terre-satellites sont en règle générale supérieures à 100 MHz. L'expression de n se simplifie alors :

$$n \approx 1 - 40,3 \frac{N_e}{f^2}$$

On remarque que l'on a toujours $n \leq 1$, ce qui implique que la vitesse de phase de l'onde $v_\phi = c/n$ est supérieure à la célérité c de la lumière. Une onde se propageant dans l'ionosphère présente donc une avance de phase par rapport à la propagation dans le vide. D'autre part, n dépend de la fréquence f de l'onde, ce qui signifie que le milieu ionosphérique est dispersif en fréquence. Une impulsion sera donc déformée lors de sa propagation dans l'ionosphère.

2.2 Retard de groupe

La vitesse de groupe v_g d'un signal électromagnétique représente la vitesse de propagation d'une modulation de la porteuse. On définit l'indice de groupe n_g d'une onde par la relation $v_g = c/n_g$. On montre [1] que n_g est lié à l'indice de réfraction n par la relation :

$$n_g = \frac{\partial}{\partial f} (nf)$$

Dans l'ionosphère, il vient :

$$n_g = \frac{1}{n} \approx 1 + 40,3 \frac{N_e}{f^2}$$

On a $v_g \leq c$, ce qui correspond à un retard de propagation, par rapport à une onde se propageant dans le vide. Ce retard est donné par :

$$\tau = \frac{1}{c} \int_S (n_g - 1) ds = \frac{40,3}{cf^2} \int_S N_e ds$$

Dans cette expression, S représente la trajectoire du rayon électromagnétique. En raison de la variation de l'indice en fonction de l'altitude, ce dernier est légèrement courbé. Cependant, aux fréquences qui nous intéressent, cette courbure peut en général être négligée et l'on a :

$$\tau \approx \frac{40,3}{cf^2} \int_L N_e ds$$

où L représente la ligne droite joignant le satellite à la station au sol. La quantité :

$$N_T = \int_L N_e ds$$

est le contenu électronique total (CET) qui constitue le principal paramètre servant à caractériser l'ionosphère pour la propagation Terre-espace. Il représente le nombre total d'électrons libres à l'intérieur d'un tube de section unité reliant la station au satellite. On notera l'usage courant de l'unité de CET (UCET) valant par convention 10^{16} électrons/m².

Le retard de groupe s'exprime de façon pratique par la relation :

$$\tau = 1,345 \times 10^{-7} \frac{N_T}{f^2}$$

avec τ en s, N_T en électrons/m² et f en Hz. La figure 19 représente le retard de groupe ionosphérique τ en fonction de la fréquence f , pour différentes valeurs du CET N_T .

2.3 Dispersion fréquentielle

De l'expression précédente, donnant le retard de propagation ionosphérique, on déduit le retard différentiel entre deux composantes d'un signal séparés en fréquence de Δf :

$$\Delta\tau = -2\tau \frac{\Delta f}{f}$$

2.4 Effet Faraday

Nous avons jusqu'ici négligé l'influence du champ magnétique terrestre sur le mouvement des électrons au sein de l'ionosphère. Bien que cette approximation soit légitime pour le calcul du temps de propagation, elle ne prend pas en compte le fait que les électrons tournent autour des lignes de force du champ géomagnétique. Un calcul plus complet [1] montre que le milieu devient biréfringent : il ne supporte que deux modes propres à polarisation quasi circulaire gauche et droite. Ainsi, une onde incidente polarisée linéairement se décompose à l'entrée de l'ionosphère en deux ondes à polarisation circulaire de sens contraire. Chacune de ces deux ondes se propage avec une vitesse légèrement différente, si bien qu'à la sortie de l'ionosphère, ces deux ondes se recombinaient en une onde à polarisation linéaire, mais dont le plan de polarisation sera différent du plan de polarisation de l'onde incidente. Une formule pratique pour calculer l'angle de rotation Faraday est :

$$\Omega = 2,36 B_{\text{moy}} \frac{N_T}{f^2}$$

où Ω est l'angle de rotation du plan de polarisation (en radians), B_{moy} est la valeur moyenne, selon l'altitude, de l'induction magnétique terrestre (en teslas), N_T le CET le long de la trajectoire (en électrons/m²) et f la fréquence (en gigahertz). La figure 20 montre des valeurs typiques de la rotation Faraday en fonction de la fréquence, pour différentes valeurs du CET.

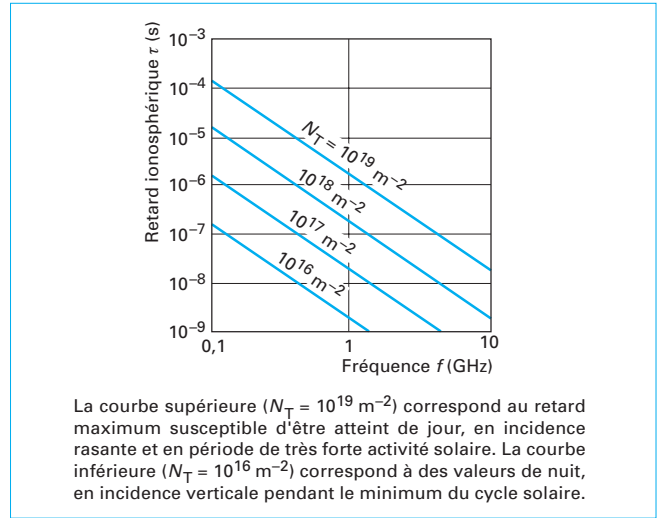


Figure 19 – Variation du retard de groupe ionosphérique en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du contenu électronique total N_T de l'ionosphère le long du trajet

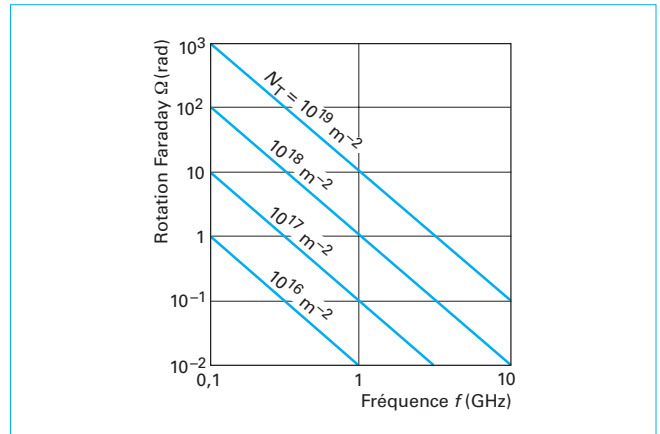


Figure 20 – Valeur typique de la rotation Faraday en fonction de la fréquence et du CET le long du trajet

2.5 Scintillations ionosphériques

La scintillation ionosphérique se manifeste par des fluctuations rapides de l'amplitude, de la phase et de la direction d'arrivée du signal reçu. On interprète ce phénomène comme étant dû à la présence, au sein du plasma ionosphérique, d'irrégularités de l'ionisation qui provoquent des phénomènes de diffraction et de diffusion de l'onde le long du trajet radioélectrique. La scintillation ionosphérique apparaît sous forme d'événements plus ou moins localisés dont la durée peut atteindre quelques heures. La figure 21 montre l'observation d'un tel événement.

Le paramètre le plus utilisé pour caractériser l'importance de la scintillation est l'indice de scintillation d'amplitude S_4 défini par :

$$S_4 = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle}$$

où I désigne l'intensité du signal reçu et $\langle \rangle$ la moyenne temporelle. On considère généralement que la scintillation est faible lorsque $0 < S_4 < 0,3$. Occasionnellement, S_4 peut atteindre ou même dépasser légèrement l'unité. On parle alors de régime de saturation.

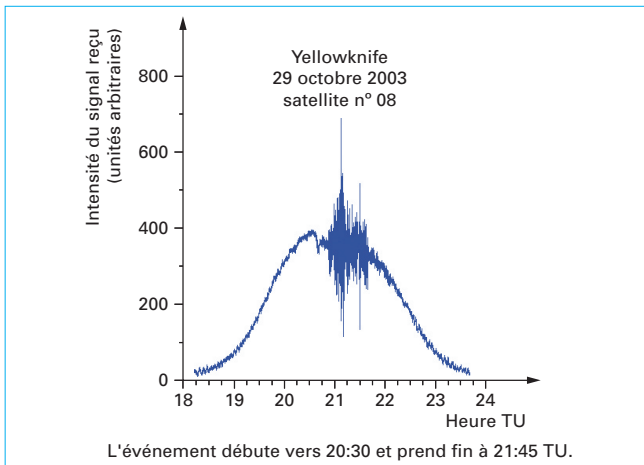


Figure 21 – Exemple de scintillations d’amplitude observées par le système GPS en une station aurorale

L'indice S_4 est lié aux variations crête à crête des fluctuations de puissance du signal (en décibels) par la relation empirique suivante :

$$P_{cc} = 27,5S_4^{1,26}$$

Ainsi, $S_4 = 0,3$ correspond à des fluctuations de puissance de l'ordre de 6 dB.

La probabilité d'occurrence d'un événement de scintillation d'importance donnée dépend du lieu géographique, de l'heure locale et du niveau d'activité solaire. Les régions géographiques les plus affectées par la scintillation ionosphérique sont, d'une part, la région située à $\pm 20^\circ$ de latitude de part et d'autre de l'équateur géomagnétique (scintillation équatoriale) et, d'autre part, les régions de haute latitude (scintillation aurorale). En règle générale, la scintillation se manifeste plus intensément la nuit que le jour. En région équatoriale et en période de forte activité solaire, les événements de scintillation se produisent fréquemment juste après le coucher du soleil aux altitudes ionosphériques (figure 22).

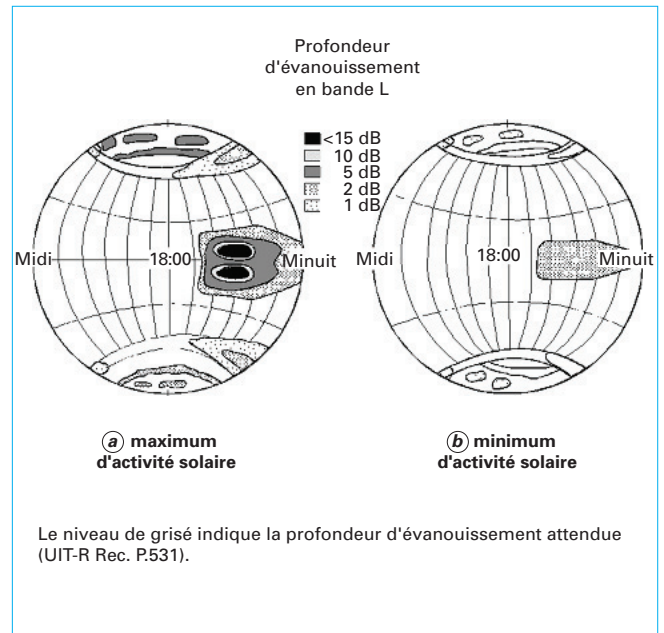


Figure 22 – Représentation schématique de l'intensité de la scintillation ionosphérique en bande L

2.6 Conclusion

Le tableau 1 résume l'incidence de la propagation ionosphérique sur les liaisons Terre-espace. On constate que les effets ionosphériques décroissent avec la fréquence. Les effets les plus importants sont, selon le type de système considéré, le retard de propagation, la rotation Faraday et les perturbations des signaux dues aux scintillations. On notera que, contrairement à la troposphère, l'absorption ionosphérique est négligeable au-dessus de 1 GHz.

Tableau 1 – Ordre de grandeur des principaux effets ionosphériques sur la propagation Terre-espace pour une traversée simple avec un angle d'élévation de 30° et pour un CET vertical de 10^{18} m^{-2}

Effet	Dépendance en fréquence	1 GHz	3 GHz	10 GHz
Rotation Faraday	$1/f^2$	108°	12°	$1,1^\circ$
Retard de propagation	$1/f^2$	$0,25 \mu\text{s}$	$0,028 \mu\text{s}$	$0,0025 \mu\text{s}$
Scintillation (latitudes équatoriales)	$\approx 1/f^{1,5}$	20 dB crête à crête	10 dB crête à crête	2 dB crête à crête
Dispersion fréquentielle	$1/f^3$	$0,4 \text{ ns/MHz}$	15 ps/MHz	$0,4 \text{ ps/MHz}$
Écart sur la direction d'arrivée	$1/f^2$	$12''$	$1,32''$	$0,12''$

Atmosphère
Ionosphère
Propagation
Radioélectrique
Satellite

Troposphère
CET
fr
UCET
fr