

## RECOMMANDATION UIT-R F.1093-2\*

**Effets de la propagation par trajets multiples sur la conception et le fonctionnement des systèmes hertziens fixes numériques en visibilité directe**

(Question UIT-R 122/9)

(1994-1997-2006)

**Domaine de compétence**

A partir de renseignements puisés dans les textes publiés par la Commission d'études 3 des radiocommunications et de mesures faites par les administrations, la présente Recommandation a pour objet d'exposer les phénomènes de propagation qui ont une incidence sur la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques. L'Annexe 1 explique en quoi les évanouissements par trajets multiples sont le principal facteur de propagation qui influe sur le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques exploités à des fréquences inférieures à 10 GHz environ. Elle porte également sur la façon dont les techniques de diversité et d'égalisation adaptative peuvent réduire la dégradation subie par les canaux.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples entraîne parfois une distorsion et une réduction de la puissance des signaux reçus sur les trajets en visibilité directe et, en conséquence, provoque une dégradation de la qualité de fonctionnement des systèmes hertziens fixes (FWS);
- b) que la Recommandation UIT-R P.530 fournit des données et des méthodes pour la prévision de la propagation et la planification des trajets pour les systèmes FWS;
- c) qu'il existe des contre-mesures permettant d'atténuer les effets des évanouissements par trajets multiples sur la qualité de fonctionnement des systèmes, notamment la réception en diversité et l'égalisation adaptative;
- d) qu'il est nécessaire d'utiliser des méthodes permettant d'analyser les effets des évanouissements par trajets multiples sur le taux d'erreur des systèmes FWS pour comparer des variantes de conception,

*recommande*

- 1** d'inclure des mesures préventives de lutte contre les évanouissements par trajets multiples dans les faisceaux hertziens, le cas échéant, afin d'améliorer la qualité en matière d'erreur;
- 2** de s'inspirer des méthodes décrites dans l'Annexe 1 pour la planification des liaisons radio-électriques.

---

\* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

## Annexe 1

### **Effets de la propagation par trajets multiples sur la conception et le fonctionnement des systèmes hertziens fixes numériques en visibilité directe**

#### **1 Introduction**

A partir de renseignements puisés dans les textes publiés par la Commission d'études 3 des radiocommunications et de mesures faites par les administrations, la présente Annexe a pour objet d'exposer les phénomènes de propagation qui ont une incidence sur la conception et sur le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques. La première partie de l'Annexe 1 explique en quoi les évanouissements par trajets multiples sont le principal facteur de propagation qui influe sur le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques exploités à des fréquences inférieures à 10 GHz environ. Les paragraphes qui suivent examinent comment les techniques de diversité et d'égalisation adaptative peuvent réduire la dégradation subie par les canaux. On y trouve, pour terminer, une prévision de la qualité de fonctionnement des faisceaux hertziens en fonction de facteurs précédemment évoqués.

Le Manuel sur les faisceaux hertziens numériques contient des renseignements plus détaillés sur l'application des directives fournies dans la présente Annexe.

#### **2 Considérations relatives à la propagation**

Les textes établis par la Commission d'études 3 des radiocommunications contiennent une somme de renseignements sur les phénomènes de propagation dont il convient de tenir compte pour la conception et la mise en œuvre des faisceaux hertziens. En particulier, la Recommandation UIT-R P.530 s'intéresse spécialement aux «données de propagation et aux méthodes de prévision pour les faisceaux hertziens à visibilité directe». Cette Recommandation présente les renseignements selon les effets de propagation à étudier. Les renseignements météorologiques pertinents concernant les mécanismes de propagation sont donnés dans d'autres Recommandations de la Série P et notamment dans les Recommandations UIT-R P.834 et UIT-R P.676.

Les conditions de propagation varient d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre, et la probabilité d'apparition de ces phénomènes peut varier de plusieurs ordres de grandeur. En conséquence, il faut parfois entre trois et cinq années pour formuler des conclusions adéquates sur les résultats d'une expérience de propagation. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'établir les caractéristiques des systèmes, on ne dispose pas toujours d'un délai aussi important, raison pour laquelle des modèles de variabilité de certains paramètres ont été examinés dans la Recommandation UIT-R P.841.

A partir de renseignements sur la propagation, il a été établi que, pour un trajet bien conçu, non exposé à des évanouissements par diffraction ou à des réflexions sur le sol, la propagation par trajets multiples est le facteur dominant à l'origine des évanouissements au-dessous de 10 GHz. Au-dessus de cette fréquence, les effets des précipitations ont de plus en plus tendance à déterminer la longueur acceptable du trajet en fonction des objectifs de disponibilité fixés pour le faisceau hertzien. La réduction de la longueur du trajet qu'impose une élévation de la fréquence diminue la gravité des évanouissements par trajets multiples. Normalement, les deux principales causes d'évanouissements s'excluent mutuellement. Vu la distinction faite entre disponibilité et objectifs de qualité en matière d'erreur, on peut dire que les précipitations contribuent essentiellement à l'indisponibilité alors que la propagation par trajets multiples influe surtout sur la qualité en matière

d'erreur. Un autre effet des précipitations, la rétrodiffusion due à la pluie, peut intervenir dans le choix de la disposition des canaux radioélectriques.

Les effets de propagation dus à diverses formes de précipitations ne sont généralement pas dispersifs en fréquence alors que la propagation par trajets multiples provoquée par les couches de la troposphère peut l'être, ce qui risque de provoquer une grave distorsion des signaux porteurs d'information. Le développement rapide qu'ont connu les systèmes numériques de télécommunication a nécessité une meilleure compréhension de ces effets et a conduit à trouver des solutions pour y remédier.

### **3 Mesures préventives pour lutter contre les effets de propagation**

Deux types de mesures préventives sont couramment employés pour lutter contre la distorsion de propagation: les techniques de diversité et les égaliseurs de canaux adaptatifs, qui s'efforcent de lutter contre les affaiblissements et les distorsions imputables au milieu de propagation. L'efficacité d'une contre-mesure appliquée à l'évanouissement s'exprime, en général, par un coefficient d'amélioration. Sur un trajet unique, le coefficient d'amélioration est le rapport du temps d'interruption (voir la Note 1) sans contre-mesure et du temps d'interruption avec contre-mesure. Le coefficient d'amélioration dépend du seuil d'interruption choisi.

NOTE 1 – Le temps d'interruption est une expression générale indiquant la durée pendant laquelle le système dépasse un seuil de taux d'erreur binaire (TEB) choisi.

#### **3.1 Techniques de diversité**

Les techniques les plus répandues sont la diversité de fréquence et la diversité d'espace. Les Recommandations UIT-R F.752 et UIT-R P.530 ainsi que le Manuel – Faisceaux hertziens numériques (édition 1996) présentent d'autres techniques.

##### **3.1.1 Diversité d'espace**

La diversité d'espace est une des méthodes les plus efficaces de lutte contre les évanouissements dus aux trajets multiples. Pour les faisceaux hertziens numériques, ce sont les objectifs de qualité qui peuvent être difficiles à atteindre en raison des distorsions que les effets des trajets multiples provoquent sur les signaux, et la conception des faisceaux hertziens doit alors souvent reposer sur un recours à la diversité d'espace.

Dans les systèmes utilisant la diversité d'espace, il est rare que les signaux reçus par deux antennes à séparation verticale subissent simultanément des évanouissements profonds. Le facteur d'amélioration susceptible d'être obtenu pour un système à l'aide de ces deux signaux dépend à la fois des facteurs de propagation et de la configuration du faisceau hertzien, c'est-à-dire de sa vulnérabilité par rapport aux pertes de puissance et à la distorsion due aux trajets multiples que subissent les signaux ainsi qu'à la méthode utilisée pour le traitement des signaux. Afin d'évaluer les améliorations que peut offrir la diversité d'espace, on utilise couramment le facteur d'amélioration des évanouissements sur une seule fréquence (voir la Recommandation UIT-R P.530) ou des moyens analogues vérifiés pour les applications régionales, en particulier lorsqu'il s'agit de considérations relatives au bruit thermique dans le calcul des probabilités d'interruption (voir le § 4).

En réduisant l'apparition effective des évanouissements profonds, la diversité d'espace permet de réduire les effets de différents types de brouillages, parmi lesquels on citera en particulier les effets à court terme des brouillages causés par les canaux à polarisations croisées opérant sur la même fréquence ou sur des fréquences adjacentes, les effets des brouillages occasionnés par d'autres systèmes et ceux des brouillages propres au système considéré.

La dispersion d'amplitude linéaire (LAD) est une composante importante de la distorsion des signaux et des effets de diaphonie de quadrature qui peut être réduite par l'emploi de la diversité d'espace. Des méthodes de combinaison spécialement conçues pour réduire au minimum la LAD (voir la Recommandation UIT-R F.752) comptent parmi celles qui sont particulièrement efficaces contre ces distorsions.

L'amélioration obtenue par la diversité d'espace dépend de la manière dont les deux signaux sont traités dans le récepteur. Les commutateurs sans à-coup et les combineurs à variation de phase sont deux exemples de techniques (voir la Recommandation UIT-R F.752). Le commutateur sans à-coup assure la commutation vers le récepteur dont l'œil est le plus ouvert ou dont le taux d'erreur est le moins élevé, et les combineurs utilisent, soit la même phase, soit divers types d'algorithmes qui ont pour effet de réduire la dispersion au minimum. La commutation sans à-coups et la combinaison utilisant la même phase présentent des facteurs d'amélioration très semblables.

### 3.1.2 Diversité de fréquence

L'amélioration par diversité de fréquence sur un bond de faisceaux hertziens numériques à configuration 1 + 1 dépend de la corrélation qui existe entre les dégradations (profondeur d'évanouissement, dispersion de l'amplitude et dispersion du temps de propagation de groupe par exemple) dans les deux canaux radioélectriques. Les résultats de certaines expériences indiquent qu'il existe une faible corrélation de dispersion d'amplitude entre deux canaux de 30 MHz espacés de 60 MHz. La meilleure amélioration découlant de la méthode par diversité de fréquence peut généralement être obtenue à l'aide de la diversité de fréquence à bandes croisées.

Dans les systèmes  $N + 1$ , l'amélioration obtenue par diversité de fréquence qui est applicable à un canal actif est inversement proportionnelle au nombre de canaux en service. Lorsque l'on envisage de faire appel à la diversité de fréquence dans une section de commutation comportant plusieurs bonds, il convient de tenir compte du fait que l'amélioration obtenue par diversité de fréquence dépend de la corrélation de la dégradation qui existe entre les canaux radioélectriques d'un même bond et de celle qui existe dans les autres bonds qui constituent la section de commutation.

Pour obtenir l'amélioration attendue avec la méthode par diversité de fréquence dans des faisceaux hertziens numériques, il faut disposer d'un système de commutation sans à-coups. En outre, la procédure globale de commutation doit être effectuée avant l'apparition d'une dégradation sensible du canal utilisé. Un temps de réponse de l'ordre de 10 ms ou moins est convenable.

## 3.2 Egalisation adaptative des canaux

Sous une certaine forme, un dispositif d'égalisation du récepteur est généralement nécessaire dans le canal radioélectrique. L'égaliseur doit être doté d'une commande adaptative pour suivre les variations des caractéristiques de transmission à mesure que les conditions de propagation évoluent. Les techniques d'égalisation employées peuvent se répartir en deux groupes, selon que leur mode de fonctionnement est décrit plus naturellement dans le domaine des fréquences ou dans celui du temps, à savoir: «égalisation dans le domaine fréquentiel» et «égalisation dans le domaine temporel».

### 3.2.1 Egalisation du domaine fréquentiel

Ce type d'égaliseur comprend un ou plusieurs réseaux linéaires dont les réponses aux amplitudes et aux temps de propagation de groupe permettent de compenser les dégradations de transmission qui semblent les plus susceptibles d'entraîner une détérioration de la qualité de fonctionnement du faisceau hertzien pendant les périodes d'évanouissements dus à une propagation par trajets multiples.

### 3.2.2 Egalisation dans le domaine temporel

Avec les faisceaux hertziens numériques, on peut considérer que le traitement des signaux dans le domaine temporel est la technique d'égalisation la plus indiquée puisqu'elle vise à combattre directement les brouillages intersymboles. L'information de commande est obtenue par corrélation du brouillage qui apparaît à l'instant de décision avec les divers symboles adjacents qui en sont à l'origine et sert à régler les lignes de retard à prises multiples pour fournir les signaux de suppression appropriés. Ce type d'égaliseur permet de traiter simultanément et indépendamment les distorsions que les variations d'amplitude et de temps de propagation de groupe provoquent dans le canal où se produit l'évanouissement, ce qui assure une compensation des caractéristiques soit à phase minimale soit à phase non minimale.

Dans les faisceaux hertziens employant la modulation en quadrature, on sait que les effets fortement perturbateurs des évanouissements sont liés à la diaphonie qu'engendrent les asymétries dans les voies. Ainsi donc, pour bien remplir son rôle, il faut qu'un égaliseur dans le domaine du temps puisse fournir les moyens de compenser les distorsions de quadrature.

### 3.2.3 Facteurs permettant d'améliorer la qualité de fonctionnement

Les interruptions de fonctionnement des faisceaux hertziens numériques sont provoquées par la combinaison de trois grands types de dégradations: les brouillages, le bruit thermique et la distorsion du signal; l'égalisation ne donne généralement de bons résultats que pour le dernier type. C'est pourquoi dans l'étude des améliorations que l'emploi d'égaliseurs adaptatifs permet d'obtenir, on observera les réductions du temps d'interruption les plus importantes sur les bonds pour lesquels on sait que les défaillances sont essentiellement dues à une distorsion des signaux.

### 3.3 Egaliseurs adaptatifs associés à des combineurs de diversité d'espace

Il est possible d'obtenir des réductions spectaculaires de la fréquence des interruptions dues aux trajets multiples si la technique des égaliseurs adaptatifs de canaux est associée à la diversité d'espace. Les améliorations mesurées dépassent généralement le produit des améliorations correspondantes obtenues séparément par diversité et par égalisation, ce qui montre qu'un phénomène synergétique important intervient.

L'amélioration obtenue avec la diversité d'espace et l'égalisation est à peu près égale au produit de l'amélioration par diversité d'espace et du carré de l'amélioration obtenue par l'égaliseur. Cette remarque semble particulièrement s'appliquer au cas de la diversité avec commutation.

### 3.4 Considérations relatives à la conception du système en présence de propagation par conduits

On sait que, dans certaines zones géographiques, il existe des conduits à des altitudes pouvant atteindre ou dépasser 1000 m. Dans les emplacements où l'on sait qu'il existe des conduits, il convient pour la conception des faisceaux hertziens numériques appelés à y fonctionner de tenir compte des facteurs suivants:

- le pointage et la position de l'antenne,
- la largeur du faisceau de l'antenne nécessaire pour réduire au minimum la quantité d'énergie rayonnée vers les couches réfléchissantes et le sol ou provenant de ces couches et du sol,
- le schéma de modulation employé, afin d'augmenter la durée des symboles,
- la géométrie du trajet nécessaire pour réduire au minimum la probabilité de réflexions destructrices.

#### 4 Calcul des probabilités d'interruption

Dans les systèmes numériques, les interruptions sont provoquées par la distorsion des signaux imputable aux évanouissements sélectifs en fréquence, aux brouillages et au bruit thermique. La durée d'interruption totale dépend de ces trois éléments. Pour le calcul du temps d'interruption des systèmes numériques, il existe différentes méthodes que nous allons brièvement évoquer dans le présent paragraphe. Les paramètres types pris en considération pour ces méthodes sont les suivants:

- longueur du trajet,
- fréquence de fonctionnement,
- diagramme de rayonnement de l'antenne,
- paramètres de diversité,
- irrégularité du sol,
- dégagement du trajet,
- zone climatique.

La méthode classique de calcul des temps d'interruption pour des systèmes analogiques repose sur la notion d'évanouissements à une seule fréquence: elle n'est donc pas directement applicable aux faisceaux hertziens numériques à capacité élevée. Une augmentation de la marge contre les évanouissements qui, dans les faisceaux hertziens analogiques, tend à réduire l'effet du bruit thermique, n'améliore pas le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques si un évanouissement dû à des trajets multiples a déjà ramené l'amplitude du diagramme de l'œil à zéro. Il s'ensuit que l'on ne peut recourir à une augmentation de la puissance d'émission pour que les faisceaux hertziens numériques satisfassent aux objectifs fixés en matière d'interruption.

Trois méthodes générales ont servi à l'élaboration des méthodes de prévision des interruptions: les méthodes de la marge contre les évanouissements, les méthodes des courbes de signature et les méthodes utilisant la LAD. A ce jour, il n'existe pas de données suffisantes pour conclure que l'une des méthodes précitées est nettement supérieure aux autres. Toutefois, la Recommandation UIT-R P.530 renferme un ensemble de méthodes, exposées par étapes, qui s'appliquent aux systèmes protégés et non protégés (diversité d'espace, de fréquence et angulaire), y compris les systèmes fonctionnant en double polarisation dans le même canal. La méthode de signature permet d'estimer la réduction de la qualité de fonctionnement due à la distorsion. Les méthodes détaillées dans la Recommandation UIT-R P.530 sont recommandées, à moins que d'autres, réputées comme étant plus précises, soient disponibles pour telle ou telle région.

On trouvera ci-après une description des méthodes générales, l'objectif étant de les expliciter et d'indiquer les nombreuses variantes existant dans les différents pays et différentes régions du monde.

##### 4.1 Méthodes de la marge contre les évanouissements

L'emploi de marges contre les évanouissements en tant que caractéristiques des faisceaux hertziens découle de la loi bien connue relative aux évanouissements dus aux trajets multiples sur une seule fréquence. Le temps  $T$  dans un mois à forts évanouissements où le niveau de la tension à la réception est égal ou inférieur à  $L$ , par rapport à une valeur unité en espace libre est donné par  $T = AL^2$  où  $A$  est une constante de proportionnalité déterminée par le nombre de secondes dans un mois et par les caractéristiques du trajet.

Le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques n'est pas uniquement déterminé par la marge contre les évanouissements uniformes: la notion de marge «nette» ou «effective» contre les évanouissements pour les faisceaux hertziens numériques doit être utilisée. En remplaçant la marge contre les évanouissements uniformes par la marge nette contre les évanouissements, on peut

obtenir approximativement le temps d'interruption sur le bond en s'inspirant de la Recommandation UIT-R P.530. La marge «nette» contre les évanouissements est définie comme la profondeur d'évanouissement à une seule fréquence (dB) qui est dépassée pendant le même nombre de secondes qu'un certain seuil du TEB de, par exemple,  $1 \times 10^{-3}$ .

## 4.2 Méthodes des courbes de signature

Les signatures peuvent servir à calculer les interruptions et à comparer la vulnérabilité respective de divers systèmes hertziens numériques aux effets des évanouissements sélectifs en fréquence.

### 4.2.1 Mesure des signatures

On peut mesurer les signatures en faisant une approximation des évanouissements réels au moyen d'un simulateur à deux rayons. Le modèle simplifié à trois rayons a comme fonction de transfert:

$$H(\omega) = a [1 - b \exp(-j(\omega - \omega_0)\tau)] \quad (1)$$

où l'on admet que le rayon direct a une amplitude égale à l'unité et que le rayon retardé a un retard  $\tau$  et une amplitude  $b$  et où « $a$ » est un facteur de proportionnalité. Le point le plus bas de cet évanouissement se trouve à une distance  $f_0$  de la fréquence centrale de la voie et a une profondeur  $B = -20 \log \lambda$  avec  $\lambda = 1 - b$ . La signature correspond à la courbe qui représente la valeur critique  $B_c$  en fonction de  $f_0$  pour le taux d'erreur correspondant à une interruption. Bien qu'une valeur de 6,3 ns pour  $\tau$  ait été utilisée par plusieurs administrations et que les distributions statistiques associées de  $b$  et  $f_0$  aient été déterminées après étude d'un grand nombre d'évanouissements, les signatures sont parfois mesurées pour d'autres valeurs de  $\tau$ . On peut utiliser la formule (1) pour tenir compte des évanouissements à phase non minimale à l'aide de valeurs négatives du temps de propagation  $\tau$ .

Certaines méthodes de calcul des interruptions reposent sur l'hypothèse selon laquelle  $\tau$  est une variable aléatoire continue. Dans ces conditions, des règles de similitude sont nécessaires pour estimer la variation de  $b_c(\tau)$  en fonction de  $\tau$ . Différentes règles de similitude ont été proposées pour  $b_c(\tau)$ . Selon la règle linéaire, applicable uniquement à des retards courts, la hauteur en longueurs d'onde ( $\lambda$ ) est proportionnelle à  $\tau$ . Des règles d'échelle plus précises peuvent aussi être appliquées.

La largeur de la signature,  $W(f_0)$ , reste pratiquement constante par rapport au retard, sauf lorsque celui-ci tend vers zéro: elle est alors multipliée par deux chaque fois que le temps de propagation est divisé par deux.

### 4.2.2 Paramètre de système normalisé, $K_n$

L'effet des caractéristiques de l'équipement est exprimé par les valeurs du paramètre de système normalisé  $K_n$ , lorsque ce paramètre est évalué à partir de signatures de système mesurées. Théoriquement, on peut considérer que les paramètres normalisés du faisceau hertzien sont déterminés à partir d'une «signature normalisée du faisceau hertzien». Si l'on ramène les signatures du faisceau hertzien à une période d'apparition des symboles spécifiée (par exemple, 1 ns) et au retard relatif des échos (par exemple, 1 ns), alors les signatures ainsi obtenues, connues sous le nom de «signatures normalisées», caractérisent les paramètres du faisceau hertzien tels que la méthode de modulation, le facteur de décroissance et le type d'égaliseur, grâce à une approximation de la signature fondée sur l'utilisation du rectangle le plus approprié, on obtient  $K_n$  à l'aide de la formule suivante:

$$K_n = (T^2 \cdot W \cdot \lambda_a) / \tau_r \quad (2)$$

où:

$T$ : durée symbole du système (ns)

$W$ : largeur de la signature (GHz)

$\lambda_a$ : valeur moyenne de la signature (linéaire)  $\lambda_c(f) = 1 - b_c(f)$

$\tau_r$ : retard de référence pour  $\lambda_a$  (ns).

Le Tableau 1 donne des valeurs  $K_n$  pour des récepteurs dépourvus d'égalisation adaptative. L'utilisation d'égaliseurs adaptatifs transversaux dans la bande de base améliore la qualité du système, de sorte que les valeurs de la zone de signature normalisée  $K_n$  sont normalement réduites à 1/10 environ des valeurs mentionnées au Tableau 1.

TABLEAU 1

Valeurs de  $K_n$  pour diverses méthodes de modulation sans égalisation

Méthode de modulation	$K_n$
MAQ-64	15,4
MAQ-16	5,5
MDP-8	7,0
MDP-4	1,0