

## RECOMMANDATION UIT-R F.1106

INFLUENCE DE LA PROPAGATION SUR LA CONCEPTION ET LE FONCTIONNEMENT  
DES FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON

(Question UIT-R 103/9)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la propagation influe de façon décisive sur la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens transhorizon;
- b) que les caractéristiques de transmission peuvent être définies en fonction de l'amplitude et de la phase d'un signal reçu;
- c) que les variations d'amplitude en fonction du temps se composent d'une variation rapide superposée à une variation plus lente;
- d) que la variation rapide, essentiellement due à des phénomènes de propagation par trajets multiples, peut souvent être atténuée en faisant appel à des techniques de réception en diversité;
- e) que les effets de la variation plus lente de la puissance reçue peuvent être réduits par l'utilisation d'équipements de transmission à grande puissance, d'antennes à gain élevé, de dispositifs de réglage automatique de la p.i.r.e., de systèmes de réception à très faible bruit, de lignes d'alimentation à faibles pertes, de méthodes d'adaptation de la charge et de procédés de détection améliorés, ainsi que par toutes autres méthodes d'optimisation des systèmes associées au choix judicieux de la porteuse radioélectrique, de la largeur de bande et de la modulation,

*recommande*

1. que les indications figurant à l'Annexe 1 soient prises en considération dans la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens transhorizon (Notes 1 et 2);
2. qu'en particulier les facteurs suivants soient pris en considération dans la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques transhorizon:
  - 2.1 le gain global des antennes d'émission et de réception peut être inférieur à la somme des gains d'antenne pour des ondes planes, tel qu'indiqué au § 2 de l'Annexe 1; cette diminution apparente du gain est appelée «dégradation du gain» ou «perte de couplage entre l'antenne et le milieu»;
  - 2.2 la Recommandation UIT-R F.698 doit être observée en matière de choix des bandes de fréquences allouées de préférence aux faisceaux hertziens transhorizon;
  - 2.3 les techniques de réception en diversité – diversité d'espace, diversité en fréquence et la diversité angulaire – contribuent efficacement à réduire les effets nuisibles des fluctuations rapides d'un signal en réception, tel qu'indiqué au § 4.1 de l'Annexe 1;
  - 2.4 les méthodes décrites au § 4.2 de l'Annexe 1 permettent d'estimer la largeur de bande de transmission d'un système utilisant les techniques de diversité;
  - 2.5 il conviendrait, pour atténuer les effets de la dispersion par trajets multiples sur les faisceaux hertziens transhorizon, de prendre en considération l'ordre de diversité, l'égalisation adaptative, et la sélection de modems efficaces, tel qu'indiqué au § 5 de l'Annexe 1;
  - 2.6 il conviendrait pour atténuer le brouillage des autres systèmes provoqué par les lobes latéraux et par les portées anormales obtenues par des conditions de propagation améliorée, d'utiliser un dispositif de réglage automatique du niveau de la puissance d'émission, à partir du niveau de réception des récepteurs associés éloignés.

*Note 1* – La présente Recommandation est applicable aux faisceaux transhorizon à dispersion troposphérique, mais pas nécessairement aux faisceaux qui utilisent d'autres modes de propagation (diffraction, etc.).

*Note 2* – La Recommandation UIT-R PN.617 doit également être prise en compte en ce qui concerne les données de propagation requises pour la conception des faisceaux hertziens transhorizon.

## ANNEXE 1

**Facteurs régissant l'influence de la propagation  
sur la conception et le fonctionnement  
des faisceaux hertziens transhorizon****1. Introduction**

La présente Annexe concerne les systèmes transmettant un nombre relativement faible de voies téléphoniques ou un signal de télévision.

Les caractéristiques de transmission peuvent être définies en fonction de l'amplitude et de la phase du signal reçu. Pour un système transhorizon, ces caractéristiques de transmission (amplitude et phase) varient avec la fréquence et le temps.

On constate que les variations de l'amplitude en fonction du temps se présentent sous la forme d'une variation rapide superposée à une variation plus lente. La première, qui est essentiellement due à des phénomènes de propagation par trajets multiples, peut souvent être atténuée par la mise en œuvre de la réception en diversité. Quant aux effets de la variation lente de la puissance reçue, ils peuvent être réduits par l'utilisation d'équipements de transmission à grande puissance, d'antennes à gain élevé, de systèmes de réception à très faible bruit, de lignes d'alimentation à faibles pertes, de méthodes d'adaptation de la charge aux conditions de transmission et de procédés de détection améliorés ainsi que par toutes autres méthodes permettant d'obtenir un fonctionnement optimal, qui sont associées au choix judicieux de la porteuse radioélectrique, de la largeur de bande et de la modulation.

**2. Baisse de gain d'antenne**

Le gain global des antennes d'émission et de réception peut être inférieur à la somme des gains d'antenne pour les ondes planes. Cette diminution apparente du gain est appelée «dégradation du gain» ou «perte de couplage entre l'antenne et le milieu». Des analyses théoriques montrent que la perte dépend du gain d'antenne et de l'angle de diffusion.

Expérimentalement, on a constaté que le gain d'antenne pour le trajet, ou gain total équivalent de l'antenne pour un système transhorizon, est pratiquement indépendant de la distance entre environ 150 et 500 km. D'après ces mêmes expériences, le gain total équivalent (Fig. 1) peut être considéré comme ne dépendant que de la somme des gains des antennes en espace libre, sans grandes corrections, à condition que ni l'un ni l'autre des gains en espace libre ne dépasse environ 50 dB et que les gains des deux antennes ne soient pas trop différents.

Des études ultérieures ont montré que la baisse du gain d'antenne est liée à la rapidité de décroissance avec l'altitude du gradient de l'indice de réfraction dans le volume commun et, par suite, la loi de variation de la baisse de gain d'antenne en fonction de la distance dépend un peu du climat. Cette étude montre aussi que, lorsque les gains des antennes augmentent, la pente de la courbe de la Fig. 1 tend asymptotiquement vers 1/4.

**3. Choix de la bande de fréquences**

Le choix d'une bande de fréquences pour un faisceau hertzien transhorizon dépend des facteurs suivants:

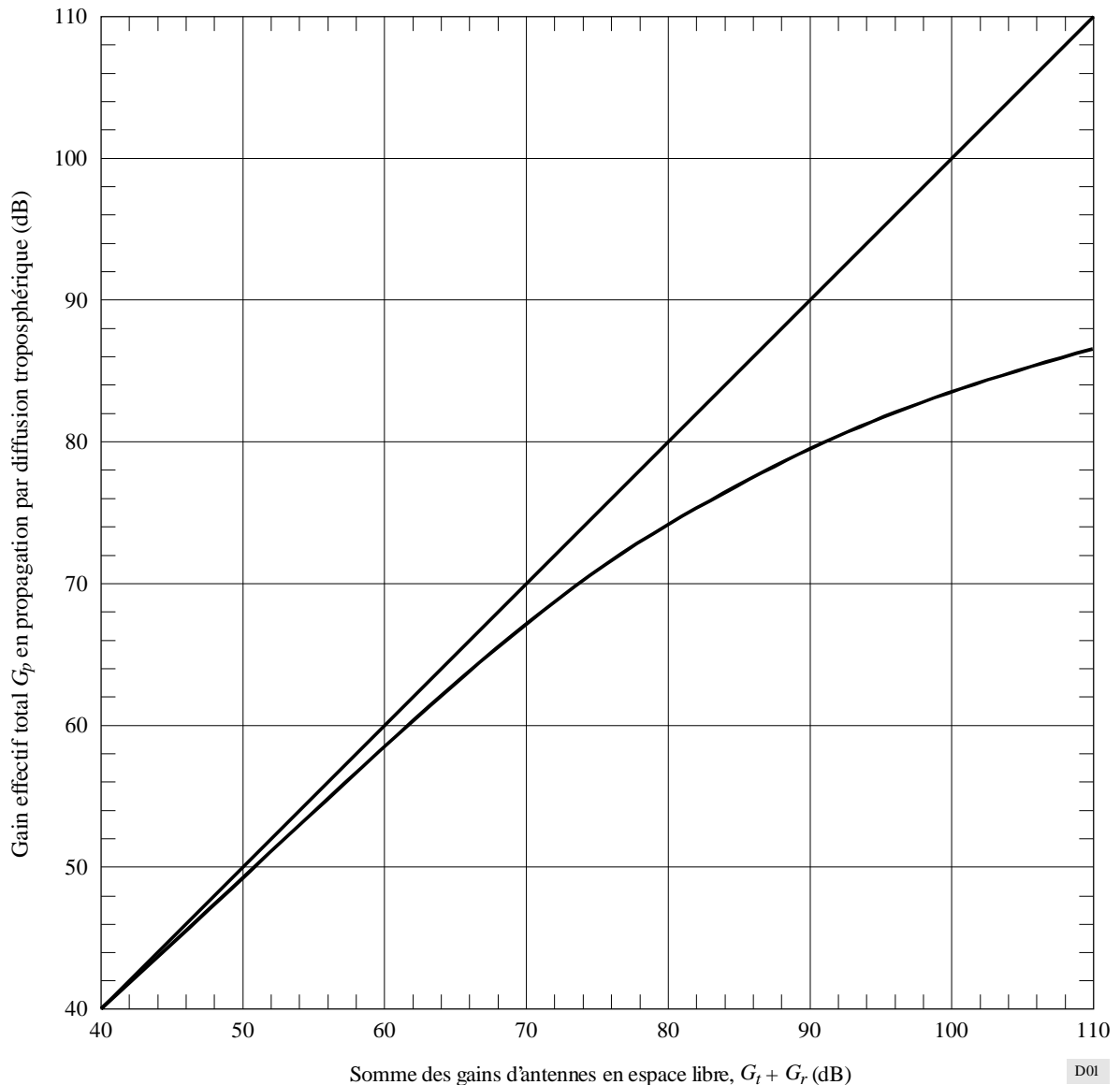
- étude des effets de la propagation, de manière à obtenir un niveau de puissance reçue suffisant et une largeur de bande d'émission appropriée;
- étude du partage des fréquences, en tenant compte de la puissance d'émission généralement élevée des faisceaux hertziens transhorizon.

Ces questions sont examinées dans la Recommandation UIT-R F.698.

**4. Réception en diversité sur les liaisons en faisceaux hertziens transhorizon**

Dans la plupart des systèmes transhorizon, on s'est efforcé de réduire les effets nuisibles des fluctuations dues à la propagation en mettant à profit les propriétés de corrélation partielle du signal transmis, au moyen d'une réception et/ou d'une émission en diversité. Les techniques de diversité sont aussi très utiles pour les systèmes numériques de faisceaux hertziens transhorizon car elles peuvent réduire la dégradation à court terme imputable aux évanouissements dus à la propagation par trajets multiples.

FIGURE 1  
Relations entre les gains d'antennes (propagation par diffusion troposphérique)



DOI

#### 4.1 Moyens d'obtenir des signaux en diversité

##### 4.1.1 Généralités

Les méthodes les plus classiques sont la diversité de fréquence (émission simultanée du même signal dans deux canaux ou davantage) et la diversité d'espace (utilisation de deux antennes, ou davantage, à la réception et/ou à l'émission). Dans certains systèmes en exploitation, on a utilisé une combinaison de la diversité de fréquence et de la diversité d'espace. On s'est rendu compte aussi des avantages que présente une forme de réception en diversité dans laquelle on tire parti des propriétés relativement sans corrélation de la direction d'arrivée et qui permet de réduire non seulement les difficultés dues aux évanouissements rapides, mais encore les pertes par couplage entre l'antenne et le milieu environnant.

Il n'est pas indispensable que les coefficients de corrélation soient faibles pour tirer des avantages substantiels de la réception en diversité.

#### 4.1.2 Diversité d'espace dans les systèmes à diffusion troposphérique

En ce qui concerne la diversité d'espace, les distances de diversité théoriques ont été étudiées en fonction de la distance de corrélation horizontale  $D_h$  perpendiculaire au trajet de la distance de corrélation horizontale  $D_a$  parallèle au trajet et de la distance de corrélation verticale  $D_v$ . Le paramètre le plus utilisé,  $D_h$  s'exprime par:

$$D_h = 3\lambda a / 4d \quad (1)$$

où:

$d$ : longueur du trajet

$a$ : rayon terrestre équivalent

$\lambda$ : longueur d'onde.

Dans de nombreux systèmes à diffusion troposphérique, on a adopté la valeur  $D_h = 100 \lambda$ .

#### 4.1.3 Diversité en fréquence dans les systèmes à diffusion troposphérique

On a trouvé, par la théorie, que le coefficient de corrélation en fréquence entre les enveloppes de deux signaux était donné par la formule:

$$\rho(f_2 - f_1) = \exp\left[-(2\pi\sigma)^2(f_2 - f_1)^2\right] \quad (2)$$

dans laquelle:

$$\sigma = 2l(\sin(\theta/2)/c)$$

où:

$\theta$ : angle de diffusion

$c$ : vitesse de la lumière

$l$ : écart type de chaque dimension du volume de diffusion (en coordonnées trirectangulaires);  $l$  est fonction de paramètres géométriques et radiométrologiques.

Jusqu'ici, la corrélation en fréquence a plus retenu l'attention des expérimentateurs que la corrélation dans l'espace. La corrélation en fréquence n'est pas seulement importante pour évaluer la capacité en largeur de bande, mais elle constitue aussi un paramètre pour la réalisation des systèmes à diversité de fréquence. Naturellement, la valeur minimale de l'écart à utiliser dépend de l'ouverture du faisceau et de la distance. Un écart de 3 MHz suffit pour donner lieu à un coefficient de corrélation inférieur ou égal à 0,6 sur des trajets de 226 et de 345 km aux fréquences 600 ou 2 120 MHz, avec une antenne d'émission de 10 m et une antenne de réception de 3 m.

#### 4.1.4 Diversité angulaire dans les systèmes à diffusion troposphérique

La diversité angulaire est une méthode qui permet d'utiliser au maximum une bande de fréquences limitée. Les résultats de certains essais effectués au Royaume-Uni entre 1,7 et 2,7 GHz sur des trajets de 250 à 350 km prouvent qu'avec des antennes d'un diamètre variant de 18 à 25 m on obtient des coefficients de corrélation de 0,2 et de 0,4 avec deux faisceaux d'antenne séparés par environ une largeur de faisceau, le chiffre le plus bas étant fourni par la diversité angulaire dans le plan vertical. Ces résultats concordent bien avec la théorie. Ces essais ont révélé une décorrélation notable à court terme, ils ont montré également que le coefficient de corrélation à court terme entre les faisceaux a nettement tendance à décroître en même temps que le niveau des signaux. Le premier de ces effets est propre à la diversité angulaire. On peut s'attendre que la performance globale d'une liaison à diversité angulaire correctement mise en œuvre soit voisine de celle de la diversité en fréquence, malgré un léger accroissement de l'affaiblissement de transmission, imputable aux compromis techniques indispensables.

Les études théoriques décrites prévoient que la diversité angulaire donnera les meilleurs résultats avec de grands angles de diffusion.

Une nouvelle confirmation de l'efficacité de la diversité angulaire a été donnée par les essais effectués au Japon à 1,8 GHz sur un trajet de 256 km avec des antennes d'un diamètre de 19 m (gain = 47,5 dB), où des coefficients de corrélation inférieurs à 0,4 ont été obtenus pour des séparations de faisceaux supérieures à environ 6 mrad.

## 4.2 Considérations sur la largeur de bande de transmission

Lorsqu'on évalue les effets de la réception en diversité au point de vue de la largeur de bande et de la qualité de transmission, il est commode de caractériser le système de transmission par un réseau ayant des caractéristiques amplitude/fréquence et phase/fréquence qui varient dans le temps d'une façon aléatoire.

On peut évaluer théoriquement la dispersion d'amplitude linéaire  $z$  en supposant que l'amplitude du signal à l'extrémité de la bande passante obéit à une loi de répartition de Rayleigh. La probabilité pour que l'on ait  $z < Z$  pour la réception sans diversité peut s'exprimer par la formule suivante où  $Z$  indique la valeur donnée de la dispersion d'amplitude linéaire:

$$P(z < Z) = 1 - \frac{1 - Z^2}{\sqrt{(1 + Z^2)^2 - 4rZ^2}} \quad (3)$$

où:

$r$ : coefficient de corrélation pour la largeur de bande,

$$r = \exp \left[ - \left( \frac{\Delta f}{\Delta f_0} \right)^2 \right]$$

$\Delta f$ : largeur de bande.

Pour les faisceaux hertziens à diffusion troposphérique:

$\Delta f_0$ : bande passante de corrélation

$$\Delta f_0 = \frac{a c}{d^2 \alpha}$$

où:

$a$ : rayon terrestre équivalent

$c$ : vitesse de la lumière

$d$ : longueur du trajet

$\alpha$ : ouverture du faisceau d'antenne aux points à mi-puissance.

Pour une réception en diversité d'ordre  $N$ , la probabilité  $P_N$  pour que l'on ait  $z < Z$  peut s'écrire:

$$P_N(z < Z) = \Phi \left( \sqrt{\frac{\pi N}{4 - \pi}} \right) - \Phi \left( \sqrt{\frac{\pi N}{4 - \pi}} \times \frac{1 - Z}{\sqrt{Z^2 - 2rZ + 1}} \right) \quad (4)$$

où:

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp(-t^2/2) dt \quad (\text{intégrale de probabilité})$$

Dans les mesures faites avec  $\Delta f = 0,5$  MHz, on a trouvé  $z < 0,7$  pour 30% du temps sans diversité et pour 3% du temps avec diversité (double). On pense qu'avec des ordres de diversité plus élevés l'amélioration est plus grande.

Pour les systèmes fonctionnant avec multiplexage par répartition en fréquence, les caractéristiques de largeur de bande du trajet de transmission sont telles qu'elles peuvent introduire un bruit d'intermodulation dans les voies téléphoniques transmises. Ce bruit est variable dans le temps et il se présente souvent sous la forme de pointes de bruit. On a montré que l'emploi de la réception en diversité peut avoir pour effet de réduire la probabilité d'apparition de ces pointes de bruit d'intermodulation.

En comparant les valeurs calculées et les valeurs mesurées du bruit d'intermodulation dû à la propagation par trajets multiples, on a constaté une concordance satisfaisante. Les mesures ont été effectuées sur un trajet transhorizon de 303 km, avec une ouverture du faisceau d'antenne de  $1^\circ$ .

## 5. Effets de la dispersion due à la propagation par trajets multiples sur la qualité des faisceaux hertziens transhorizon à modulation numérique

### 5.1 Effets généraux de la dispersion dans le temps due à la propagation par trajets multiples

Pour une bande de fréquences donnée, la dispersion due à la propagation par trajets multiples sur une liaison transhorizon à modulation numérique est beaucoup plus marquée que sur une liaison à visibilité directe. Il en résulte que ce phénomène de dispersion, facteur limitatif de la qualité des communications plus important que le rapport signal/bruit, se produit, pour les liaisons transhorizon, à partir d'un débit de transmission plus faible que pour les liaisons à visibilité directe.

Il est possible d'améliorer considérablement la qualité en profitant de l'amélioration propre à la diversité, moyennant l'emploi d'une égalisation adaptative.

Les prévisions:

- de l'augmentation de la probabilité d'erreur due à la dispersion par trajets multiples pour un ensemble donné de caractéristiques d'équipements et de trajets, et
- des améliorations de qualité dues à la diversité et à la réduction du brouillage entre symboles, réalisables avec une égalisation du type adaptatif,

sont exprimées par rapport à  $\sigma$  (moyenne quadratique de l'écart type du temps de propagation) qui est obtenu en exprimant la réponse impulsionnelle sur le trajet transhorizon comme une fonction de densité de probabilité.

### 5.2 Prévisions et mesures relatives à la qualité

La probabilité moyenne d'erreur binaire  $P_e$  pour une liaison par faisceaux hertziens transhorizon à modulation numérique, sujette à une dispersion par trajets multiples, dépend des facteurs ci-après:

$2\sigma/T$ : dispersion normalisée par trajets multiples, et

$W$ : (énergie par bit/densité spectrale de bruit) par canal de diversité,

où:

$T$ : période des symboles.

Dans le cas d'une «faible dispersion par trajets multiples» ( $2\sigma \ll T$ ), aucune protection spéciale contre le brouillage entre symboles n'est requise étant donné que les techniques de réception en diversité multiple normale sont garantes du niveau requis de probabilité d'erreurs irréductibles.

Dans le cas d'une «dispersion moyenne par trajets multiples» ( $2\sigma < T$ ), on utilise des mesures passives contre le brouillage entre symboles en plus de la réception en diversité. Une combinaison de diverses méthodes passives avec filtrage adapté du signal avec trajets multiples caractérise les méthodes actives utilisées pour combattre le brouillage entre symboles lorsque l'élimination de ce dernier est accompagnée de l'effet de diversité implicite dans la dispersion par trajets multiples.

En cas de «forte dispersion par trajets multiples» ( $2\sigma > T$ ), le brouillage entre symboles ne peut être combattu qu'en utilisant des méthodes adaptatives spéciales de réception.

Dans la pratique, la dispersion due aux trajets multiples présente des variations à court terme ainsi que des variations à long terme. Des mesures faites au Royaume-Uni ont montré que pour une valeur médiane de  $2\sigma$  égale à 106 ns, l'écart type de la variation à long terme de  $2\sigma$ , évalué d'après des échantillons de 10 ms (valeurs moyennes sur 92 s) était de 15 ns. L'écart type de la variation à court terme de  $2\sigma$ , évalué d'après des échantillons de 10 ms, était alors de 50 ns. Pour la liaison d'essai de 124 km transmettant à 2 048 kbit/s en MDP-4 cohérente, la valeur médiane de  $2\sigma/T$  était de 0,1.

### 5.3 Méthodes de transmission pour accroître l'ordre de diversité équivalent

Avec un débit binaire relativement faible dans la bande de fréquences attribuée, on peut utiliser des signaux multifréquences parallèles ou séquentiels pour chaque émetteur.

Les signaux multifréquences parallèles s'utilisent pour créer une série de fréquences équidistantes par modulation de fréquence supplémentaire, et sur cette base il est possible de réaliser une diversité en réception supplémentaire, par exemple une réception en diversité triple.

Les signaux multifréquences séquentiels (généralement de fréquence quadruple) peuvent être utilisés pour la diversité double ou quadruple en fréquence temporelle avec modulation combinée de fréquence et par déplacement de phase.

On considère comme une variante de la technique de diversité temporelle, la combinaison faite de codes connus et de l'entrelacement des bits pour la décorrélation des erreurs. Toutefois, cette méthode d'amélioration de la qualité est accompagnée d'un retard considérable dans la transmission de l'information.

#### 5.4 *Egalisation adaptative*

L'emploi des moyens d'égalisation adaptative pour réduire les brouillages entre symboles et, partant, augmenter la capacité de trafic des systèmes de faisceaux hertziens transhorizon à modulation numérique a été exposé dans la littérature. Cette égalisation permet d'inclure dans la conception du récepteur la diversité inhérente à la dispersion par trajets multiples, ce qui entraîne une amélioration prévisible pour ce qui est des erreurs, pour une valeur donnée de  $\sigma$ .

Idéalement, l'égalisation adaptative (égalisation linéaire) dans un canal radioélectrique à trajets multiples sous-entend une connexion en cascade entre le filtre adapté au signal entrant et le filtre transversal. Toutefois, en conditions réelles, le filtre d'entrée est adapté au signal émis de telle sorte qu'avec l'élimination de l'influence du brouillage multisymboles, l'effet de diversité implicite ne peut être obtenu de manière appropriée.

L'utilisation de la rétroaction de la décision est une méthode non-linéaire de traitement de signal; elle peut être utilisée pour compenser le brouillage entre symboles causé par des éléments du signal précurseur.

La réception avec évaluation d'une séquence discrète au moyen de l'algorithme de Viterbi est considérée comme une méthode permettant de résoudre, avec un maximum de probabilité *a posteriori*, le problème de l'évaluation de la séquence d'un processus de Markov discret dans le temps avec un nombre d'états fini. Lorsqu'on tient compte du filtrage adapté du signal avec trajets multiples, l'algorithme de Viterbi est considéré comme une méthode qui offre une réception optimale du signal dans un canal de communication à trajets multiples.

Le traitement spectral d'un signal avec trajets multiples sous-entend l'extraction d'un nombre de bandes de fréquences du signal au côté réception lorsque le spectre du signal est plus large que la largeur de bande de corrélation de fréquence du canal de communication. La combinaison d'échantillons de signal dans la gamme de fréquences avec des coefficients de pondération spécifiques rend possible non seulement l'élimination du brouillage entre symboles mais aussi, avec un filtrage adapté des signaux composants de sortie, d'aboutir à un effet de diversité implicite.

On trouve également dans la littérature la description d'essais de transmission réussis, sur faisceaux hertziens transhorizon avec modems adaptatifs, à des débits d'information allant jusqu'à 12,6 Mbit/s et à la fréquence de 4,6 GHz.

#### 5.5 *Evaluation comparative de modems efficaces*

Une évaluation comparative des modems d'efficacité élémentaire utilisés pour mettre en œuvre les diverses méthodes de transmission susmentionnées est donnée dans le Tableau 1.

Pour évaluer l'immunité au bruit de la méthode, on a déterminé le rapport entre la puissance moyenne du signal reçu et la densité spectrale de bruit pour un débit binaire d'information donné avec une probabilité d'erreur binaire de  $1 \times 10^{-6}$ . La réception en diversité quadruple fréquence et espace (deux émetteurs, deux antennes) a été prise en considération dans tous les cas. Le rapport signal-bruit correspond à l'ordre de diversité équivalent. On détermine le paramètre  $\beta$  qui caractérise le rapport entre la puissance moyenne du signal et la densité spectrale de bruit par bit d'information transmis. On définit le paramètre  $\gamma$  qui caractérise le débit binaire de l'information spécifique.

TABLEAU 1

N°	Caractéristiques de la méthode de transmission	Paramètres		
		Débit binaire d'information (Mbit/s)	$\beta$ (dB)	$\gamma$ (bit/s) (Hz)
1	Réception cohérente de signaux avec diversité fréquence-temps et décalage adaptatif	0,5-1	7	0,05-0,1
2	Réception de signaux à fréquence composante équidistante MDP-2D	0,5-2	7	0,08-0,3
3	Filtrage adapté du signal avec trajets multiples avec emploi de l'algorithme de Viterbi et du code de Golay (24, 12) avec entrelacement	5	7	0,5
4	Egalisation adaptative décision-rétroaction	5-10	12	1
5	Traitement spectral du signal sur trajets multiples MDP-2D	5-10	10	1