

RECOMMANDATION UIT-R P.843-1

COMMUNICATIONS UTILISANT LA PROPAGATION PAR IMPULSIONS MÉTÉORIQUES

(Question UIT-R 221/3)

(1992-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la diffusion par l'ionisation provoquée par les traînées météoriques constitue un moyen de communication commode en ondes décamétriques et métriques;
- b) que des circuits de télécommunication bidirectionnels fonctionnent sur des fréquences comprises entre 30 et 100 MHz, à des distances allant jusqu'à 1 800 km;
- c) que, pour ces communications, on tire parti de créneaux de propagation créés par les traînées météoriques et que l'on peut obtenir des débits d'information allant jusqu'à 100 Bd, lorsqu'ils sont moyennés sur une heure environ,

recommande

que les renseignements qui suivent soient utilisés lors de la conception et de la planification de systèmes de communications utilisant la propagation par impulsions météoriques.

1 Variations dans le temps du flux météorique

A certaines époques de l'année, les météores se manifestent sous forme d'averses qui peuvent être abondantes pendant des durées de quelques heures; il y a d'autre part un fond continu de météores qui arrivent sur la Terre en provenance de toutes les directions et seuls ces météores sporadiques sont à prendre en considération lorsque l'on planifie des systèmes de communication.

Aux latitudes moyennes, le taux horaire des météores sporadiques présente une variation diurne sensiblement sinusoïdale, le maximum ayant lieu à 06 h 00 et le minimum à 18 h 00 (heures locales). Le maximum et le minimum sont dans un rapport d'environ 1 à 4. Dans l'hémisphère Nord il existe une variation saisonnière d'importance comparable, avec un minimum en février et un minimum en juillet. Le taux horaire des météores sporadiques, comme des averses météoriques, présente une variabilité considérable d'un jour à l'autre.

Le flux annuel moyen de météores tombant sur une surface unitaire et donnant lieu à une densité linéique d'électrons q supérieure à un certain seuil q_0 (nombre d'électrons par mètre) est donné par:

$$I(q > q_0) = \frac{160}{q_0} \quad \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

En combinant ce taux global de météores avec une variation diurne sinusoïdale représentative et le facteur saisonnier M , tiré de la Fig. 1, les variations moyennes dans le temps du flux météorique peuvent s'exprimer comme suit:

$$\frac{160}{q_0} M \left[1 + 0,6 \left(\sin \frac{\pi T}{12} \right) \right] \quad \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

où:

T : temps local (h).

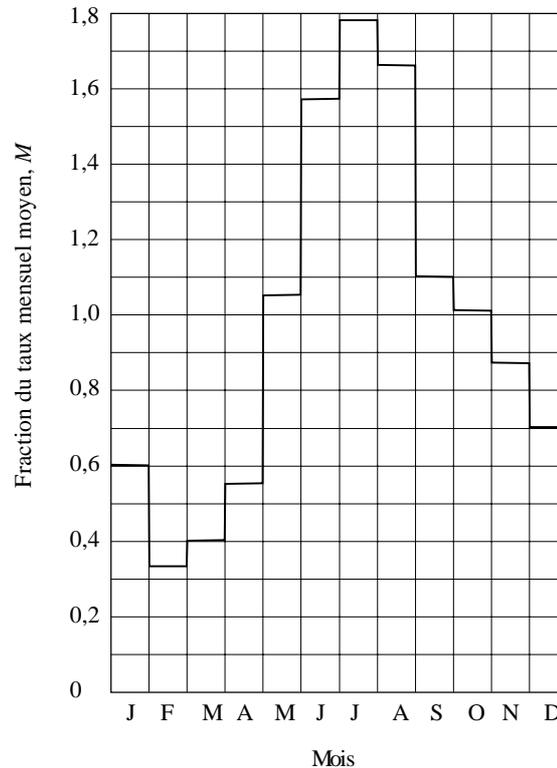
Pour les besoins de la planification, il peut suffire de considérer seulement la plus mauvaise combinaison du mois et du temps local.

2 Variation spatiale du flux météorique

Les météores se manifestent dans toutes les parties du monde et à toutes les heures mais les statistiques concernant leur distribution géographique et la direction des traînées sont encore incomplètes.

FIGURE 1

Variation d'un mois à l'autre du flux météorique sporadique par rapport à sa valeur moyenne



0843-01

En attendant que soient quantifiées les variations spatiales, il est recommandé d'utiliser les estimations de flux obtenues par la méthode exposée au § 1 pour toutes les latitudes.

3 Traînées de faible ou de forte densité

Selon l'intensité de l'ionisation qu'elles produisent, on classe les traînées météoriques en traînées de faible densité et en traînées de forte densité. La démarcation entre les deux cas se fait pour une densité linéique d'environ 2×10^{14} électrons par mètre. Pour calculer l'amplitude des signaux diffusés par une traînée de faible densité, on additionne les champs de diffusion produits par chaque électron individuellement. Les traînées de forte densité sont celles pour lesquelles le couplage entre les électrons ne peut pas être négligé; dans ce cas, on calcule les propriétés réfléchissantes comme si la traînée était un long cylindre métallique. Aux fréquences utilisées dans la pratique, les échos dus aux traînées de faible densité présentent un départ abrupt suivi d'une décroissance exponentielle, alors que ceux qui sont dus aux traînées de forte densité ont des enveloppes plus arrondies et sont de plus longue durée. La proportion des deux sortes d'écho dépend de la sensibilité du système.

La relation entre le nombre de traînées et l'amplitude maximale, A , peut être représentée approximativement par:

$$\text{nombre de traînées} \propto (A)^{-\psi}$$

où ψ varie de 1,0 pour les niveaux de signaux faibles à plus de 2,0 pour les signaux les plus forts lorsque les traînées sont de forte densité en grande majorité. Pour la plupart des liaisons, l'indice ψ est de l'ordre de 1,1 à 1,4.

Les résultats obtenus par les systèmes utilisés jusqu'à présent montrent que les échos proviennent de manière prédominante de traînées de faible densité. Se fondant sur cette constatation, il est recommandé de supposer, pour la planification d'un système typique, que toutes les traînées météoriques sont de faible densité.

4 Longueur équivalente et rayon des traînées météoriques

4.1 Longueur équivalente

La Fig. 2 représente la géométrie du trajet d'un rayon transmis par propagation météorique. T représente l'émetteur, R le récepteur, P le point de réflexion spéculaire et P' un point situé plus loin sur la traînée et tel que le trajet $R'_1 + R'_2$ soit supérieur d'une demi-longueur d'onde au trajet $R_1 + R_2$. Le segment PP', de longueur L , est donc tout entier dans la zone principale de Fresnel et la longueur totale de la traînée contenue à l'intérieur de cette zone est $2L$. A la condition que R_1 et R_2 soient beaucoup plus grands que L , on a :

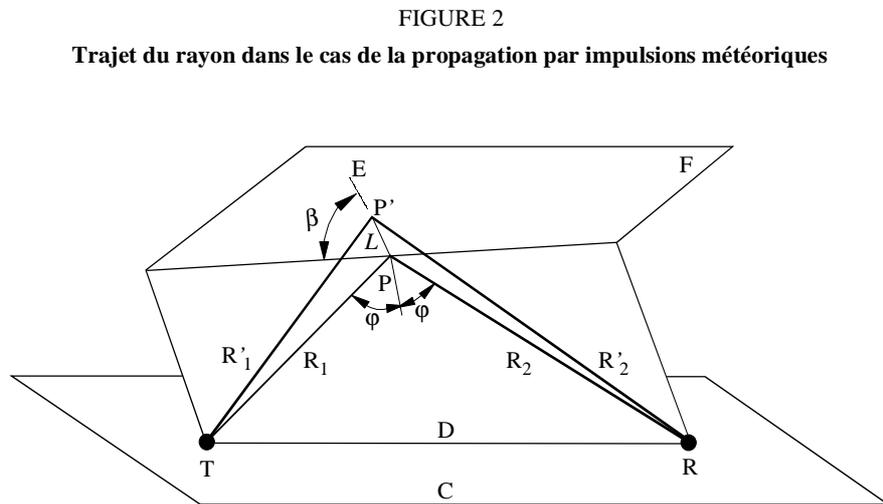
$$L = \left[\frac{\lambda R_1 R_2}{(R_1 + R_2) (1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \beta)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

formule dans laquelle :

φ : angle d'incidence

β : angle que fait l'axe de la traînée avec le plan de propagation

λ : longueur d'onde.



- C: surface de la Terre
- D: plan de propagation
- E: traînée météorique
- F: plan tangent
- β : angle de l'axe de la traînée et du plan de propagation
- T: émetteur
- R: récepteur

0843-02

4.2 Rayon des traînées

Pour évaluer la section droite de la diffusion de la traînée, on fait habituellement deux hypothèses; d'une part que, par suite de la diffusion ambipolaire, la densité radiale des électrons a une distribution gaussienne, d'autre part que la densité volumique est réduite alors que la densité linéique reste constante.

La traînée d'ionisation qui suit immédiatement un météore se forme quasi instantanément, avec une largeur finie. On l'appelle rayon initial de la traînée, r_0 . Une relation empirique entre r_0 et l'altitude du météore est:

$$\log r_0 = 0,035 h - 3,45 \quad (4)$$

où:

h : altitude de la traînée (km)

r_0 : rayon initial de la traînée (m).

5 Puissance reçue et affaiblissement de transmission de référence

5.1 Puissance reçue

La plupart des cas pratiques de transmission par impulsions météoriques font intervenir des traînées de faible densité, aussi les formules relatives au cas des traînées de forte densité sont-elles de moindre importance. On obtient des estimations satisfaisantes des performances en utilisant les formules relatives au cas de la faible densité et en admettant que les valeurs de q sont comprises entre 10^{13} et 10^{14} électrons par mètre, selon les paramètres du système.

La puissance reçue $p_R(t)$ après diffusion sur une traînée de faible densité est, aux fréquences utilisées dans la pratique, de:

$$p_R(t) = \frac{p_T g_T g_R \lambda^2 \sigma a_1 a_2(t) a_2(t_0) a_3}{64\pi^3 R_1^2 R_2^2} \quad (5)$$

formule dans laquelle:

- λ : longueur d'onde (m)
- σ : surface efficace de diffusion de la traînée (m²)
- a_1 : facteur d'affaiblissement dû au fait que le rayon initial de la traînée est fini
- $a_2(t)$: facteur d'affaiblissement dû à la diffusion de la traînée
- a_3 : facteur d'affaiblissement dû à l'absorption ionosphérique
- t : temps (s) mesuré à partir de l'instant de la formation complète de la première zone de Fresnel
- t_0 : moitié du temps mis par le météore pour traverser cette zone
- p_T : puissance de l'émetteur (W)
- $p_R(t)$: puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception (W)
- g_T : gain de l'antenne d'émission par rapport à une antenne isotrope en espace libre
- g_R : gain de l'antenne de réception par rapport à une antenne isotrope en espace libre.

Les antennes d'émission et de réception sont supposées sans pertes.

R_1, R_2 : distances (m) (voir la Fig. 2).

La surface σ est donnée par:

$$\sigma = 4 \pi r_e^2 q^2 L^2 \sin^2 \alpha \quad (6)$$

formule dans laquelle:

- r_e : rayon apparent de l'électron ($2,8 \times 10^{-15}$ m)
- α : angle que fait le vecteur champ électrique au point d'incidence sur la traînée avec la direction PR.

L^2 étant proportionnel à λ , la surface σ lui est également proportionnelle, de sorte que la puissance reçue, pour le cas d'une traînée de faible densité, varie comme λ^3 . La polarisation horizontale étant normalement utilisée aux deux extrémités, le facteur $\sin^2 \alpha$ de la formule (6) est sensiblement égal à 1 aux deux «points chauds».

Le facteur d'affaiblissement a_1 est donné par:

$$a_1 = \exp \left[- \frac{8 \pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (7)$$

Il représente l'affaiblissement créé par les interférences entre les rayonnements des électrons chaque fois que l'épaisseur de la traînée lors de sa formation est du même ordre que la longueur d'onde.

Le facteur d'affaiblissement $a_2(t)$ tient compte de l'augmentation du rayon de la traînée provoquée par la diffusion ambipolaire. On peut le représenter par:

$$a_2(t) = \exp \left[- \frac{32 \pi^2 D t}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (8)$$

où D est la constante de diffusion ambipolaire ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) donnée par:

$$\log D = 0,067 h - 5,6 \quad (9)$$

L'augmentation de ce rayon peut être appréciable, même pendant une durée aussi courte que celle qui est nécessaire pour la formation de la traînée. L'effet total, pour ce qui est de la puissance réfléchi, est le même que celui que l'on constaterait si la portion de la traînée contenue à l'intérieur de la première zone de Fresnel s'était en tous ses points étendue dans les mêmes proportions qu'en son point milieu. Cette portion de la traînée étant de longueur $2L$, le rayon au point milieu est celui que l'on observe après un délai de L/V (s) où V est la vitesse du météore (ms^{-1}). Appelant ce délai t_0 , pour les traînées voisines du point milieu ($R_1 \approx R_2 = R$), on a:

– pour les traînées perpendiculaires au plan de propagation ($\beta = 90^\circ$):

$$t_0 \simeq \left(\frac{\lambda R}{2 V^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

– pour les traînées situées dans le plan de propagation ($\beta = 0^\circ$):

$$t_0 \simeq \left(\frac{\lambda R}{2 V^2} \right)^{1/2} \cdot \sec \varphi \quad (11)$$

En portant dans la formule (8) la valeur de t_0 fournie par la formule (10), on obtient la formule:

$$a_2(t_0) = \exp \left[- \frac{32 \pi^2}{\lambda^{3/2}} \left(\frac{D}{V} \right) \left(\frac{R}{2} \right)^{1/2} \frac{1}{\sec^2 \varphi} \right] \quad (12)$$

valable pour le cas où $\beta = 90^\circ$. Pour le cas où $\beta = 0^\circ$, il convient de multiplier l'expression entre crochets de la formule précédente par $\sec \varphi$.

Le rapport de la constante de diffusion ambipolaire D à la vitesse V du météore, rapport qui intervient dans l'évaluation de la puissance reçue, peut se représenter approximativement par:

$$D / V = [0,0015 h + 0,035 + 0,0013 (h - 90)^2] 10^{-3} \quad (13)$$

$a_2(t)$ est le seul terme qui dépende du temps. Il fait connaître la durée d'extinction du signal réfléchi. Si l'on définit une constante de temps T_{un} comme étant le délai au bout duquel la puissance reçue a diminué dans le rapport de 1 à e^2 (c'est-à-dire de 8,7 dB), on trouve:

$$T_{un} = \frac{\lambda^2 \sec^2 \varphi}{16 \pi^2 D} \quad (14)$$

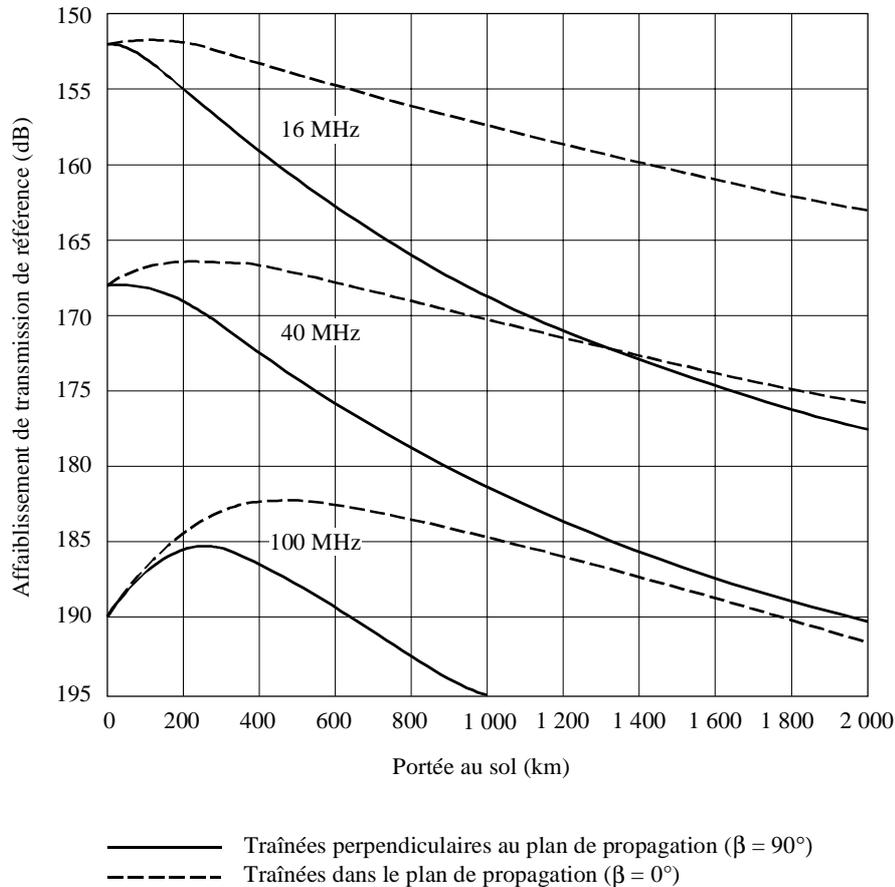
En incidence rasante, le facteur $\sec^2 \varphi$ est important et il en est par conséquent de même pour la constante de durée d'écho. Cette constante est d'ailleurs plus élevée si l'on utilise des fréquences plus basses.

5.2 Affaiblissement de transmission de référence

Les courbes représentant l'affaiblissement de transmission de référence déduites de la formule (5) pour $q = 10^{14}$ élections par mètre sont données sur la Fig. 3. L'angle β pouvant prendre n'importe quelle valeur entre 0° et 90° , il n'a été tenu compte que de ces deux cas extrêmes. On voit clairement qu'aux fréquences les plus basses l'affaiblissement de transmission de référence est plus avantageux. Pour tracer les courbes, on a pris pour altitudes moyennes des météores des valeurs déduites de la formule (15). Il convient de noter que la prévision des performances d'un système dépend de façon critique de la valeur admise pour l'altitude.

FIGURE 3

Affaiblissement de transmission de référence pour le cas de traînées météoriques de faible densité, donné par la formule (5) pour $q = 10^{14}$ électron/m et une polarisation horizontale



0843-03

6 Altitude maximale des échos dans le cas des traînées de faible densité et altitude moyenne des traînées

Le rayon initial de la traînée r_0 et la constante de diffusion ambipolaire D augmentent tous deux avec l'altitude. En conséquence, les influences des facteurs d'affaiblissement a_1 et $a_2(t_0)$ se combinent de manière à réduire le nombre des traînées de faible densité qui se produisent au voisinage du sommet de la région météorique et qui sont utiles aux fins des communications: d'où un effet de «plafond» des échos dans le cas des traînées de faible densité. On a constaté l'existence de restrictions du même genre dans le cas monostatique. La Fig. 4 représente la distribution mesurée des altitudes des échos sur des traînées de faible densité pour diverses fréquences de radar.

On voit que l'altitude minimale pour laquelle de tels échos se manifestent est de 85 km et que la distribution de leur altitude est sensiblement gaussienne à toute fréquence.

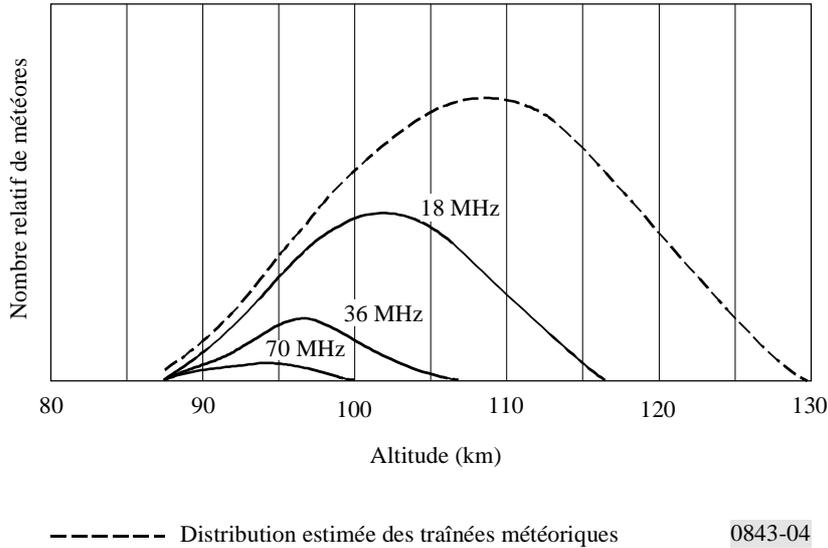
L'altitude moyenne, h (km), de la traînée à la fréquence f (MHz) est:

$$h = -17 \log f + 124 \quad (15)$$

L'altitude moyenne de la traînée est fonction d'autres paramètres du système, en plus de la fréquence. La formule (15) est cependant une bonne approximation.

FIGURE 4

Distribution, en fonction de la hauteur, des traînées météoriques de faible densité donnant lieu à des échos aux fréquences 18, 36 et 70 MHz



0843-04

7 Emplacements des régions où la diffusion est optimale

Les propriétés diffusantes des traînées rectilignes d'ionisation météorique sont essentiellement des cas d'espèce. Pour que cette diffusion soit utilisable, il faut que la traînée ionisée satisfasse à une condition de réflexion spéculaire, ce qui exige qu'elle soit tangente à un ellipsoïde allongé dont les foyers se trouvent à l'émetteur et au récepteur (voir la Fig. 2). On estime à 5%, dans la région du ciel la plus utile, le pourcentage des traînées de météores incidents que leur orientation rend utilisables. La Fig. 5 fait connaître ce pourcentage dans l'hypothèse où la distance entre les deux extrémités de la liaison est de 1 000 km. On peut voir que les régions optimales de diffusion se trouvent à une centaine de kilomètres de chaque côté du grand cercle reliant l'émetteur et le récepteur, quelle que soit la longueur du trajet.

La fraction p des traînées utiles, pour un trajet de longueur D' , peut être évaluée en utilisant la formule suivante:

$$p = \frac{4L}{3\pi D'} \frac{[3(\xi^2 - \eta^2) - (1 - \eta^2)] [(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2) - 4\xi^2 h^2 / D'^2] - 4\eta^2(\xi^2 - 1)h^2 / D'^2}{(\xi^2 - \eta^2)^2 (\xi^2 - 1) [(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2) - 4\xi^2 h^2 / D'^2]^{1/2}} \quad (16)$$

où:

$$\xi = (R_1 + R_2) / D'$$

$$\eta = (R_1 - R_2) / D'$$

8 Estimation du taux d'impulsions utile

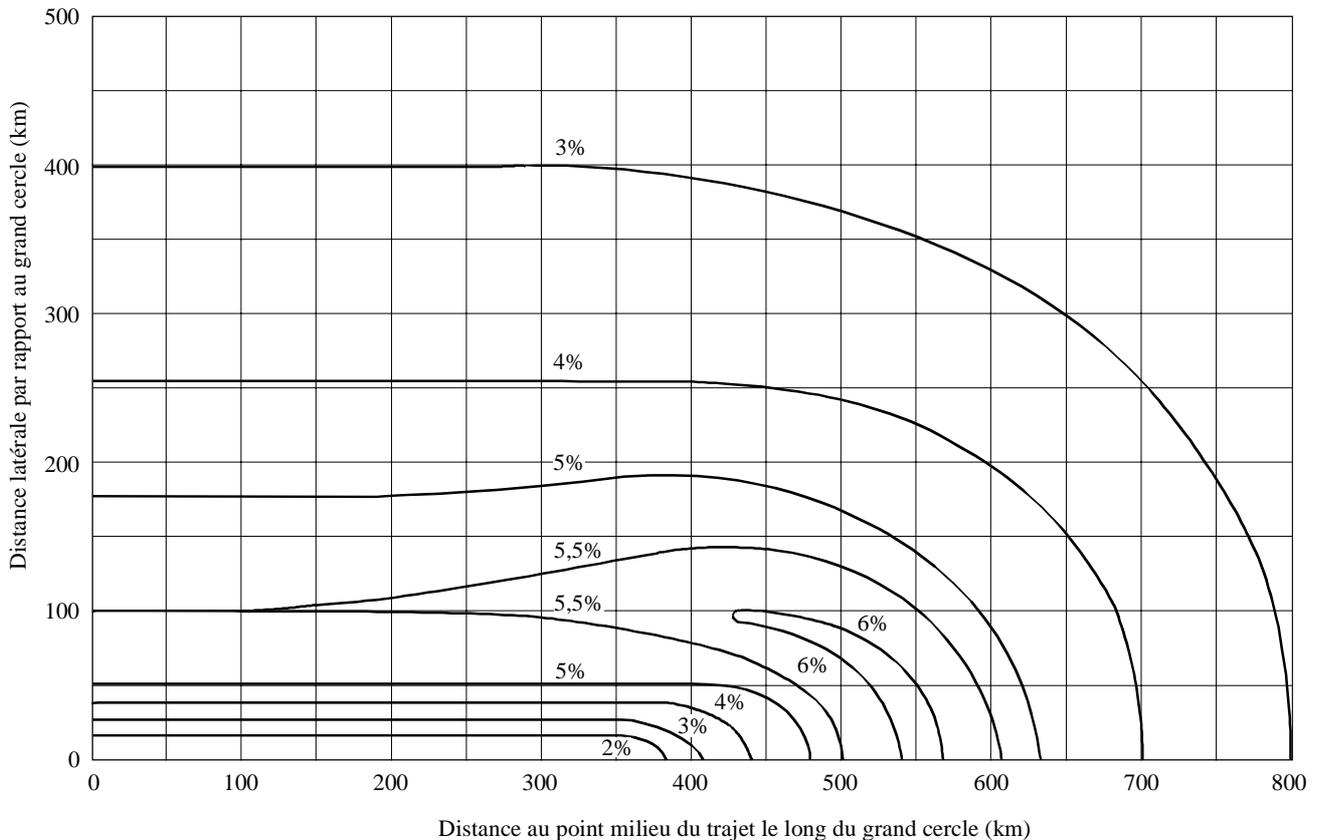
Le bilan de la puissance d'une liaison de communication utilisant la propagation par impulsions météoriques peut être évalué en utilisant l'altitude moyenne des traînées et d'autres paramètres traités ci-dessus. Lorsqu'une liaison apparaît viable, une analyse plus détaillée est nécessaire pour estimer le taux auquel des signaux seront transmis par impulsions météoriques.

Les méthodes les plus rigoureuses pour évaluer le taux utile d'impulsions impliquent les étapes suivantes:

- établir quelle est la puissance minimale du signal utile reçu;
- utiliser les équations du § 5 pour décrire les variations des paramètres du système;
- calculer la fraction des traînées utiles en fonction de la position de l'élément diffusant en utilisant l'équation (16);
- combinaison la distribution estimée de l'altitude réelle des traînées météoriques avec l'équation (2) pour calculer la densité volumique des traînées météoriques, en fonction de q dans l'atmosphère;
- intégrer le produit de c) et d) sur la région météorique en utilisant en chaque point q_{min} obtenu en b).

FIGURE 5

Pourcentage estimé du nombre des trajets utiles en fonction de l'emplacement où a lieu la diffusion de 1 000 km entre les terminaux



0843-05

9 Considérations sur les antennes

L'effet décrit au § 7, joint au fait que les traînées se situent surtout entre 90 et 110 km de hauteur, permet de situer les deux régions de «points chauds» en direction desquelles il convient que les antennes soient toutes deux pointées. L'importance relative des deux points chauds varie suivant l'heure du jour et l'orientation du trajet. Les antennes utilisées en pratique ont en général des faisceaux suffisamment larges pour couvrir les deux points chauds. Il en résulte que leurs performances ne sont pas optimales mais qu'en revanche il n'est pas nécessaire d'imposer un balancement au faisceau des antennes.

On préfère en général une polarisation horizontale, mais une polarisation verticale pourrait s'avérer utile dans le cas des distances supérieures à 1 000 km, pour lesquelles les antennes doivent rayonner sous un petit angle.

10 Considérations pour le choix des fréquences

Pour un système de communication par impulsions météoriques, le choix des fréquences est influencé par plusieurs facteurs.

10.1 Facteur d'utilisation de l'information

L'influence de la longueur d'onde sur la valeur maximale de la puissance reçue $p_{R_{max}}$ et sur le facteur d'utilisation D_C est telle, d'après la formule (5), que, pour des valeurs fixes de la puissance de l'émetteur et des gains des antennes:

$$p_{R_{max}} \sim \lambda^3 \quad (17)$$

Cette formule est valable pour les traînées de forte comme de faible intensité. L'influence de la longueur d'onde sur le facteur d'utilisation dépend de la fréquence d'apparition relative de ces deux types de traînées. Si on suppose une fréquence d'apparition intermédiaire, le facteur d'utilisation varie comme suit en fonction de la longueur d'onde:

$$D_C \sim p_{R_{max}} T_{un} \quad (18)$$

$$\sim \lambda^5$$

Dans les lieux de réception très calmes, le bruit prédominant aux fréquences supérieures à 25 MHz est le bruit cosmique, dont l'intensité varie comme $\lambda^{2,3}$. Il en résulte que le facteur d'utilisation de l'information I_C , pour une largeur de bande donnée, (pourcentage du temps pour lequel une valeur donnée du rapport signal/bruit est dépassée) varie en fonction de la longueur d'onde selon:

$$I_C \sim \lambda^{2,7} \quad (19)$$

La fréquence d'occurrence des réflexions en fonction de l'amplitude des signaux dépend de la sensibilité du système. Un résultat expérimental fréquemment obtenu avec les systèmes utilisés jusqu'ici peut s'exprimer par la formule:

$$D_C \sim p_R^{-0,6} \quad (20)$$

dans laquelle:

D_C : pourcentage du temps pendant lequel le seuil A est dépassé

p_R : puissance reçue correspondant à ce même seuil.

Etant donné que la puissance de bruit est proportionnelle à la largeur de bande B , l'emploi de la formule (20) conduit à:

$$I_C \sim B^{-0,6} \quad (21)$$

La capacité moyenne de la voie, C , est le produit du débit de données par le facteur d'utilisation de l'information I_C . Le premier de ces facteurs peut être considéré comme proportionnel à la largeur de bande, aussi peut-on écrire:

$$C \sim B^{0,4} \quad (22)$$

Pour que le transfert d'information puisse être maximal, il faut que la largeur de bande soit aussi grande que possible.

Toute question de disponibilité de largeur de bande mise à part, le facteur d'utilisation de l'information se trouve réduit pour la raison que le bruit est plus intense lorsque la bande est plus large, de sorte que le rapport signal/bruit atteint difficilement la valeur requise; ces faits entraînent à leur tour un allongement du temps nécessaire pour transmettre un message. On atteint de plus un point où le fonctionnement du système doit reposer sur des traînées de forte densité, cas dans lequel la formule (20) n'est plus valable. Lorsque l'exposant de la puissance de p_R à laquelle D_C est proportionnel devient inférieur à -1 , on n'a plus avantage à augmenter le débit de données. On peut noter que l'exposant est susceptible de descendre au-dessous de -1 pour les fréquences inférieures à 40 MHz, du fait que les signaux transmis par diffusion ionosphérique masquent les signaux, plus faibles, transmis par impulsions météoriques.

Il est peu probable que la largeur de bande utilisable soit limitée par la largeur de bande de cohérence, puisque celle-ci est de l'ordre de plusieurs mégahertz pendant la principale partie de l'impulsion. Même pendant les queues des échos, où il y a des évanouissements dus à des cisaillements du vent, la largeur de bande de cohérence est de quelques centaines de kilohertz.

10.2 Brouillages

En raison du grand affaiblissement de trajet subi par les signaux de transmission par impulsions météoriques, il est nécessaire de maintenir les signaux brouilleurs à un niveau minimal. En conséquence, la fréquence de fonctionnement doit être supérieure à la fréquence de propagation des modes ionosphériques normaux.

10.3 Absorption ionosphérique

L'absorption doit être réduite à un minimum, ce qui impose l'emploi d'une fréquence aussi élevée que possible. Ceci concerne particulièrement les systèmes exploités à des latitudes élevées où l'absorption aurorale et l'absorption de la calotte polaire peuvent atténuer et même absorber totalement le signal si la fréquence utilisée est trop basse.

10.4 Rotation de Faraday

A certains moments, la rotation de Faraday des signaux de communication par impulsions météoriques réduit considérablement la capacité des liaisons de communications pour les fréquences inférieures à 40 MHz environ.

La première influence est contradictoire avec les trois dernières et, lorsqu'il choisit sa fréquence, le concepteur du système doit apprécier quels poids appliquer à chacune d'elles.

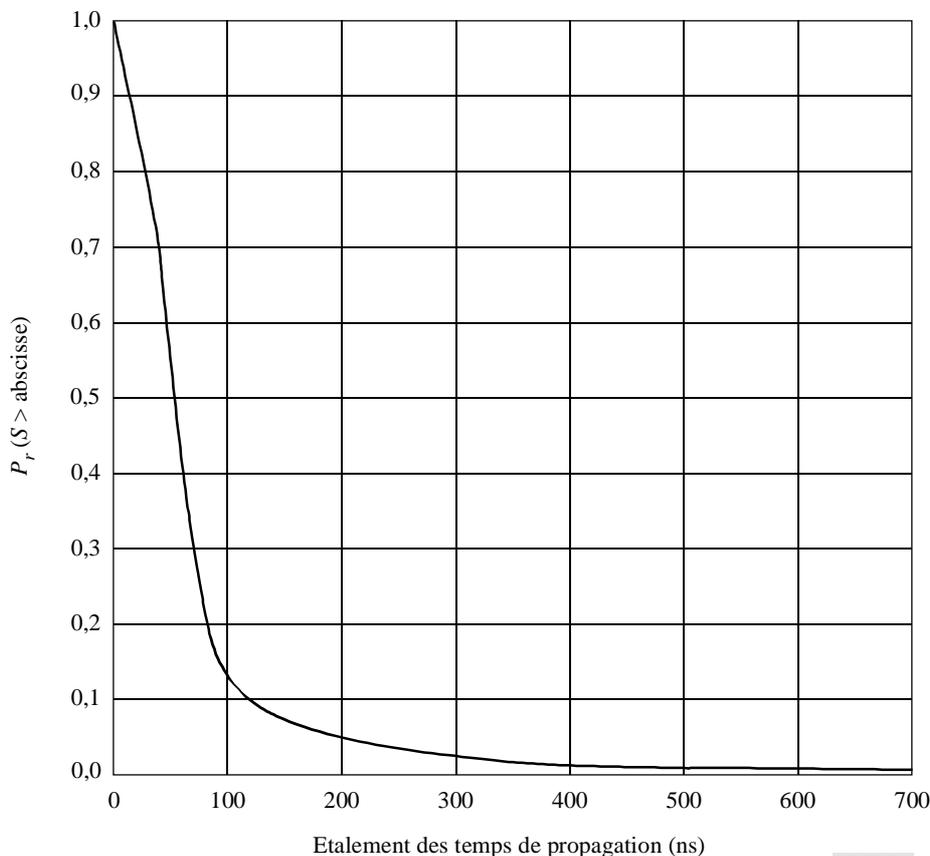
11 Effets Doppler

Les réflexions sur la tête d'une traînée météorique peuvent donner lieu à des décalages de fréquence par effet Doppler qui risquent de s'étendre dans toute la largeur de la bande des audiofréquences. Le décalage Doppler provoqué par une traînée météorique est la conséquence de vents ionosphériques, et il pourrait être de l'ordre de 20 Hz à la fréquence de 40 MHz. Des étalements plus importants dus à des effets Doppler ou à des trajets multiples peuvent être provoqués par d'autres mécanismes de propagation que la diffusion météorique.

12 Effets de propagation par trajets multiples

Une analyse de profils de réponse impulsionnelle recueillis sur une liaison de 500 km utilisant la propagation par impulsions météoriques montre que, la plupart du temps, il existe un seul trajet entre l'émetteur et le récepteur; le débit binaire n'est donc pas affecté par la présence de propagation par trajets multiples. La présence de trajets multiples a été observée pour seulement 12% de l'ensemble des traînées de faible densité et 71% de l'ensemble des traînées de forte densité. Cette observation se reflète dans la distribution de l'étalement des temps de propagation (voir la Fig. 6) qui montre que pendant 90% du temps, la valeur quadratique moyenne de l'étalement des temps de propagation, S , est inférieure à 100 ns et que pendant 99% du temps, cette valeur est inférieure à 400 ns. Il convient de noter que dans plusieurs cas rares, on a relevé des valeurs comprises entre 1,0 et 7,0 μ s. Cela étant, on peut en conclure que les conditions dans lesquelles des traînées entraînent un étalement important des temps de propagation sont relativement peu fréquentes.

FIGURE 6
Statistiques de l'étalement des temps de propagation



0843-06