

RECOMMANDATION UIT-R F.1113

SYSTÈMES RADIOÉLECTRIQUES UTILISANT LA PROPAGATION
PAR IMPULSIONS MÉTÉORIQUES

(Question UIT-R 157/9)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que des expériences ont déjà montré qu'il était faisable d'avoir recours à des fréquences de la bande comprise entre 30 et 50 MHz pour les communications utilisant la propagation par impulsions météoriques à des distances bien au-delà de l'horizon;
- b) que des systèmes utilisant ce mode de propagation sont déjà en service pour la transmission de données par paquets,

recommande

1. de suivre les directives de l'Annexe 1 pour la mise en œuvre des systèmes radioélectriques utilisant la propagation par impulsions météoriques.

ANNEXE 1

**Systèmes radioélectriques utilisant la propagation
par impulsions météoriques****1. Introduction**

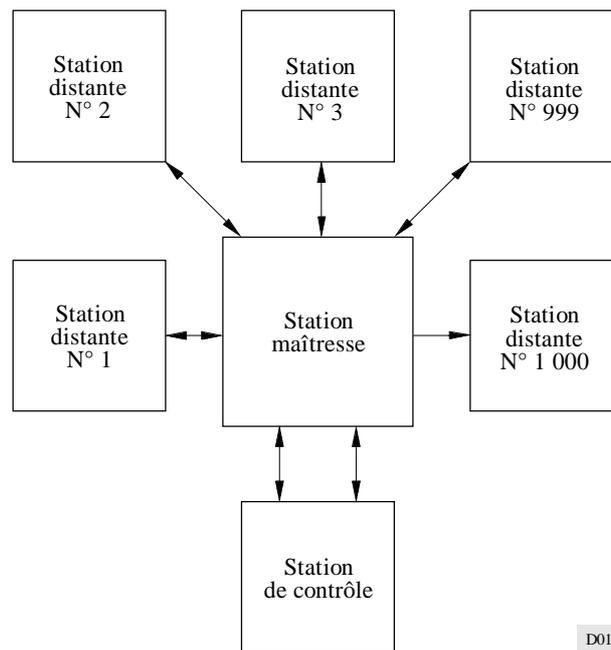
Le phénomène de la propagation par impulsions météoriques utilisant les réflexions sur les traînées météoriques ionisées est décrit dans la Recommandation UIT-R PI.843. Les récents progrès réalisés dans le domaine des microprocesseurs et de l'électronique numérique rendent désormais possible la construction d'un système de communication par impulsions météoriques pour un coût commercial acceptable. La présente Annexe décrit deux systèmes de ce type et fournit les résultats d'essais effectués sur ces systèmes.

2. Exemple A de système de propagation par impulsions météoriques**2.1 Description du système**

La configuration du système se présente comme un réseau en étoile composé d'une station maîtresse centrale et pouvant compter jusqu'à 1 000 stations distantes à l'intérieur d'une zone de couverture de 2 000 km de rayon (voir la Fig. 1). Ce système fait appel à un protocole de paquet semi-duplex avec répétition automatique des transmissions à segment unique en présence d'erreurs. Chaque station distante est capable de communiquer avec un nombre quelconque d'autres stations distantes par l'intermédiaire de la station maîtresse centrale.

On peut réaliser des systèmes plus importants mettant en œuvre plusieurs stations maîtresses qui communiquent entre elles en duplex selon le mode de propagation par impulsions météoriques, de telle sorte que toutes les stations distantes puissent communiquer les unes avec les autres par l'intermédiaire de stations maîtresses combinées, par une série de voies à 25 kHz. Il est également possible de construire un système sans station maîtresse en utilisant les techniques de communication entre points fixes lorsque les stations distantes assurent les fonctions de commande. Ce dernier système manque de souplesse, sa configuration devant être modifiée chaque fois que le nombre des stations est modifié.

FIGURE 1
Schéma de principe du système



D01

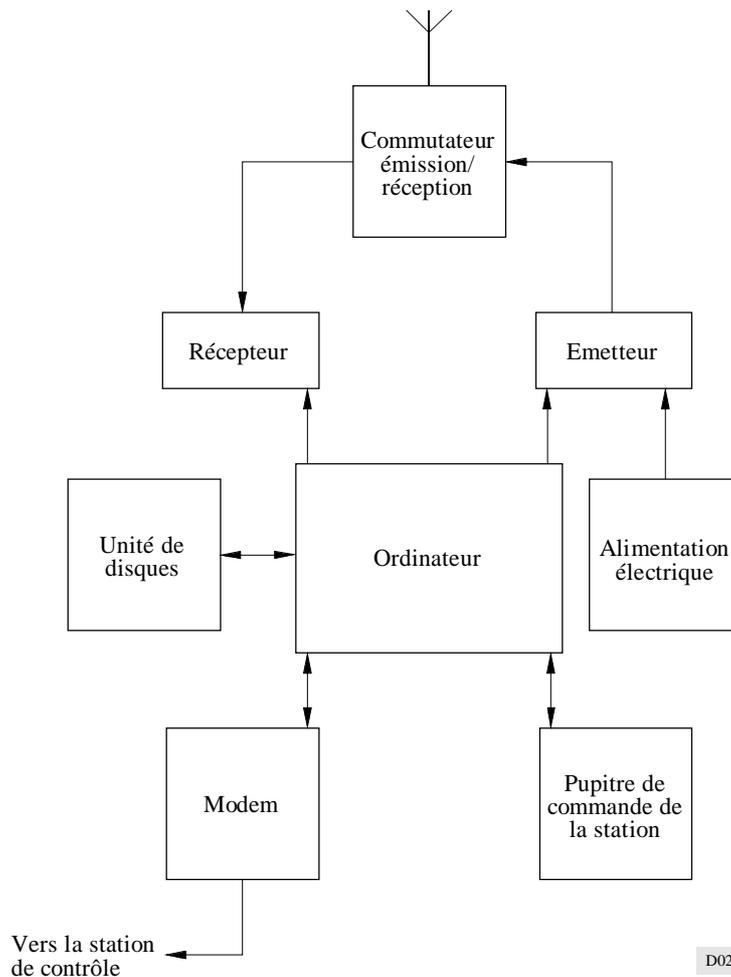
On a réalisé en Europe un système dans lequel un maximum de fonctions système sont concentrées dans la station maîtresse, le but étant de minimiser la taille, le coût et la consommation d'énergie des stations distantes. La station maîtresse assume les fonctions d'illumination de la traînée météorique, de synchronisation du système et d'acheminement des messages, mais elle est transparente pour l'utilisateur. C'est le seul élément du système qui requiert une alimentation par le secteur.

2.1.1 Caractéristiques essentielles du système

Le système décrit fonctionne en semi-duplex et utilise deux fréquences voisines de 46,9 MHz, avec une seule antenne à polarisation horizontale dans chaque station. Dans la pratique, l'antenne de la station maîtresse est un réseau de quatre antennes «Yagi» reliées entre elles pour assurer une couverture omnidirectionnelle. Il serait possible d'utiliser la polarisation verticale si elle était nécessaire pour les besoins d'exploitation comme dans le cas de stations distantes mobiles. L'émetteur (voir la Fig. 2) a une puissance nominale de 500 W. Un commutateur d'émission/réception permet des cycles d'appel/écoute d'une durée approximative de 80 ms. Ce cycle, où alternent 40 ms d'appel et 40 ms d'écoute, est utilisé pour illuminer les traînées météoriques et est appelé sondage. Ces émissions avec sondage peuvent soit être dirigées vers l'une des stations distantes, soit ne pas avoir de destination spécifique, selon la priorité du système. L'émetteur de la station maîtresse transmet en modulation binaire par déplacement de phase (MDP) de faible indice ($\pm 30^\circ$), de manière à minimiser le brouillage sur les voies adjacentes. La synchronisation des stations distantes est assurée par codage de Manchester du signal d'horloge dans les données.

Les stations distantes émettent en modulation par déplacement de phase (MDP) avec un indice élevé ($\pm 90^\circ$) de manière à garantir à la station maîtresse les meilleures conditions de détection. Deux protocoles sont appliqués, l'un pour l'acquisition de données et l'autre pour la communication. Dans des conditions normales d'exploitation, la station maîtresse émet des mots de sondage et contrôle les signaux reçus à la recherche de segments de données utilisables en provenance d'une station distante (voir la Fig. 3). Dès qu'on a repéré un tel segment, un accusé de réception est renvoyé à la station distante d'origine. En même temps, un contrôle de mémoire est effectué par ordinateur pour repérer les segments adressés à la station distante et, lorsqu'on les a localisés, le premier segment du message de retour est joint à l'accusé de réception. Lorsqu'un segment est retourné de cette manière, on cherche à obtenir un accusé de réception de la station distante. Dans tous les cas, le segment est répété jusqu'à ce qu'un accusé de réception ait été reçu.

FIGURE 2
Station maîtresse



Le système est commandé par une station de contrôle reliée à la station maîtresse par radio ou par une ligne terrestre. Cette connexion permet d'installer la station de contrôle dans les bureaux d'administration et la station maîtresse à distance, dans un lieu présentant des conditions idéales (faible niveau de bruit ambiant). La station de contrôle du système contrôle la performance de l'ensemble du réseau et enregistre toutes les données transmises, de sorte que les usagers peuvent les recueillir à partir de cette station au lieu de les recevoir en temps réel.

Dans ce système, une station distante d'acquisition de données est conçue de manière à consommer le moins d'énergie possible et à fonctionner avec un maximum de fiabilité dans des conditions types (entre -30 °C et $+60\text{ °C}$). Le facteur d'utilisation de l'émetteur de 100 W est limité à 1%. Le récepteur a une sensibilité de -118 dBm et est doté d'une mémoire tampon pour les paquets de données ou les messages en textes courts (voir la Fig. 4).

Un second type de station distante pour les communications est conçu de manière que la vitesse de transfert des données, qui varie en fonction du rapport signal/bruit, soit la plus élevée possible. Le facteur d'utilisation de l'émetteur de 300 W est limité à 10%. Le récepteur a une sensibilité de -121 dBm et est doté d'une mémoire tampon dont la capacité peut atteindre 20 koctets (voir la Fig. 5).

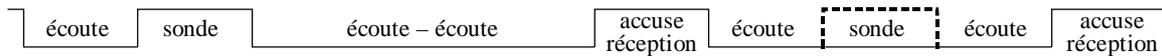
Le protocole de communication fait appel à la diversité naturelle en espace et en temps des traînées météoriques pour l'interrogation préalable automatique d'un maximum de 1 000 stations distantes. Lorsqu'un trajet est disponible, l'émission des données et leur accusé de réception se font pendant le même événement. Les longues chaînes de données exigent plusieurs événements ainsi qu'une recombinaison dans le récepteur. Le texte est transmis dans une série de segments dont chacun donne lieu à l'émission d'un accusé de réception à la fin du message. Il est possible de surveiller de façon continue le rapport signal/bruit et d'ajuster le débit binaire dans une gamme comprise entre 2 et 64 kbit/s de manière à obtenir le débit maximal.

FIGURE 3
 Protocole type d'échange de données par impulsions météoriques

1. La station maîtresse émet et écoute alternativement



2. La station maîtresse reçoit un/des message(s) d'une station distante



2A. Une station distante a un message à envoyer et son récepteur écoute en quête du signal sonde

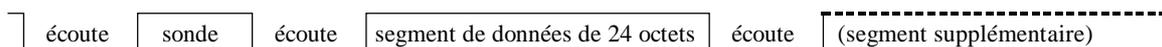


2B. Message d'une station distante: longueur > 24 octets

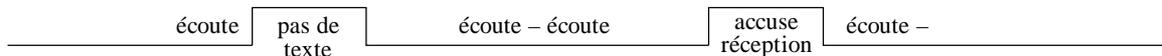


2C. Si tous les messages ne peuvent être transmis en utilisant un seul événement météorique, les messages/parties de message restants sont emmagasinés jusqu'au prochain événement disponible.

3. La station maîtresse envoie un/des message(s) à une station distante



3A. La station reçoit un/des message(s) de la station maîtresse



4. La station maîtresse entend une station distante mais il n'y a pas de données en attente à aucune des deux stations



4A. Une station distante entend la station maîtresse mais n'a pas de données à envoyer



FIGURE 4
Station type d'acquisition de données

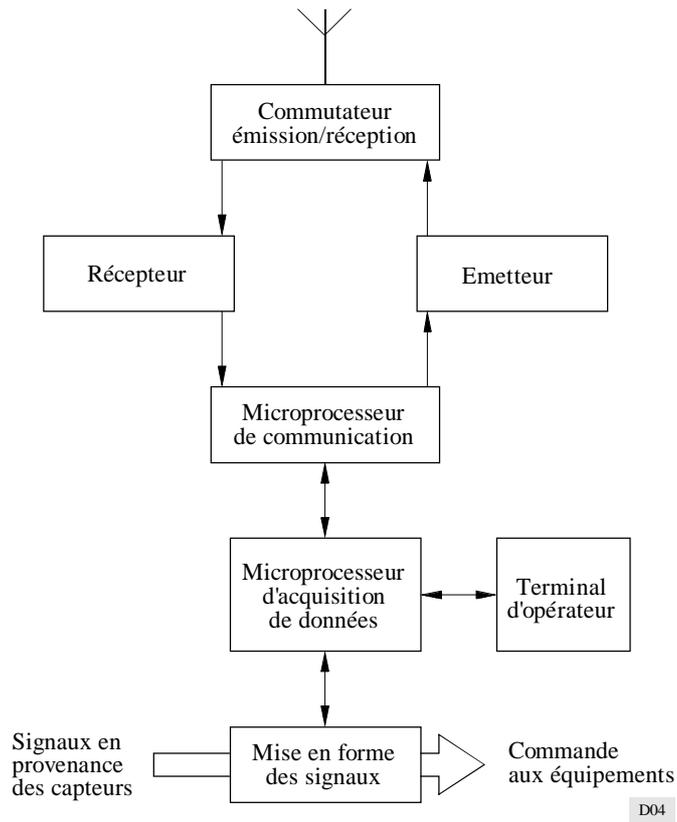
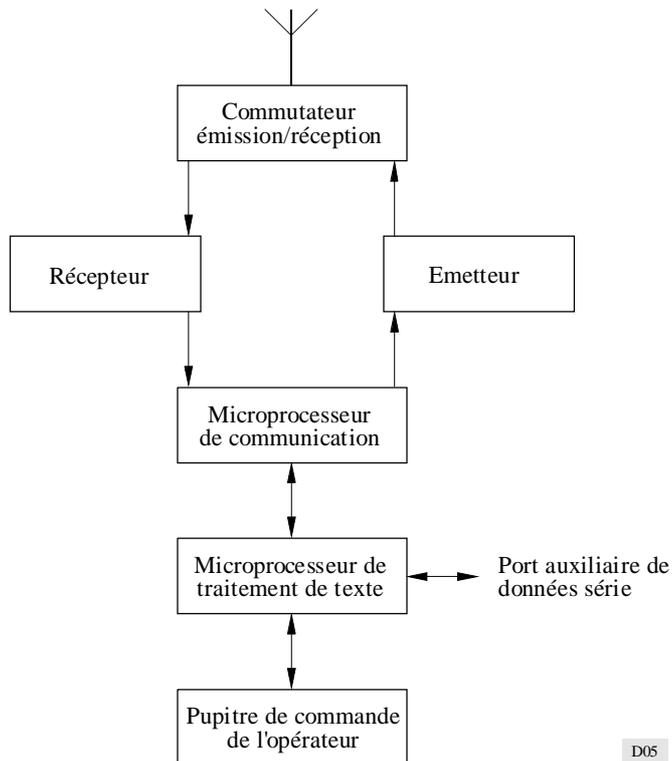


FIGURE 5
Station type de communication de textes et de données



2.1.2 Sensibilité au bruit des systèmes de propagation par impulsions météoriques

On a démontré que les liaisons à impulsions météoriques étaient relativement insensibles aux perturbations atmosphériques telles que l'aurore boréale. Dans des conditions idéales, la performance d'un système utilisant la propagation par impulsions météoriques ne serait limitée que par le bruit d'origine galactique. Le récepteur doit donc être conçu de manière à décoder les signaux d'une amplitude comparable à celle de ce type de bruit. Dans la pratique, on a aussi du bruit artificiel, qui est souvent transitoire et d'un niveau très élevé par rapport au bruit d'origine galactique. Le récepteur doit donc avoir une grande portée dynamique et une certaine forme de protection pour éviter les effets de saturation dus aux crêtes à haute énergie.

2.1.3 Conception et utilisation, variation en fonction de la fréquence

Le système pourrait fonctionner à n'importe quelle fréquence comprise entre 20 et 120 MHz pourvu qu'il n'y ait pas d'ionisation régulière. La portée pourrait atteindre 1 600 km si l'on utilise les traînées ionisées de météores évoluant de 80 à 100 km au-dessus de la Terre. Pour avoir le facteur maximum d'utilisation de l'information, la gamme de fréquences doit se situer de préférence entre 40 et 50 MHz.

2.2 Résultats des essais

2.2.1 Résultats obtenus en exploitation

Les résultats obtenus dans le réseau européen, quelle que soit la portée de transmission, ont été meilleurs que ceux prévus par la plupart des modèles informatiques publiés. On observe les différences les plus importantes dans les systèmes à courte portée où les débits binaires obtenus ont parfois été 5 fois plus grands que les valeurs prévues. L'expérience acquise dans les Iles britanniques a démontré la possibilité d'établir une communication fiable sur toute portée comprise entre 0 et 1 600 km. Le système permet d'effectuer des mesures en des lieux distants et de renvoyer régulièrement aux bureaux les données ainsi obtenues. En règle générale, 8 échantillons de 12 bits sont envoyés de chaque lieu distant pendant chaque intervalle de 15 min.

Au cours des essais effectués en décembre et en janvier de 1986 à 1989, huit stations distantes d'acquisition de données à faible puissance ont été mises en place pour transmettre des données à intervalles de 5 min sur des liaisons à impulsions météoriques ayant les portées suivantes: 1 520, 1 040, 816, 608, 464, 256, 141 et 24 km. Pendant toute la période d'essai, les données ont toutes été reçues avec succès dans l'intervalle de 5 min précédant l'émission de nouvelles données.

2.2.2 Effets observés de brouillage et de sensibilité au bruit

D'après l'expérience acquise en Europe, le seul facteur vraiment important pour déterminer la performance d'une liaison à impulsions météoriques est le niveau de brouillage dans la bande sur le site. D'autres services dans cette même gamme utilisent la propagation en visibilité directe. Il est souvent possible de réduire les effets de brouillage en tournant l'antenne ou en modifiant son angle d'élévation par rapport à sa position normale. Une antenne rotative à large faisceau et à faible gain permet d'utiliser un important volume céleste; on peut faire varier l'angle de l'antenne jusqu'à 25° dans un plan quelconque sans que la performance de la liaison en soit affectée de façon sensible. Il est à noter que la technique dite «par impulsions météoriques» peut fonctionner avec un rapport signal/bruit réduit, ce qui permet de maintenir l'intégrité de la liaison, quoique à un débit binaire inférieur.

2.2.3 Variation observée en fonction de la fréquence

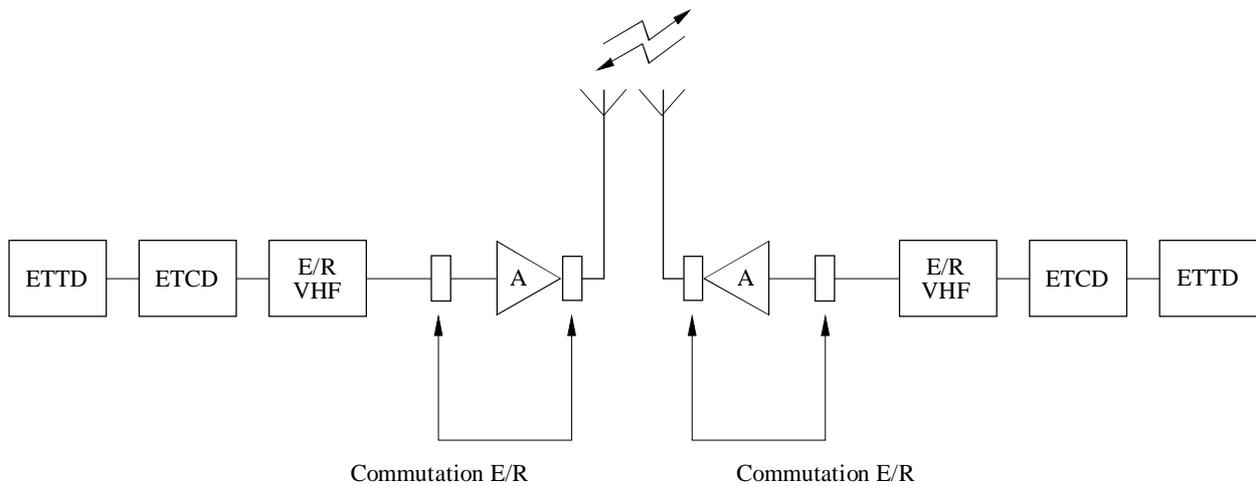
Le système décrit utilise une seule paire de fréquences voisines de 46,9 MHz; on ne dispose donc pas encore de données d'exploitation sur la variation en fonction de la fréquence.

3. Exemple B de système de propagation par impulsions météoriques

3.1 Description du système

Des essais d'un système de transmission de données par canal météorique ont été effectués en France durant le premier semestre 1988, à toutes heures du jour et de la nuit, sur une liaison point à point entre deux stations fixes situées à 350 km l'une de l'autre.

FIGURE 6
Schéma de principe de la liaison



ETTD: équipement terminal de traitement de données
ETCD: équipement de terminaison de circuit de données

D06

- Le sous-ensemble ETCD assure les fonctions de modulation MDF et de synchronisation (modem radio).
- Le sous-ensemble ETTD assure les fonctions de communication, de codage et de traitement des données.

Le message émis est formaté en blocs. Les blocs sont de deux natures:

- bloc en-tête (un bloc par message),
- bloc de données (nombre dépendant de la longueur du message).

Le codage utilisé s'effectue par blocs suivant un code correcteur d'erreur de Reed-Solomon (23,13) qui peut compenser des taux d'erreur pouvant atteindre 5%.

Le rythme binaire utilisé est de 16 kbit/s, les caractères sont composés de 6 bits.

La procédure est de type «semi-duplex» à retransmission avec arrêt et attente (répétition des blocs non reçus uniquement).

Les essais ont été effectués:

- à plusieurs niveaux de puissance d'émission: 1 kW – 200 W – 100 W, quelques essais à 50 W
- sur différentes fréquences: autour de 40 MHz
- pour différentes tailles de messages: 900 – 500 – 250 – 100 – 50 – 10 caractères.

On a utilisé des antennes Yagi de 5 éléments en polarisation horizontale, dont le diagramme permet d'éclairer toute la zone de couverture de grande concentration de météores.

Ces antennes sont donc particulièrement bien adaptées pour ce type de transmission: leur gain est de 9,5 dBi.

3.2 Résultats des essais

Trois types d'essais ont été effectués.

3.2.1 Essai canal

Il permet de mesurer les caractéristiques suivantes pour une période d'observation T donnée:

τ_m : durée moyenne d'une traînée météorique

$$\tau_m = \frac{\sum \text{durée des traînées}}{\text{nombre de traînées}}$$

θ_m : durée moyenne entre 2 traînées météoriques

$$\theta_m = \frac{\sum \text{durée entre 2 traînées}}{\text{nombre de traînées}}$$

et d'en déduire d_o : durée d'ouverture du canal: c'est-à-dire pourcentage de temps moyen pendant lequel le canal est ouvert.

$$d_o = \frac{\tau_m}{\tau_m + \theta_m}$$

La durée moyenne d'une traînée météorique τ_m est calculée en identifiant la continuité de déroulement de la procédure.

Pour une puissance de 1 kW, l'activité du canal météorique a donné une durée moyenne des traînées de 400 ms et une durée moyenne entre 2 traînées de 700 ms.

Pour une puissance de 200 W, l'activité diminuait faiblement (durée moyenne des traînées: 330 ms – durée moyenne entre 2 traînées: 800 ms).

Par contre, pour une puissance de 100 W, l'activité devenait très faible (durée moyenne des traînées: 350 ms – durée moyenne entre 2 traînées: 43 s).

On en déduit que la durée d'ouverture du canal était de 36% pour 1 kW, 29% pour 200 W et 0,8% pour 100 W.

Les essais ont montré également que l'activité météorique moyenne utile est à peu près stable sur 24 h; une activité plus favorable vers 6 h et plus défavorable vers 18 h, comme indiqué dans la Recommandation UIT-R PI.843, n'a pu être mise en évidence.

Note 1 – Ces résultats obtenus expérimentalement concernant l'activité du canal pour les fortes puissances d'émission (1 kW – 200 W) sont nettement supérieurs à ceux obtenus théoriquement par la formule déduite des expérimentations COMET.

Ils ne peuvent *a priori* être compris que par la présence simultanée d'un autre mécanisme de propagation. La hauteur des antennes au-dessus du sol (17 m), choisie de manière à pouvoir réaliser des liaisons jusqu'à 1 000 km, permet d'obtenir des gains notables aux angles de tir faibles. Cet élément favorise les liaisons par diffusion troposphérique, théoriquement possibles pour la distance considérée et dont l'exploitation est possible avec les procédures utilisées pour le canal météorique. L'existence de ce phénomène a été confirmée en évaluant pour chaque ouverture de canal, le temps de propagation du signal (la diffusion troposphérique à basse altitude correspond à un temps de propagation nettement inférieur par comparaison aux réflexions sur les traînées météoriques à haute altitude).

3.2.2 Essai taux d'erreur binaire

Il permet de mesurer le taux d'erreur binaire sur les traînées, dû uniquement aux caractéristiques du canal, sans utilisation de codes correcteurs d'erreur.

Un message reçu a été comparé à un message de référence de 900 caractères. L'ensemble des bits faux (par caractère) était stocké dans un fichier: une fenêtre de 60 caractères était glissée dans ce fichier par pas de 1 caractère. Lorsque le taux d'erreur binaire était de 5% dans cette fenêtre (ce chiffre correspond à la capacité maximale du code correcteur d'erreur Reed-Solomon utilisé) le canal météorique était considéré comme fermé. La position du dernier caractère de la fenêtre était mémorisée.

Le calcul du taux d'erreur binaire s'effectuait sur l'ensemble des données qui précèdent ce dernier caractère:

- ce taux était de 1,7% à 1 kW et 2,5% à 200 W;
- pour une puissance de 100 W, il devenait très élevé (7,4%) et seul le début des traînées était exploitable pour le code utilisé.

3.2.3 Essai système

Il permet de mesurer les performances du système en vue d'évaluer son adaptation au canal et l'adéquation de la procédure utilisée.

Seul cet essai prend en compte le paramètre «taille du message».

3.2.3.1 Débit

La caractéristique essentielle est le débit moyen D , en caractères utiles par secondes (car./s):

$$D = \frac{\text{taille du message reçu}}{\text{durée d'acheminement}}$$

A puissance constante, le débit moyen croît en fonction de la longueur du message. Le débit maximum (187 car./s) a été obtenu pour des messages de 500 caractères avec 1 kW de puissance. A 200 W, le débit n'était plus que de 122 car./s. Pour des messages de 250 caractères, le débit était de 158 car./s pour 1 kW et de 116 car./s pour 200 W.

Une diminution importante du débit a été observée pour des puissances inférieures à 100 W: pour des messages de 100 caractères, les débits étaient de 84 car./s pour 1 kW, 63 car./s pour 200 W, 13 car./s pour 100 W, 1 car./s pour 50 W et 0,02 car./s pour 30 W.

Enfin, on a pu constater que les débits sont relativement stables sur un intervalle de 15 min environ.

3.2.3.2 Adéquation de la procédure

Pour les liaisons point à point, un message de taille définie est reçu après un nombre important d'échanges entre les 2 stations: le taux d'erreur bloc (TEB), donné par la formule:

$$TEB = \left(1 - \frac{\text{nombre de blocs reçus}}{\text{nombre de blocs émis}} \right) \times 100$$

permet de déterminer l'efficacité de la procédure en évaluant le nombre d'échanges de celle-ci.

Le système fonctionnait bien pour une puissance de 1 kW: un message de longueur définie était reçu avec peu d'échanges de procédure (taux d'erreur bloc: 27%).

Pour une puissance de 200 W, il y avait de nombreux échanges (taux d'erreur bloc: 48%), entraînant une diminution de l'efficacité de la procédure: elle n'était plus optimale, mais restait satisfaisante, les échanges ne saturant pas le système.

Pour une puissance de 100 W, un message n'était reçu qu'après un nombre très important d'échanges entre les 2 stations (taux d'erreur bloc > 50%). Enfin, pour les puissances inférieures à 100 W, la procédure n'était plus adaptée.
