

RECOMMANDATION UIT-R SM.1046

**DÉFINITIONS DU FACTEUR D'UTILISATION DU SPECTRE ET DE L'EFFICACITÉ
D'UTILISATION DU SPECTRE D'UN SYSTÈME RADIOÉLECTRIQUE**

(Question UIT-R 47/1)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le spectre est une ressource naturelle limitée qui a une grande importance économique et sociale;
- b) que les besoins en matière d'utilisation du spectre augmentent rapidement;
- c) que plusieurs facteurs - utilisation des diverses bandes de fréquences attribuées à des services radioélectriques donnés, méthodes associées de planification des fréquences des réseaux assurant ces services, caractéristiques des émetteurs, des récepteurs et des antennes utilisées, etc. – influent considérablement sur le niveau et l'efficacité d'utilisation du spectre et qu'en optimisant ces paramètres au moyen de techniques nouvelles ou améliorées, on peut réaliser d'importantes économies de spectre;
- d) qu'il est nécessaire de définir le facteur d'utilisation du spectre et l'efficacité d'utilisation du spectre afin de disposer d'un moyen de comparaison et d'analyse permettant d'évaluer les avantages offerts par des techniques nouvelles ou améliorées, moyen qu'utilisent en particulier les administrations pour la planification à long terme de l'utilisation du spectre et la planification du développement des radiocommunications;
- e) qu'il serait très utile de comparer les efficacités d'utilisation du spectre des différents systèmes existants lorsqu'il s'agit de mettre au point des techniques nouvelles ou améliorées ou d'évaluer les performances des systèmes existants,

recommande

1. de poser comme principe de base que le paramètre tridimensionnel «largeur de bande-espace-temps», doit servir à mesurer l'utilisation du spectre - comme cela est illustré à l'Annexe 1 pour les équipements radioélectriques d'émission et de réception;
2. de poser comme principe de base que la mesure de l'efficacité d'utilisation du spectre est le rapport volume d'informations transmises sur une distance donnée (ou la communication réalisée) à facteur d'utilisation du spectre (voir l'Annexe 1). Des exemples d'application de ce principe sont donnés dans l'Annexe 2;
3. d'utiliser le principe de base d'efficacité relative d'utilisation du spectre exposé dans l'Annexe 1, pour les comparaisons d'efficacité d'utilisation du spectre entre systèmes radioélectriques;
4. de comparer les efficacités d'utilisation du spectre entre systèmes radioélectriques analogues assurant les mêmes services de radiocommunication comme indiqué à l'Annexe 1;
5. de tenir compte, pour l'évaluation de l'efficacité d'utilisation du spectre, des interactions des divers systèmes radioélectriques et réseaux à l'intérieur d'un environnement électromagnétique donné.

ANNEXE 1

**Critères généraux d'évaluation du facteur d'utilisation du spectre
et de l'efficacité d'utilisation du spectre****1. Facteur d'utilisation du spectre**

L'efficacité d'utilisation du spectre dépend en particulier des moyens et techniques d'isolation utilisés: antennes directives, espacement géographique, partage des fréquences, polarisations orthogonales, temps partagé, répartition dans le temps. Elle dépend aussi de la définition même de l'utilisation du spectre. Ainsi, la mesure de l'utilisation du spectre

représentée par le facteur d'utilisation du spectre U , est définie comme étant le produit de la largeur de bande par l'espace géométrique (ou géographique) et par le temps interdits aux autres utilisateurs potentiels:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (1)$$

où:

B : largeur de la bande de fréquences

S : espace géométrique (généralement une superficie)

T : temps.

L'espace géométrique considéré peut aussi être un volume, une droite, une courbe (par exemple, l'orbite des satellites géostationnaires) ou un secteur angulaire autour d'un point. Le volume interdit dépend de la densité spectrale de puissance. Dans de nombreuses applications où le service est assuré de manière continue, la dimension temps peut être négligée. Par contre, pour certaines applications comme la radiodiffusion et les services mobiles sur un seul canal, le partage dans le temps est un facteur important et les trois facteurs ci-dessus doivent être pris simultanément en considération et optimisés.

La mesure du spectre utilisé peut être calculée en multipliant la largeur de bande délimitant l'émission (largeur de bande occupée, par exemple) par sa zone de brouillage, elle peut aussi tenir compte de la forme réelle de la densité spectrale de puissance de l'émission considérée et des caractéristiques de rayonnement de l'antenne.

Habituellement, on considère que ce sont les émetteurs radioélectriques qui utilisent le spectre. Ils utilisent l'espace-spectre en injectant dans certaines de ses parties, une puissance radioélectrique telle qu'elle provoque un brouillage inacceptable qui empêche l'utilisation de récepteurs relevant d'autres systèmes en certains lieux, à certaines heures et sur certaines fréquences. Soulignons que l'émetteur interdit l'espace aux récepteurs seulement. Le simple fait que l'espace contient de l'énergie radioélectrique n'empêche aucunement un autre émetteur d'émettre de la puissance vers le même lieu, cela revient à dire qu'un émetteur n'interdit pas le fonctionnement d'un autre.

Les récepteurs utilisent l'espace-spectre dans la mesure où ils en interdisent l'accès à certains émetteurs. Le simple fonctionnement d'un récepteur ne cause pas de brouillage à un autre récepteur (à moins qu'il soit fortuitement une source de rayonnement, encore que dans ce cas son champ d'action effectif soit relativement petit). D'ailleurs, les administrations peuvent refuser d'octroyer des licences pour l'exploitation de certains émetteurs afin de garantir une réception sans brouillage. Cette protection peut être de nature spatiale (distance de séparation, distance de coordination), spectrale (bandes de garde) ou temporelle (aux Etats-Unis d'Amérique, il existe des stations de radiodiffusion sur ondes hectométriques dont l'exploitation est limitée aux heures diurnes). C'est cet ensemble d'interdictions qui constitue l'«utilisation» de l'espace radioélectrique par le récepteur. Les bandes de fréquences attribuées à la radioastronomie constituent un exemple évident de l'utilisation de l'espace-spectre par des récepteurs.

Compte tenu de ce qui précède, on peut définir une unité de mesure de l'espace-spectre par subdivision de la ressource en deux espaces - un espace émission et un espace réception - et donc définir deux unités pour la mesure de chaque espace. Dans un souci de simplicité on pourra recombinaison les deux unités en une seule.

On trouvera au Chapitre 6 du Manuel sur la gestion nationale du spectre des précisions concernant le calcul du facteur d'utilisation du spectre.

2. Efficacité d'utilisation du spectre

D'après sa définition, l'efficacité d'utilisation du spectre (SUE) (expression abrégée: «efficacité spatiale») d'un système de radiocommunication peut s'exprimer comme suit:

$$SUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (2)$$

où:

M : volume d'information transféré sur une certaine distance.

3. Efficacité relative d'utilisation du spectre

Le concept d'efficacité relative d'utilisation du spectre (RSE) peut permettre de comparer les efficacités d'utilisation du spectre de deux systèmes radioélectriques analogues assurant le même service.

L'efficacité relative d'utilisation du spectre est définie comme le rapport de deux efficacités d'utilisation du spectre, dont l'une peut être celle d'un système servant de référence à la comparaison. Elle est donc donnée par la formule :

$$RSE = SUE_a / SUE_{std} \quad (3)$$

où:

RSE : efficacité relative d'utilisation du spectre (rapport de deux SUE)

SUE_{std} : efficacité d'utilisation du spectre d'un système de référence

SUE_a : efficacité d'utilisation du spectre du système étudié

Le système de référence pourra être le plus communément:

- le système le plus efficace en théorie (système parfait) ou,
- un système facile à définir et à comprendre ou,
- un système largement utilisé (de fait un système qui est un classique de l'industrie).

L'efficacité relative d'utilisation du spectre (RSE) sera un nombre positif compris entre 0 et l'infini. Lorsque le système de référence utilisé est le système parfait, la valeur de l'efficacité RSE sera comprise entre 0 et 1.

Conformément aux principes de la théorie de l'information, la capacité de communication d'une voie de communication du système parfait sur laquelle un abonné ou un auditeur reçoit une communication utile, est déterminée par la relation:

$$C_0 = F_0 \ln(1 + \rho_0)$$

où:

F_0 : largeur de bande utile de la communication

ρ_0 : rapport signal/bruit à la sortie du récepteur.

Si le rapport signal/bruit à l'entrée du récepteur est égal au rapport de protection ρ_s et la largeur de bande de la voie de communication sur laquelle les signaux sont émis est égale à F_m , la capacité de communication est $C_p = F_m \ln(1 + \rho_s)$. Elle doit être supérieure ou égale à la capacité de la voie sur laquelle l'abonné reçoit une communication utile, c'est-à-dire que l'on doit avoir $C_p \geq C_0$. Ainsi, la valeur minimale possible du rapport de protection ρ_s pour laquelle l'abonné recevra une communication avec un rapport signal/bruit égal à ρ_0 est définie par:

$$\rho_s = (1 + \rho_0)^{F_0/F_m} - 1 \quad (4)$$

Le principal avantage du calcul direct de l'efficacité relative RSE est qu'elle est souvent plus facile à calculer que l'efficacité SUE. Comme les systèmes utilisés pour le calcul de l'efficacité relative assurent le même service, ils auront en général de nombreux facteurs communs (parfois même des composants physiques communs), et par conséquent, s'agissant d'un rapport, ces facteurs communs disparaîtront lors de la simplification des formules détaillées et il ne sera pas nécessaire de les calculer. Les calculs seront donc bien souvent moins complexes.

On trouvera au Chapitre 6 du Manuel sur la gestion nationale du spectre des exemples de calcul d'efficacité relatives RSE.

4. Comparaison des efficacités d'utilisation du spectre

Comme indiqué plus haut, les valeurs de l'efficacité d'utilisation du spectre (SUE) peuvent être calculées pour plusieurs systèmes différents et être comparées afin de déterminer les efficacités relatives de ces systèmes. De telles comparaisons exigent certaines précautions. Ainsi, l'efficacité d'utilisation du spectre d'un système mobile terrestre et celle d'un radar sont très différentes. Les vitesses de transfert des informations, les récepteurs et les émetteurs sont si différents que la comparaison des deux efficacités d'utilisation du spectre n'a pas de sens et ne présente aucun intérêt. La comparaison ne devra donc porter que sur des systèmes analogues assurant les mêmes services de radiocommunication. On aura avantage à effectuer les comparaisons d'efficacité d'utilisation du spectre ou d'utilisation du spectre sur un même système pendant un certain temps pour voir si l'on constate une amélioration dans le domaine particulier étudié.

Il convient également de noter que l'efficacité d'utilisation du spectre est un facteur important car il permet d'obtenir une exploitation maximale du spectre en termes de service, mais ce n'est pas le seul facteur à considérer. Pour le choix d'une technique ou d'un système, il faut aussi tenir compte du coût, de la disponibilité de l'équipement, de la compatibilité avec les équipements ou les techniques actuels, de la fiabilité et des facteurs relatifs à l'exploitation.

ANNEXE 2

Exemples

1. Efficacité d'utilisation du spectre d'un système de radiocommunication picocellulaire interne

Pour un système de radiocommunication picocellulaire interne fonctionnant dans la bande 900 MHz-60 GHz, l'efficacité d'utilisation du spectre peut être calculée à partir de l'équation (2). L'efficacité d'utilisation du spectre d'un système de radiocommunication picocellulaire interne peut donc être définie par l'expression suivante:

$$\text{Erlangs} / (\text{largeur de bande} \times \text{zone couverte}) \quad (5)$$

dans laquelle «erlangs», «largeur de bande» et «zone couverte» désignent respectivement, pour le système picocellulaire, le trafic téléphonique total acheminé, la partie de spectre utilisée et la zone couverte. Comme le système picocellulaire dessert une tour, on utilise pour le calcul de l'efficacité, la surface totale de tous les étages. On peut déduire le nombre de canaux par cellule des Tables d'Erlang B pour un nombre donné d'utilisateurs par étage et un trafic par utilisateur donné.

1.1 Système picocellulaire desservant un immeuble

Pour le calcul de la largeur de bande nécessaire à la desserte de tout un immeuble, il faut connaître la distance de réutilisation exprimée en termes d'étages. Ce paramètre dépend des affaiblissements sur les étages et varie en fonction du type de construction.

Le nombre de canaux en semi-duplex nécessaire pour la desserte de l'immeuble est donné par la formule:

$$2 \times \text{Nbre de canaux par cellule} \times \text{Nbre de cellules par étage} \times \text{Nbre d'étages}$$

Le facteur 2 s'explique par le caractère bidirectionnel des communications.

A partir de l'équation (5), on peut calculer l'efficacité d'utilisation du spectre (SUE) dans l'immeuble, qui est donnée par l'expression:

$$SUE_{\text{immeuble}} = \frac{\text{Trafic total acheminé par tout le système}}{\text{Nbre total de canaux} \times \text{largeur de bande par canal} \times \text{surface totale des étages}} \quad (6)$$

Exemple:

Système fonctionnant à 900 MHz

Largeur de bande d'un canal (semi-duplex):	25 kHz
Nombre de canaux par cellule:	10
Nombre de cellules par étage:	4
Nombre d'étages:	3
Nombre total de canaux nécessaires:	120

Avec une qualité de service de 0,5%, le trafic acheminé T_f dans un étage est de 16 E ou $2 T_f$ si l'on tient compte de la station de base et des stations mobiles. On a donc:

$$SUE_{\text{immeuble}} = \frac{16 \times \text{Nbre d'étages}}{120 \times 0,025 \times \text{surface totale des étages}} \quad (7)$$

Si chaque étage mesure 25 m × 55 m, $SUE_{\text{immeuble}} = 3\,880 \text{ E/MHz/km}^2$.

1.2 *Système picocellulaire desservant le centre d'une agglomération*

De même, il est possible de calculer la largeur de bande nécessaire à la desserte de la totalité du centre d'une agglomération lorsque la distance de réutilisation horizontale est connue. Ce paramètre dépend du type de construction et de l'affaiblissement de propagation du signal lorsqu'il pénètre dans un immeuble ou qu'il en sort. La distance de réutilisation détermine le nombre d'immeubles pouvant être placés dans un groupe (ou groupe de brouillage).

Dans ce cas, le nombre total de canaux semi-duplex nécessaire à la desserte du centre d'une agglomération est donné par:

$$2 \times \text{nbre de canaux par immeuble} \times \text{nbre d'immeubles par groupe}$$

Le facteur 2 s'explique par le caractère bidirectionnel des communications.

A partir de l'équation (5), on peut calculer l'efficacité d'utilisation du spectre SUE_{zone} pour le système couvrant la totalité du centre d'une agglomération:

$$SUE_{\text{zone}} = \frac{\text{Trafic total acheminé dans la zone toute entière}}{\text{Nbre total des canaux} \times \text{largeur de bande par canal} \times \text{superficie totale de la zone de service}} \quad (8)$$

Dans cette formule, la superficie totale de la zone de service est la surface totale de l'ensemble des étages desservis par le système picocellulaire.

Exemple:

Système fonctionnant à 900 MHz

Nombre de canaux par immeuble:	120
Nombre d'immeubles par groupe:	4
Largeur de bande d'un canal (semi-duplex):	25 kHz
Nombre total de canaux nécessaires:	480

$$SUE_{\text{zone}} = \frac{16 \times \text{Nbre d'étages} \times \text{nbre d'immeubles}}{120 \times 4 \times 0,025 \times \text{surface totale des étages}} = 970 \text{ E / MHz / km}^2 \quad (9)$$

Note 1 – On trouvera des informations complémentaires dans les documents suivants:

CHAN, G. et HACHEM, H. [septembre 1991] Spectrum Efficiency of a Pico-Cell System in an Indoor Environment. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec City, Canada.

HATFIELD, D.N. [août 1977] Measures of Spectral Efficiency in Land Mobile Radio. *IEEE Trans. of Electromag. Compt.* Vol. EMC-19, 3, 266-268.

2. **Efficacité d'utilisation du spectre dans un faisceau hertzien de Terre point à point**

2.1 *Introduction*

Pour les faisceaux hertziens qui fonctionnent de façon continue, on peut ne pas tenir compte de la dimension temporelle. En se référant à l'équation (2) l'efficacité d'utilisation du spectre peut donc être exprimée ainsi:

$$SUE = \frac{C}{B \cdot S_{\alpha}} \quad (10)$$

où:

C : mesure de la capacité de transmission (par exemple voies téléphoniques ou bit/s)

S_{α} : mesure géométrique (par exemple, la zone ou l'angle séparant les circuits partant d'un nœud).

2.2 Efficacité de l'emploi du spectre pour une longue artère munie de circuits dérivés aux points nodaux

La capacité de transmission spécifique qui donne la SUE dans un faisceau hertzien de Terre entre points fixes est définie par:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (11)$$

où:

N : nombre maximal admissible de circuits (c'est-à-dire de liaisons radioélectriques bidirectionnelles) dérivés d'une station de répéteurs

A : capacité de transmission (par exemple, nombre de voies téléphoniques) par canal radioélectrique

B_c : largeur de bande de fréquences nécessaire par canal radioélectrique.

Cette formule tient compte de la mesure géométrique N (N dépend de l'angle admissible entre les circuits dérivés).

L'efficacité de l'emploi du spectre dans un faisceau hertzien de Terre entre points fixes a été calculée pour les transmissions téléphoniques en utilisant la formule ci-dessus.

Ce calcul est fondé sur les hypothèses suivantes:

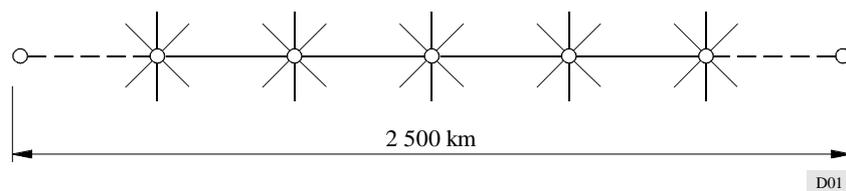
- l'objet de la transmission est un signal téléphonique;
- la probabilité d'évanouissement est la même que celle indiquée dans la Recommandation UIT-R PN.530;
- la liaison considérée, dont la Fig. 1 représente un schéma, a une longueur de 2 500 km;
- le rapport porteuse/bruit, C/N , requis est exprimé par:

$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11,8 \quad \text{dB} \quad (12)$$

où n est le nombre d'états de la modulation d'amplitude en quadrature;

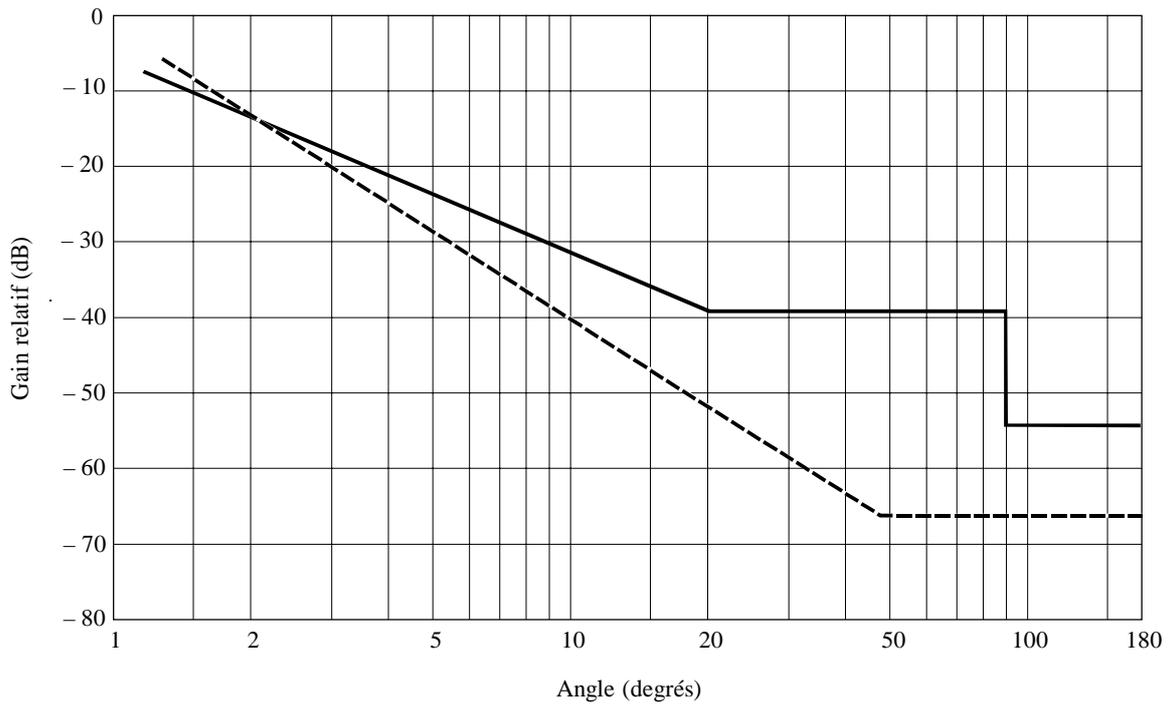
- on alloue un dixième de la puissance globale du bruit du faisceau hertzien (circuit de 2 500 km) au bruit provenant d'autres liaisons;
- le brouillage dû à d'autres liaisons a la même fréquence que le signal utile;
- on a utilisé le diagramme de référence d'une antenne circulaire donné dans la Recommandation UIT-R F.699 et une antenne double à trois réflecteurs décalés du type utilisé au Japon dans les systèmes à hyperfréquences représenté sur la Fig. 2;
- angles aléatoires entre les circuits dérivés.

FIGURE 1
Schéma du faisceau hertzien



Les capacités de communication normalisées pour ces deux types d'antennes ont été calculées et sont représentées sur la Fig. 3. Les performances de l'antenne circulaire données dans la Recommandation UIT-R F.699 sont insuffisantes pour estimer l'efficacité de l'emploi du spectre radioélectrique par les systèmes de modulation à nombre d'états élevé. Comme les résultats dépendent des performances de l'antenne, si l'on peut utiliser une antenne de haute qualité, une modulation à nombre d'états élevé, comme une MAQ à 256 états, est efficace.

FIGURE 2
Diagramme de l'antenne



— Diagramme de référence UIT-R préliminaire
 - - - Diagramme d'antenne à trois réflecteurs décalés

D02

3. Efficacité d'emploi du spectre par des faisceaux hertziens disposés arbitrairement

3.1 Formulation

La Fig. 4 montre un faisceau hertzien X-Y et une station radioélectrique Z fonctionnant sur la même fréquence. La station Z est disposée arbitrairement sur un cercle autour de la station Y.

La station Y reçoit un signal utile émis sur la fréquence f_1 par la station X. La station Z émet un signal sur la même fréquence, f_1 , dans une direction arbitraire.

La capacité de transmission spécifique qui représente l'efficacité d'emploi du spectre, peut s'exprimer par la formule suivante:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p}}{p} \frac{A}{B_c} \quad (13)$$

où:

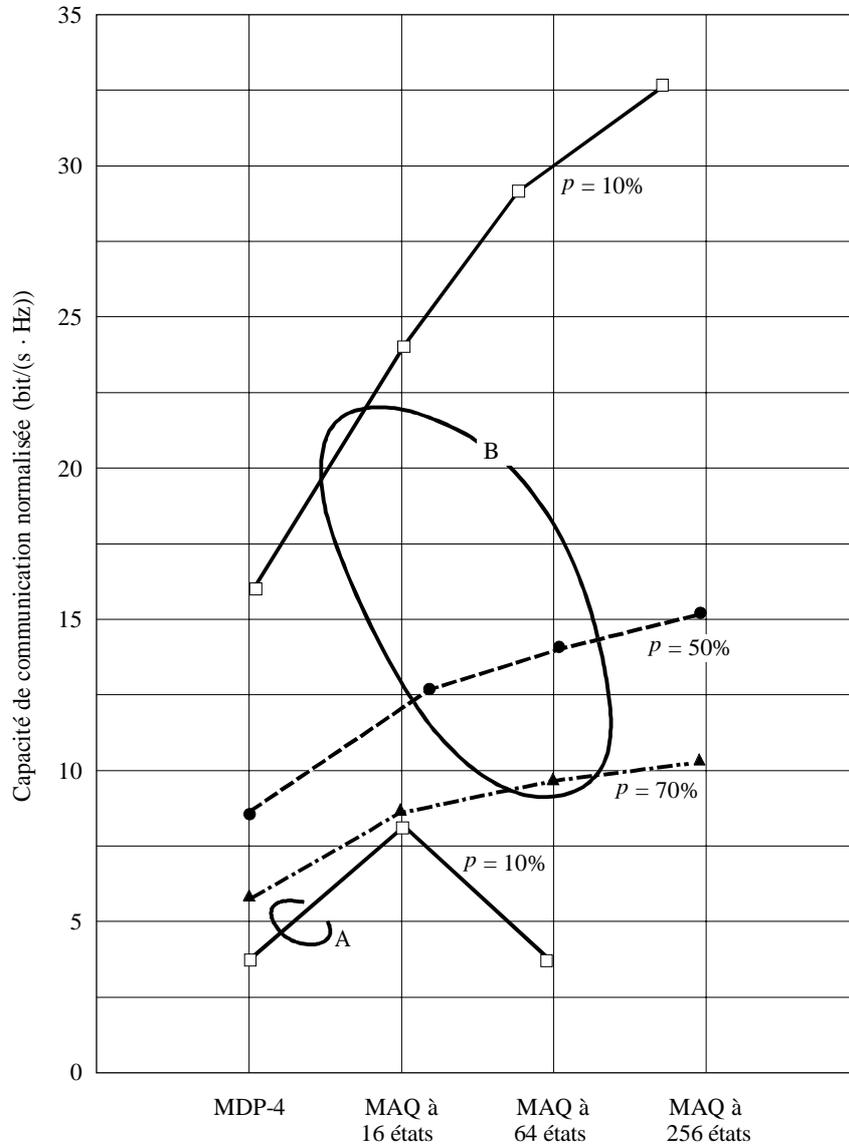
N: nombre possible de liaisons radioélectriques utilisant la même fréquence: $N \approx \bar{p}/p$

A: capacité de transmission par canal radioélectrique.

On calcule la probabilité p que la station Y reçoive un brouillage dépassant la limite admissible en considérant les diagrammes d'antenne combinés des stations Y et Z et \bar{p} est la probabilité admissible maximale de brouillage.

L'accumulation de brouillages causés par deux stations ou plus a été négligée, ce qui fait que pour l'application, il conviendrait de prévoir une certaine marge.

FIGURE 3
Capacité de communication normalisée



Type de modulation

Marge d'évanouissement: 20 dB
 Espacement des répéteurs: 50 km
 Capacité des canaux: 64 kbit/s
 Attribution du bruit de dérivation: 10%

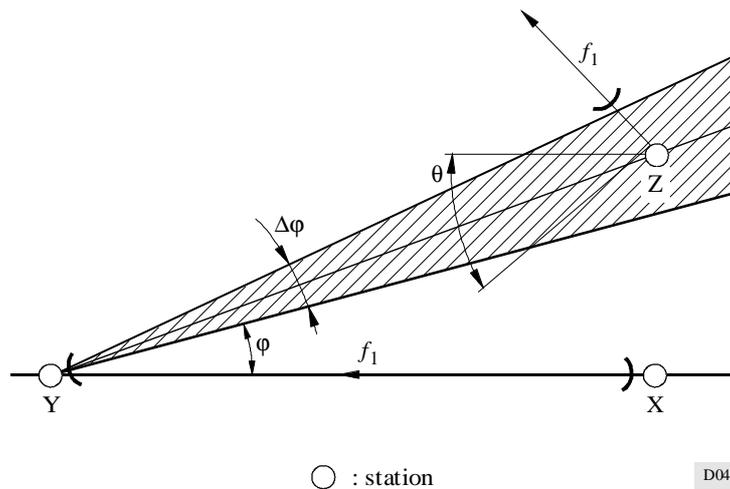
p : probabilité de brouillage

A: diagramme de référence UIT-R préliminaire

B: diagramme d'antenne à trois réflecteurs décalés

D03

FIGURE 4
Disposition arbitraire des stations



3.2 Application: Efficacité d'utilisation du spectre dans le cas d'un système de faisceaux hertziens à 2 GHz

Au moyen de la formule ci-dessus, on a calculé l'efficacité d'utilisation du spectre, pour les transmissions téléphoniques, dans un système de faisceaux hertziens de Terre de faible capacité entre points fixes, exploité dans la bande des 2 GHz.

L'efficacité relative d'utilisation du spectre, pour des antennes de 1,8 m de diamètre, a été calculée compte tenu du rapport de brouillage admissible et de l'efficacité associée à chaque type de modulation indiqué dans le Tableau 1. Les résultats obtenus sont donnés dans la Fig. 5.

Le système numérique est supérieur au système analogique pour des marges inférieures d'évanouissement. Dans la présente étude, l'affaiblissement dû aux évanouissements est égal à la dégradation du rapport signal utile/signal brouilleur sous l'effet du brouillage. Si des techniques de diversité d'espace sont utilisées, la marge à prévoir pour les évanouissements diminue. En règle générale, les systèmes numériques permettent une plus grande efficacité d'utilisation du spectre.

Pour la modulation numérique, le passage d'une modulation numérique à deux états à une modulation à nombre d'états plus élevé nécessite une largeur de bande moins importante mais il se peut que l'efficacité d'utilisation du spectre soit moins bonne lorsque le brouillage est élevé. La valeur de la méthode dépend des caractéristiques de l'antenne et d'autres éléments, mais il se peut que le système MDP-4 soit un système optimal au point de vue macroscopique lorsque des liaisons radioélectriques fonctionnant à proximité d'une station de répéteurs sont réparties au hasard dans cette zone.

3.3 Efficacité d'utilisation du spectre dans un réseau maillé aléatoire

Pour comparer équitablement les méthodes de modulation, on peut supposer un plan de fréquences entrelacées avec un espacement correspondant à un degré donné de dégradation de la qualité causée par du brouillage provenant de canaux adjacents. Le Tableau 2 indique les valeurs provisoires de l'espacement normalisé des canaux, X défini dans le Rapport 608 de l'ex-CCIR, (Kyoto, 1978) et le rendement correspondant du spectre, en bit/(s · Hz). Même si l'on pouvait obtenir des résultats différents, sur la base d'autres hypothèses, on pourrait noter que les résultats de calculs figurant dans le Tableau 2 sont très proches des valeurs qui pourraient être calculées à partir des dispositions spécifiques de canaux, telles qu'elles sont suggérées par les Recommandations UIT-R (par exemple, 140 Mbit/s, avec modulation MAQ-16 et 40 MHz d'espacement entre canaux contrapolaires). Il se pourrait que les valeurs mesurées diffèrent des valeurs calculées.

TABLEAU 1

Paramètres de divers types de modulation dans la bande des 2 GHz

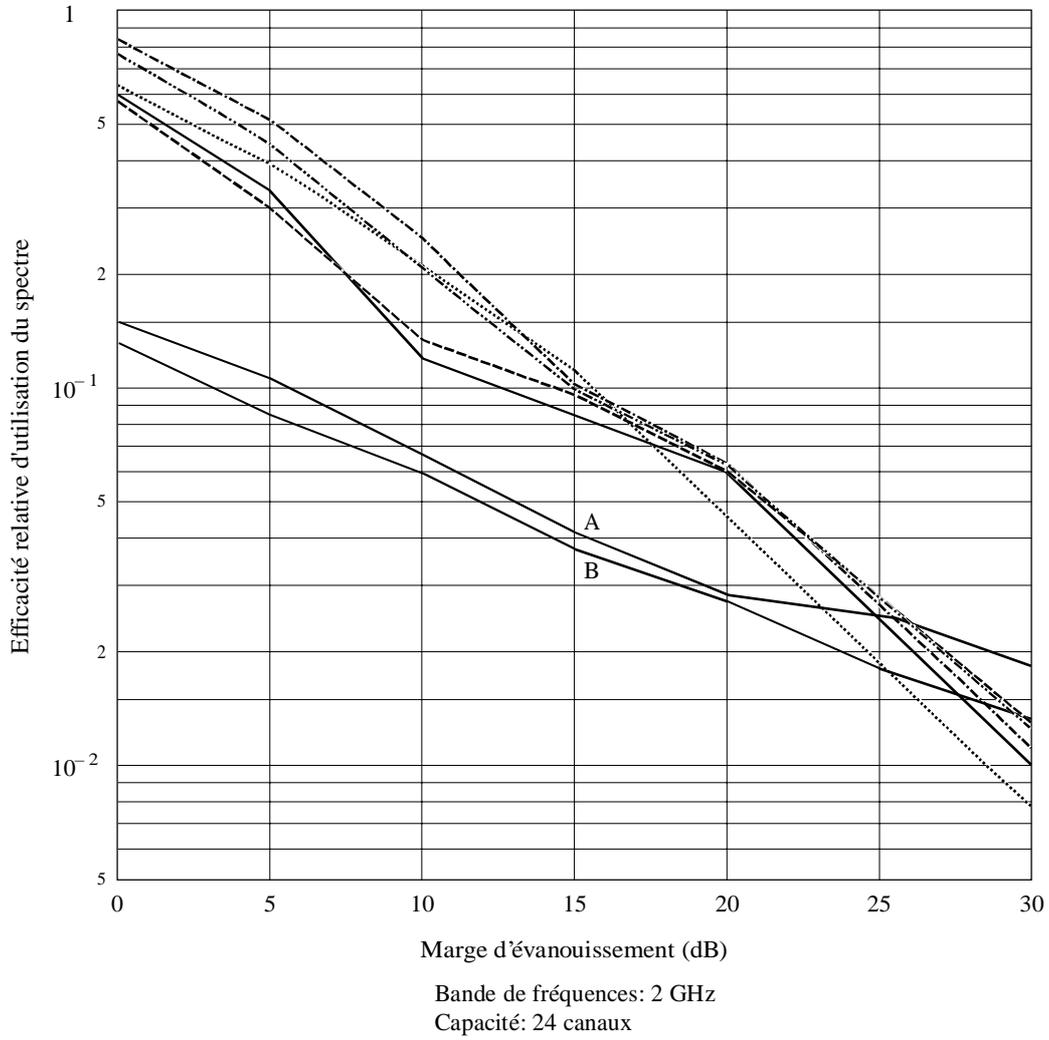
Type de modulation		Rapport S/N ou taux d'erreur admissible	Facteur de réduction du brouillage		Rapport admissible signal utile/ signal brouilleur	Paramètres relatifs à B		Espacement des canaux adjacents B	Nombre de canaux A	$A/B^{(1)}$ (Canaux/kHz)
Transmission analogique	MF	58 dB	20 dB		38 dB	Déviation de fréquence pour signal d'essai: 100 kHz eff.		520 kHz	24	0,046
	BLU	58 dB	9,5 dB		48,5 dB	Fréquence supérieure de la bande de base: 108 kHz Coefficient du filtre: $\times 2$ Tolérance de fréquence: 20 kHz		236 kHz	24	0,1
Transmission numérique	MDP-2	10^{-6}	(C/N)	(Dégradation)	16,2 dB	Fréquence d'horloge	Coefficient du filtre	2 MHz	24	0,012
			10,7 dB	5,5 dB		1 544 kHz	$\times 1,3$			
	MDP-4	10^{-6}	13,7 dB	5,5 dB	19,2 dB	772 kHz	$\times 1,4$	1,1 MHz	24	0,022
	MDP-8	10^{-6}	19,1 dB	5,5 dB	24,6 dB	515 kHz	$\times 1,5$	0,77 MHz	24	0,031
	MQRP	10^{-6}	16,8 dB	5,5 dB	22,3 dB	722 kHz	$\times 1,1$	0,85 MHz	24	0,028
MAQ-16	10^{-6}	21,4 dB	5,5 dB	26,9 dB	386 kHz	$\times 1,6$	0,62 MHz	24	0,039	

(1) Efficacité propre à chaque type de modulation.

Les hypothèses sont les suivantes:

- Pour chaque type de modulation, le brouillage admissible et l'efficacité d'utilisation du spectre sont ceux qui sont indiqués dans le Tableau 1; 80% du bruit total du circuit sont attribués au brouillage.
- Les distances entre la station brouillée (station Y) et les stations brouilleuses sont les mêmes; cette dernière hypothèse ne donne lieu qu'à de faibles erreurs dans le calcul de l'efficacité, étant donné que, entre les deux liaisons, la différence d'affaiblissement en espace libre n'est que de 6 dB, même si la longueur des liaisons varie du simple au double.
- On suppose qu'il n'existe aucune corrélation entre les évanouissements du signal utile et du signal brouilleur.
- Le diagramme de rayonnement de l'antenne est le diagramme de référence de la Recommandation UIT-R F.699.
- Toutes les stations ont la même puissance de sortie à l'émission.
- La limite relative à la probabilité de brouillage est $\bar{p} = 0,1$.

FIGURE 5
Efficacité d'utilisation du spectre pour une disposition aléatoire des stations



- MDP-4 (modulation par quadrature de phase)
- .-.-.-.- MDP-8
- MDP-2
- MQRP (modulation en quadrature avec réponse partielle)
- MAQ-16 (modulation d'amplitude en quadrature à 16 états)
- Courbes A: BLU (modulation d'amplitude)
- B: MF (modulation de fréquence)

TABLEAU 2

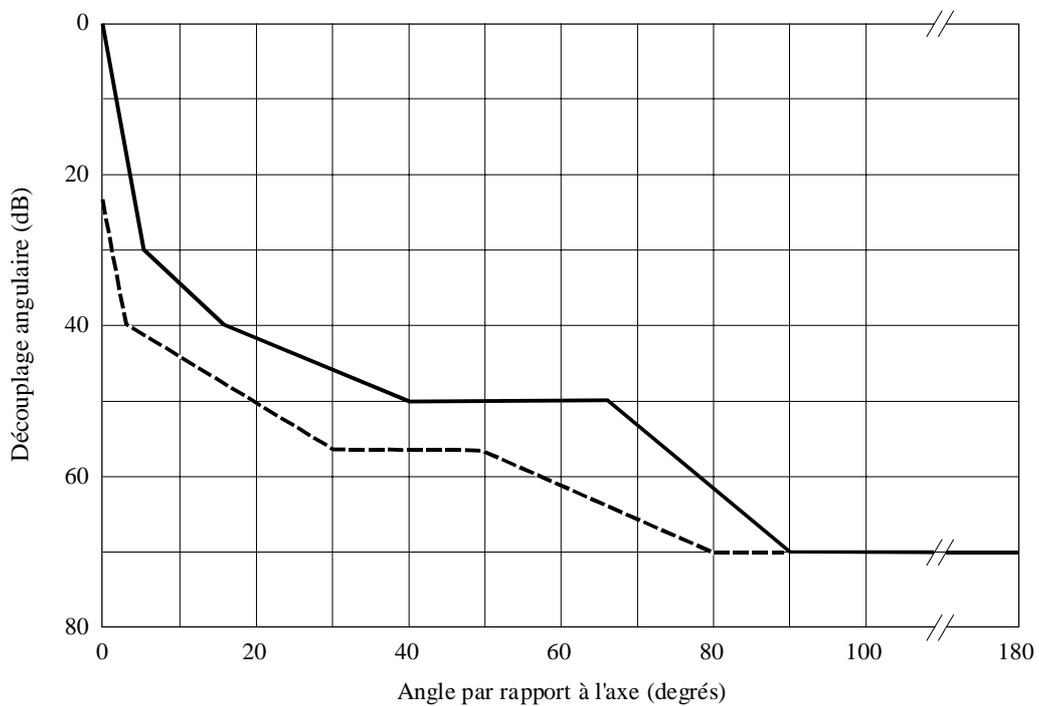
Modulation	Espacement normalisé entre canaux X	Rendement du spectre (bit/(s · Hz))
MDP-4	1,88	2,13
MDP-8	2,16	2,77
MAQ-16	2,23	3,59

Note 1 – Dégradation causée par du brouillage provenant d'un canal adjacent: 0,5 dB.

- Filtres de canal: à coupure progressive (0,5) en cosinus carré surélevé.
- Découplage entre canaux contrapolaires (XPD résiduelle): 12 dB.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne utilisé dans l'analyse est présenté dans la Fig. 6; il s'agit d'une antenne parabolique type. On a supposé que la dégradation de la qualité (pour un taux d'erreur binaire de 1×10^{-3}) causée par un brouillage dans le même canal dû à d'autres liaisons, n'est pas supérieure à 1 dB. On suppose que la liaison brouillée reçoit à la valeur de seuil, avec une marge contre les évanouissements de 40 dB tandis que la liaison brouilleuse reçoit à la valeur nominale.

FIGURE 6
Gabarits de rayonnement des antennes



Réflecteur parabolique $D/\lambda = 75$

———— Copolarisation

----- Polarisation orthogonale

On a défini une densité de réseau normalisée γ :

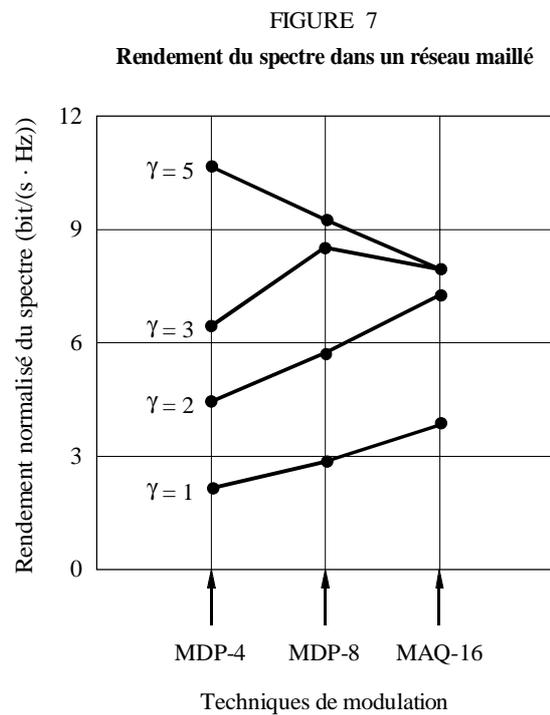
$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{ensemble de la zone desservie par le réseau}} \quad (14)$$

où:

N : nombre de points nodaux radioélectriques dans le réseau

ρ : longueur quadratique moyenne des bonds.

Les résultats représentés dans la Fig. 7 montrent que, dans les réseaux très denses, le meilleur rendement est obtenu avec la modulation MDP-4, alors que, lorsque la densité est moindre, la modulation MDP-8, voire même MAQ-16, donne de meilleurs résultats. On constate ainsi que l'efficacité d'emploi du spectre résultant des méthodes de modulation dépend du contexte dans lequel se produit le brouillage.



Gabarit de rayonnement d'antenne de la Fig. 6.
Dégradation de la qualité de fonctionnement due à la réutilisation de la fréquence: 1 dB

D07

Note 1 – On trouvera des informations complémentaires dans les documents suivants:

DODO, J., KUREMATSU, H. et NAKAZAWA, I. [8-12 juin 1980] Spectrum use efficiency and small capacity digital radio-relay system in the 2 GHz band. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, WA, Etats-Unis d'Amérique.

TILLOTSON, L.C. et autres [1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. *Proc. IEEE*, 61, 4.