

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SM.1046-2
(05/2006)

**Définitions du facteur d'utilisation du
spectre et de l'efficacité d'utilisation du
spectre d'un système radioélectrique**

Série SM
Gestion du spectre



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

| Séries | Titre |
|------------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| SNG | Reportage d'actualités par satellite |
| TF | Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| V | Vocabulaire et sujets associés |

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2011

© UIT 2011

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R SM.1046-2*

Définitions du facteur d'utilisation du spectre et de l'efficacité d'utilisation du spectre d'un système radioélectrique

(1994-1997-2006)

Domaine de compétence

La version révisée de la Recommandation contient une autre méthode permettant de déterminer l'efficacité d'utilisation du spectre (SUE, *spectrum utilization efficiency*) pour différents systèmes de radiocommunication (mobile, point à point, etc.).

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 (SUE, *spectrum utilization efficiency*) 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 SUE 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 SUE 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 calculer l'efficacité d'utilisation du spectre (SUE, *spectrum utilization efficiency*), ou l'efficacité du spectre en déterminant l'effet utile obtenu avec les systèmes de radiocommunication grâce à l'utilisation du spectre, d'une part, et le facteur d'utilisation du spectre, d'autre part (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 (RSE, *relative spectrum efficiency*) exposé dans l'Annexe 1, pour les comparaisons d'efficacité SUE entre systèmes radioélectriques;

* La Commission d'études 1 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2011, conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1-5.

- 4 de comparer les efficacités SUE entre systèmes radioélectriques analogues assurant les mêmes services de radiocommunication comme indiqué au § 4 de l'Annexe 1;
- 5 de tenir compte, pour l'évaluation de l'efficacité SUE, 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 SUE 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 8 du Manuel sur la gestion nationale du spectre (Genève, 2005) des précisions concernant le calcul du facteur d'utilisation du spectre.

2 Efficacité d'utilisation du spectre (SUE)

D'après sa définition, l'efficacité SUE (expression abrégée: efficacité du spectre) d'un système de radiocommunication peut s'exprimer par l'expression complexe suivante:

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

où:

M: effet utile obtenu avec le système de communication considéré

U: facteur d'utilisation du spectre pour ce système.

Si nécessaire, l'indicateur complexe de l'efficacité du spectre peut être réduit à un indicateur simple qui est le rapport entre l'effet utile et le facteur d'utilisation du spectre exprimé comme suit:

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

3 Efficacité relative d'utilisation du spectre (RSE)

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

L'efficacité relative RSE 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 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 relative 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 $C_p = F_m \ln(1 + \rho_s(1 + \rho_s))$. 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 dans l'Annexe 2 et au Chapitre 8 du Manuel sur la gestion nationale du spectre (Genève, 2005) des exemples de calcul d'efficacités relatives RSE.

4 Comparaison des efficacités d'utilisation du spectre

Comme indiqué plus haut, les valeurs de l'efficacité 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 SUE 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 SUE 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 Utilisation du spectre par des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres

1.1 Efficacité SUE d'un système de radiocommunication picocellulaire fonctionnant à l'intérieur d'un bâtiment

Pour un système de radiocommunication picocellulaire fonctionnant à l'intérieur d'un bâtiment dans la bande 900 MHz-60 GHz, l'efficacité SUE peut être calculée à partir de l'équation (2). L'efficacité SUE d'un tel système 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.

1.1.1 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 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:

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

Si chaque étage mesure $25 \text{ m} \times 55 \text{ m}$, $SUE_{immeuble} = 3880 \text{ E/MHz/km}^2$.

1.1.2 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:

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

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 |

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

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.

1.2 Efficacité relative RSE des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres

Les valeurs d'efficacité relative RSE obtenues avec des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres utilisant différents types de modulation ont été comparées avec celles obtenues avec le système en théorie le plus efficace (voir le § 3 et l'équation (4) de l'Annexe 1).

Dans un souci de simplicité et pour obtenir des expressions analytiques finies, les calculs ont été faits pour les modèles simples d'un réseau (réseau maillé idéal) et dans des conditions de propagation propres à la bande des ondes décimétriques, mais les mêmes lois s'appliqueront pour des modèles de réseaux réels plus complexes et des modèles de propagation plus sophistiqués.

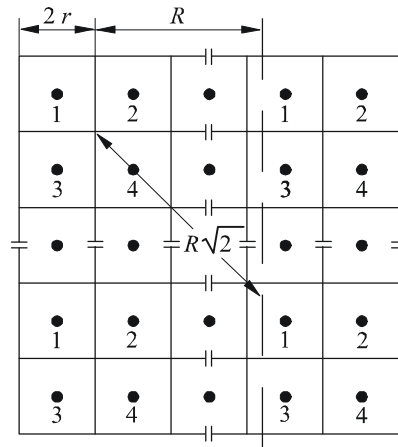
Le réseau pris pour modèle se compose de carrés d'égales dimensions, la station centrale (de base) étant située au centre du carré (voir la Fig. 1). On considère que le rayon, r , de la zone de service est donné. Dans les carrés portant le même numéro, (voir la Fig. 1) on peut utiliser le même ensemble de canaux de fréquences si la distance de séparation, R , entre ces carrés assure un affaiblissement suffisant des brouillages. Les antennes des stations de base ne sont pas directives, dans le plan horizontal et n'utilisent qu'un type de polarisation.

Dans le modèle considéré, tous les émetteurs des stations de base ont la même puissance et une fréquence porteuse stable; ils ne produisent pas de rayonnements hors bande ou non essentiels; les récepteurs des stations de base ont des caractéristiques de sélectivité idéales.

Les résultats des calculs de la RSE pour plusieurs types particuliers de modulation et différents rapports signal/bruit au niveau du récepteur (ρ_0) sont présentés à la Fig. 2. Les types de modulation considérés sont les suivants:

- modulation d'amplitude, bande latérale unique (MA-BLU);
- modulation de fréquence (FM);
- modulation par déplacement de phase à 4 ou 8 états (MDP-4 (8));
- modulation d'amplitude en quadrature à 16 états (MAQ-16).

FIGURE 1
Modèle de réseau



1046-01

La Fig. 2 fait apparaître que ce sont les systèmes mobiles terrestres en MF qui présentent la valeur la plus faible de l'efficacité relative RSE: en effet, lorsqu'on utilise ce type de modulation, la largeur de bande requise pour la mise en œuvre d'un réseau est d'environ 5 fois plus importante que dans le cas d'un système théoriquement le plus efficace (MTES – most theoretically efficient system). Par ailleurs, le type de modulation le plus proche de celui d'un système MTES, pour toutes les valeurs du rapport de protection contre le bruit, est la modulation MAQ-16. La mise en œuvre d'un réseau nécessite une largeur de bande seulement 1,5 fois plus importante que celle utilisée dans un système MTES. Si les exigences de qualité à la réception ne sont pas très élevées, le type de modulation le plus proche de celui d'un système MTES est la modulation MA-BLU. Toutefois, l'efficacité relative RSE d'un système MA-BLU baisse sensiblement si les exigences de qualité à la réception augmentent, en particulier si l'on tient compte de l'impact de l'instabilité de fréquence des émetteurs réels.

NOTE 1 – On trouvera un complément d'information dans l'Annexe IV du Rapport 662-3 (Düsseldorf, 1990).

1.3 Efficacité SUE des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres

Pour des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres à couverture générale, on peut déterminer l'efficacité SUE à l'aide de l'équation (2) comme suit:

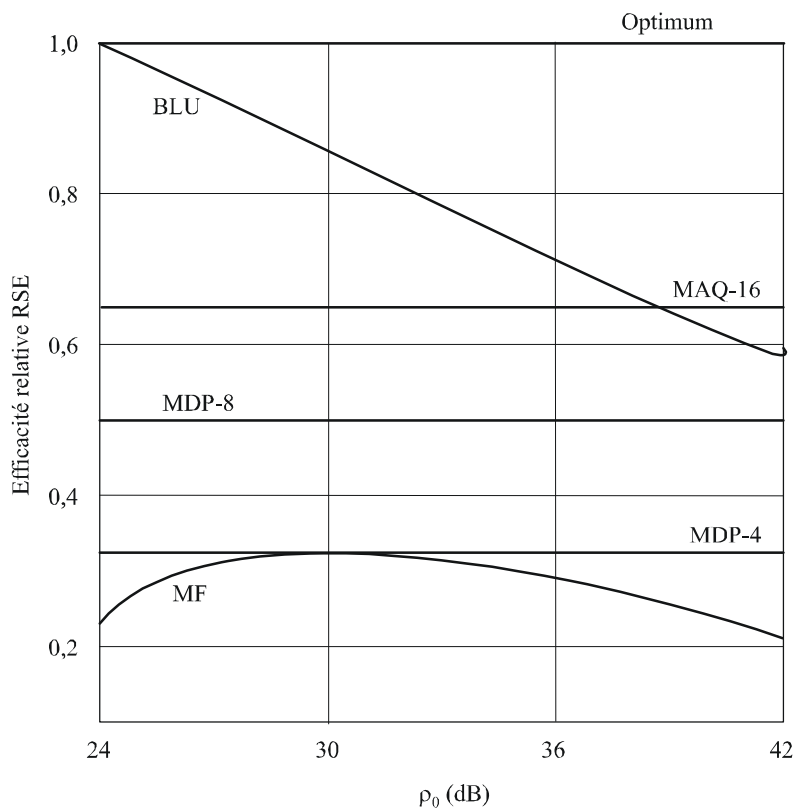
$$SUE = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (10)$$

où:

- B : quantité totale de spectre considérée dans les bandes de fréquences attribuées aux systèmes de radiocommunication mobiles terrestres;
- S : zone considérée;
- Occ : occupation totale de la zone
= occupation par communication \times Nbre de communications dans la zone = M/T .

Il s'agit donc avant tout de calculer l'occupation totale de la zone considérée. La méthode adoptée consiste à subdiviser la zone considérée en un certain nombre de cellules dans lesquelles sont situées les stations de base. Selon la puissance de l'émetteur et les caractéristiques de propagation, le signal émis couvrira une certaine zone, en l'occurrence un certain nombre de cellules. On peut donc calculer l'occupation due à cette communication en ajoutant les cellules couvertes par ce signal. Toutefois, si un certain nombre de stations utilisent en partage la même fréquence, l'occupation sera divisée par le nombre de stations partageant la même bande de fréquences. Toutes les stations seront prises en compte dans le nombre total de communications.

FIGURE 2
Valeurs d'efficacité relative RSE dans un réseau utilisant différents types de modulation



1046-02

Dans l'exemple considéré, la zone géographique de 76 km sur 76 km est représentée informatiquement comme une matrice de valeurs de cellule, chaque cellule correspondant à une zone de 2 km sur 2 km. La cellule est considérée comme occupée si le cercle de couverture défini par d (précisé dans le prochain paragraphe) occupe plus de 10% de la surface de la cellule. L'occupation totale d'une cellule est calculée à partir du nombre de licences d'exploitation ou de stations exploitées dans la bande de fréquences considérée.

Si F_n est l'occupation de la cellule par l'ensemble des n stations dans la zone, l'occupation totale de la zone, Occ , est:

$$Occ = \sum_0^m F_n \quad (11)$$

où m est la dimension de la matrice.

L'indice par cellule d'efficacité SUE est défini comme étant l'occupation totale de la cellule par l'ensemble des n stations de la zone géographique considérée divisée par la quantité totale de spectre considérée, B , et la surface de la cellule, a . L'indice moyen d'efficacité SUE d'une zone géographique peut donc être obtenu à partir de l'occupation totale dans la ville considérée divisée par la quantité totale de spectre considérée et la surface totale, S .

$$\text{Indice par cellule} = \frac{F_n}{B \cdot a} \quad (12)$$

$$\text{Indice moyen} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (13)$$

1.3.1 Calcul de l'indice de spectre occupé et de l'indice de spectre refusé

Dans cette analyse, on calcule l'indice de spectre occupé et l'indice composite spectre occupé/spectre refusé. Le premier indice indique la proportion dans laquelle une bande donnée de spectre est utilisée et le second la proportion de spectre utilisée et celle refusée à d'autres utilisateurs.

Comme cela a été dit au paragraphe précédent, pour calculer l'indice, il faut tout d'abord estimer la valeur de la distance de couverture, d , basée sur la Recommandation UIT-R P.529:

$$d = \text{antilog} \left[\frac{(P_t + G_r - P_{ibm} - OCR(\Delta f) - 26,16 \log f + 13,82 \log h_t + 1,1 \log f - 0,7)h_r - (1,56 \log f - 0,8)}{44,9 - 6,55 \log h_t} \right] \quad (14)$$

où:

- P_t : p.i.r.e. (dBW)
- G_r : gain de l'antenne de réception (dB)
- P_{ibm} : puissance reçue moyenne au niveau du mobile (dBW)
- OCR : facteur de réjection hors canal
- f : fréquence d'émission (MHz)
- h_t : hauteur de l'antenne de la station de base (m)
- h_r : hauteur de l'antenne mobile (m)

On suppose que l'antenne de la station de base est équidirective. Les coordonnées de cette station, qui déterminent l'emplacement du centre du cercle de couverture dans la matrice de cellule, sont elles aussi utilisées.

Pour obtenir un indice du spectre occupé, P_{ibm} est égale à -128 dBW et $OCR(\Delta f)$ est égal à 0.

Pour les systèmes de radiocommunication mobiles terrestres, nous nous intéressons non seulement à l'indice de spectre occupé mais aussi à l'indice de spectre refusé. Le refus d'accès au spectre résulte du fait que pour pouvoir utiliser les canaux adjacents des fréquences assignées il faut prévoir une certaine distance de séparation par rapport à la station de base considérée, en raison des brouillages. Cette distance dépend notamment de l'espacement en fréquence. Pour calculer cette distance pour divers espacements en fréquence, on suppose que P_{ibm} est égale à -145 dBW et il faut utiliser diverses valeurs de $OCR(\Delta f)$.

Sur la base du gabarit des émissions hors bande, les valeurs utilisées pour le facteur OCR (dB) pour un décalage de Δf (kHz) par rapport au canal sont les suivantes:

| | | | | | |
|------------|---|----------|----------|----------|-----------|
| Δf | 0 | ± 25 | ± 50 | ± 75 | ± 100 |
| OCR | 0 | 57,1 | 58,6 | 58,6 | 58,6 |

Avec ces valeurs, il est possible d'obtenir des distances comparables à celles observées dans des conditions de propagation réelles. A partir d'un ensemble de données échantillons, et en appliquant la méthode de calcul des distances de couverture, on obtient une distance associée au spectre occupé de 21,9 km. Les distances associées au spectre refusé correspondantes pour $\Delta f = 0, \pm 25$ kHz, ± 50 kHz et au-delà sont respectivement de 69,2 km, 1,5 km et 1,3 km.

1.3.2 Résultats

Pour illustrer cette méthode de calcul de l'efficacité SUE, on donne les résultats obtenus pour une zone de 5 776 km² autour du centre de 10 grandes villes canadiennes dans la bande 138-174 MHz. Le Tableau 1 indique l'indice de spectre occupé et l'indice spectre occupé/refusé.

Les données utilisées pour déterminer l'occupation totale proviennent de la base de données canadienne sur les assignations et les systèmes de licence.

Les bandes attribuées aux systèmes mobiles terrestres prises en considération dans cet exemple comprennent à la fois la bande 138-174 MHz (ondes métriques) et les bandes 406-430 MHz et 450-470 MHz (ondes décimétriques). L'espacement des canaux est de 30 kHz pour les bandes d'ondes métriques et de 25 kHz pour les bandes d'ondes décimétriques.

TABLEAU 1

Indice de spectre occupé et indice de spectre refusé (138-174 MHz)

| E/kHz/km ² × 10 ⁻³ | Indice de spectre occupé/ spectre refusé | Indice de spectre occupé |
|--|---|-----------------------------|
| Toronto | 4,19 | 1,33 |
| Ottawa | 4,54 | 1,30 |
| Windsor | 3,68 | 0,87 |
| Montréal | 3,56 | 0,88 |
| Saint John | 3,24 | 0,65 |
| Halifax | 3,32 | 0,68 |
| Vancouver | 3,20 | 0,62 |
| Winnipeg | 3,31 | 0,74 |
| Calgary | 3,05 | 0,73 |
| Edmonton | 2,99 | 0,60 |

Les résultats graphiques pour la ville de Vancouver, là aussi dans la bande 138-174 MHz, sont eux aussi présentés. La Fig. 3 donne une visualisation tridimensionnelle d'une matrice de valeurs (dans l'exemple qui nous intéresse valeur du spectre refusé et valeur du spectre occupé). Sur cette matrice est superposée une carte de la ville afin de présenter les données relatives à l'utilisation du spectre au niveau cartographique, présentation qui facilite beaucoup leur interprétation. Comme indiqué dans la Fig. 4, la valeur maximale d'une cellule du spectre occupé au centre de la ville est de $1,7 \times 10^{-3}$ E/kHz/km². La valeur maximale du spectre refusé et du spectre occupé rapportée à une cellule située juste au nord et à l'ouest du centroïde (voir la Fig. 5) est, pour cette bande, de $4,9 \times 10^{-3}$ E/kHz/km². La zone considérée est le centre commercial de la ville de Vancouver.

FIGURE 3

Représentation en 3 dimensions des indices de spectre occupé et de spectre refusé (Vancouver)

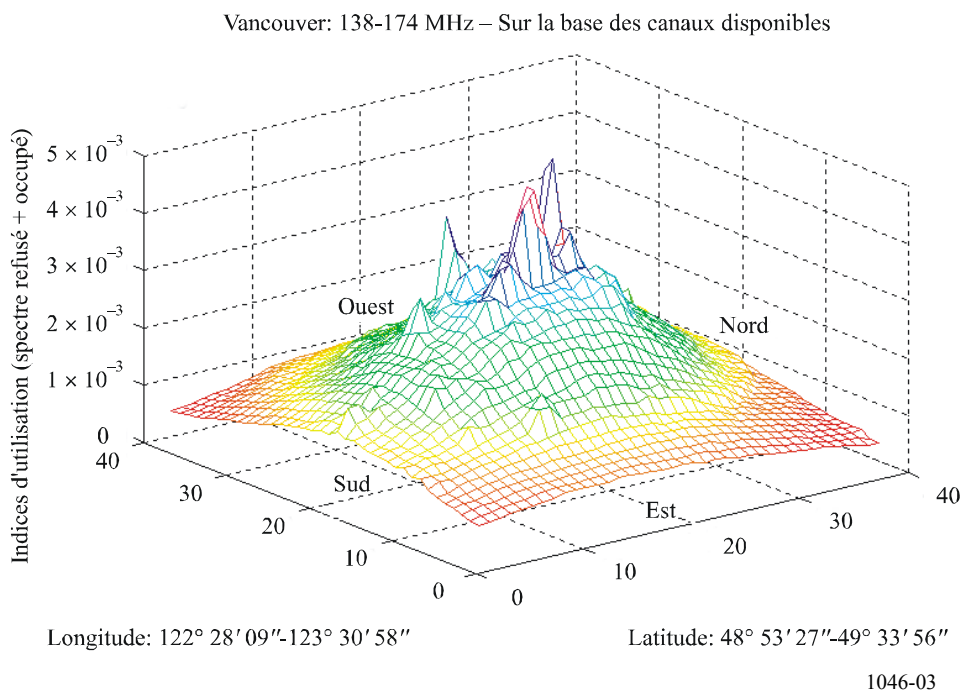
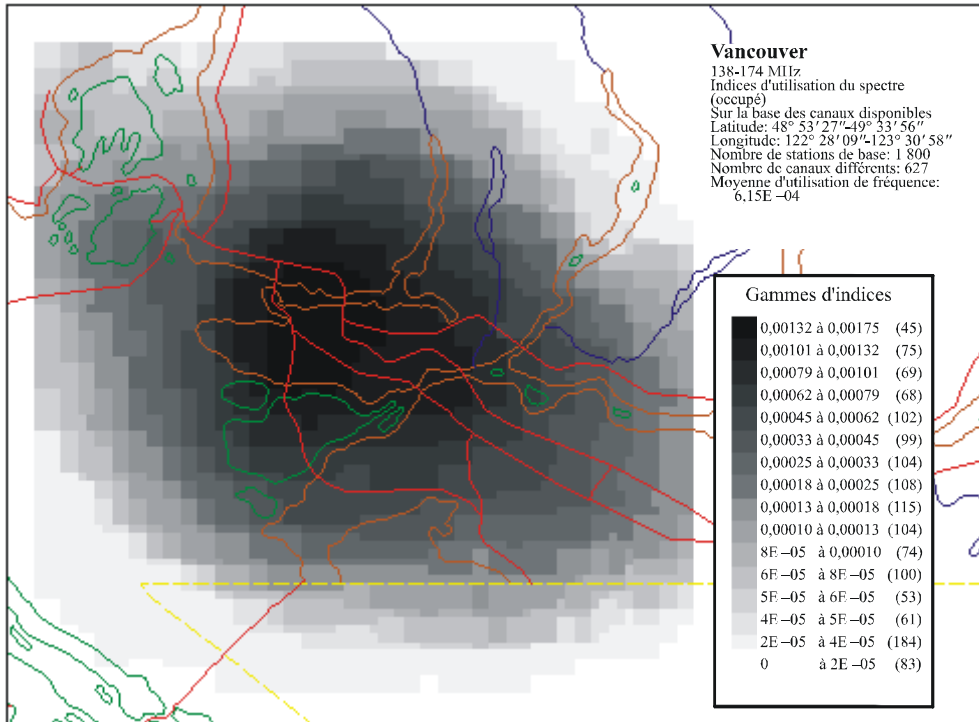
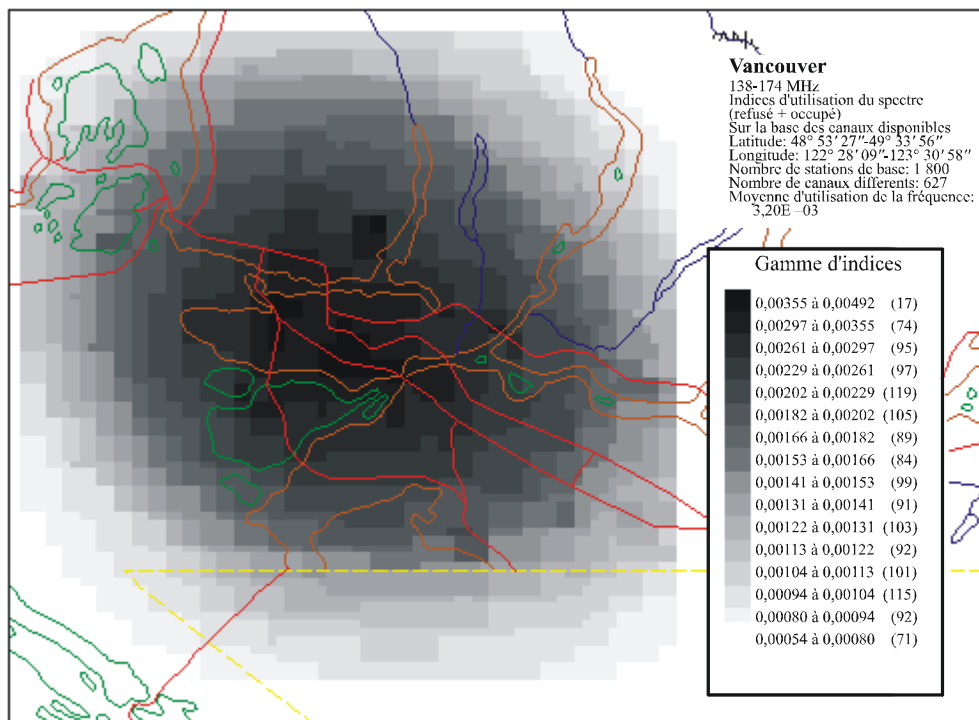


FIGURE 4
Représentation en 2 dimensions de l'indice de spectre occupé (Vancouver)



1046-04

FIGURE 5
Représentation en 2 dimensions de l'indice de spectre occupé et de spectre refusé (Vancouver)



1046-05

1.4 Efficacité SUE des systèmes radioélectriques mobiles terrestres (autre méthode)

1.4.1 Introduction

Considérons le cas d'un système de radiocommunication mobile normalisé précis déployé dans une zone géographique donnée, avec un nombre J de stations de base fonctionnant dans des fréquences du service fixe. Dans le cas général, l'efficacité d'utilisation du spectre est donnée par l'expression complexe suivante:

$$SUE = \{M, U\} \quad (15)$$

où:

M : effet utile obtenu avec le système de communication considéré

U : facteur d'utilisation du spectre pour ce système.

1.4.2 Définition de l'effet utile

L'utilité d'un système de communication mobile est déterminée par la capacité d'un usager à envoyer et recevoir des informations situé en un point choisi au hasard à l'intérieur de la zone géographique. L'effet utile augmente avec la quantité d'informations qui peut être transférée en un temps donné (ou avec le volume de trafic à l'intérieur de la zone de service) et avec l'étendue de cette zone qui est effectivement accessible. L'effet utile est défini au mieux avec deux quantités: le trafic total généré à l'intérieur des limites de la zone de service E et la taille relative de la zone de service donnée par le rapport $S_r = S_s/S$, où S_s et S sont respectivement la zone de service du système en question et la surface totale de la zone géographique considérée. L'effet utile peut être calculé avec l'équation suivante:

$$M = E \cdot S_r \quad (16)$$

A l'évidence, lorsque la valeur de S_s est largement inférieure à S ($S_r \approx 0$), l'utilité du système (mobile) considéré est très faible. Il n'y aura pas de différence sensible entre les services fournis avec un tel système et ceux fournis avec un système de communication fixe.

Il est possible de mesurer le trafic total généré à l'intérieur des limites de la zone de service E grâce aux sous-systèmes gérant la facturation du système de communication mobile, dont la base de données contient un enregistrement durable de l'heure de début et de fin des communications. Il est possible de calculer la zone de service totale en regroupant les zones de service des stations de base du système de communication mobiles: $S_s = \cup S_j$, où S_j est la zone de service de la j ème station de base.

Dans certains cas, lorsque l'on ne dispose pas des données nécessaires pour calculer le volume de trafic généré à l'intérieur de la zone de service, ou si l'on souhaite étudier les possibilités offertes par un système de communication mobile, on peut mesurer l'effet utile en prenant l'équation (16) et en remplaçant la variable E , correspondant au trafic total par le nombre relatif d'abonnés du système mobile, $N_r = N_a/N$, où N_a et N sont, respectivement, le nombre d'abonnés et la population totale de la zone géographique considérée. L'équation permettant d'établir l'effet utile s'écrit alors:

$$M = N_r \cdot S_r \quad (17)$$

L'interprétation concrète de cet indicateur est intuitive. Dans certaines conditions, il correspond à la probabilité qu'un habitant de la zone géographique considérée, situé en un point quelconque de cette zone, puisse utiliser les services assurés par le système de communication mobile. Il indique également à quel point la mise en place du système de communication mobile a été accomplie: la valeur de l'indicateur est égale à 1 lorsque tous les habitants de la zone ($N_a = N$) ont accès au service dans l'ensemble de la zone ($S_s = S$). L'effet utile atteint sa valeur maximum de un ($M = 1$).

1.4.3 Définition du facteur d'utilisation du spectre

On détermine ce facteur en étudiant les restrictions imposées par les stations radioélectriques existantes pour ce qui est de l'utilisation du spectre par de nouvelles stations. Dans le cas d'une station de base située en un point géographique i de la zone, ces restrictions peuvent être le nombre total K_i de bandes de fréquences refusées pour non-respect de la compatibilité électromagnétique (EMC); elles peuvent également correspondre au rapport, $U_i = \frac{K_i}{K}$, où K est le nombre total de

bandes de fréquences que les systèmes de communication mobile du type considéré sont autorisés à utiliser. On estime que les conditions de EMC ne sont pas respectées à une fréquence donnée si l'émetteur d'une ou de plusieurs stations de base (sur un total de J stations de base) cause des brouillages inacceptables au récepteur d'une station mobile en communication avec la nouvelle station de base, ou si un émetteur de la nouvelle station de base cause des brouillages inacceptables à un récepteur en communication avec l'une des stations de base existantes.

Les conditions permettant d'établir si un intervalle de fréquences est refusé dans le sens station mobile – station de base sont les mêmes. Etant donné que les restrictions dépendent de la position théorique de la nouvelle station de base, on obtient plusieurs résultats, qu'il est possible de simplifier en prenant les restrictions obtenues pour différentes parties du territoire considéré et en effectuant un calcul adapté. La meilleure solution consiste à calculer la moyenne pondérée, avec pour facteur de pondération la proportion de la population vivant dans chaque partie de la zone. Ainsi, la valeur plus élevée d'utilisation du spectre dans les zones densément peuplées est prise en compte. Le facteur d'utilisation du spectre peut donc être calculé avec l'équation suivante:

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i \quad (18)$$

où:

- I : nombre d'éléments de zone de la zone géographique
- $\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: proportion de la population totale vivant dans le i ème élément de zone
- n_i : nombre d'habitants vivant dans le i ème élément de zone; et
- U_i : proportion de bandes de fréquences qui seraient refusées à une station de base située au centre du i ème élément de zone pour non-respect de la EMC.

1.4.4 Calcul de l'efficacité d'utilisation du spectre

Pour évaluer l'efficacité d'utilisation du spectre par des systèmes de communication mobile avec espacement de fréquences, il est recommandé de procéder comme suit:

- Diviser la zone géographique en éléments de 1 à 4 km de côté.
- Calculer les rayons R_j des zones de service pour les stations de base du système de communication mobile existantes.

- Calculer la distance R_{ij} séparant le centre de chaque élément de zone i et les emplacements des stations de base existantes.
- Pour chaque élément de zone, déterminer si celui-ci appartient à la zone de service d'une ou de plusieurs stations de base, en comparant R_j et R_{ij} .
- Calculer les dimensions de la zone de service pour le système de communication mobile considéré en regroupant tous les éléments de zone appartenant à la zone de service d'une ou de plusieurs stations de base.
- Calculer l'indicateur d'effet utile avec l'équation (16) ou (17).
- Calculer α_i , qui est la proportion de la population totale vivant à l'intérieur du i ème élément de zone.
- Calculer le rayon de la zone de service d'une nouvelle station de base située au centre de chaque i ème élément de zone.
- Calculer le rapport signal/bruit à l'entrée du récepteur des stations mobiles en communication avec les stations de base existantes et la nouvelle station de base, en prenant pour hypothèse que cette dernière est située au centre du i ème élément.
- Déterminer quelles bandes de fréquences seraient refusées à la nouvelle station de base située au centre du i ème élément.
- Formuler une expression générale à partir des résultats de l'évaluation de l'utilisation du spectre obtenus pour chaque élément de zone et calculer le facteur d'utilisation du spectre avec l'équation (18).

2 Efficacité SUE par des faisceaux hertziens

2.1 Introduction

Pour des 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 SUE peut donc être exprimée ainsi:

$$SUE = \frac{C}{B \cdot S_\alpha} \quad (19)$$

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 SUE pour une longue artère munie de circuits dérivés aux points nodaux

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

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (20)$$

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.

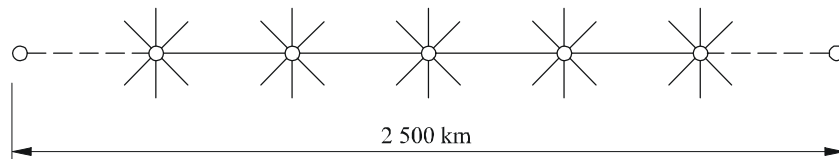
Cette formule tient compte de la mesure géométrique N (N dépend de l'angle admissible entre les circuits dérivés).

L'efficacité SUE 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 P.530;
- le circuit considéré, dont la Fig. 6 représente un schéma, a une longueur de 2 500 km;

FIGURE 6
Modèle de circuit



1046-06

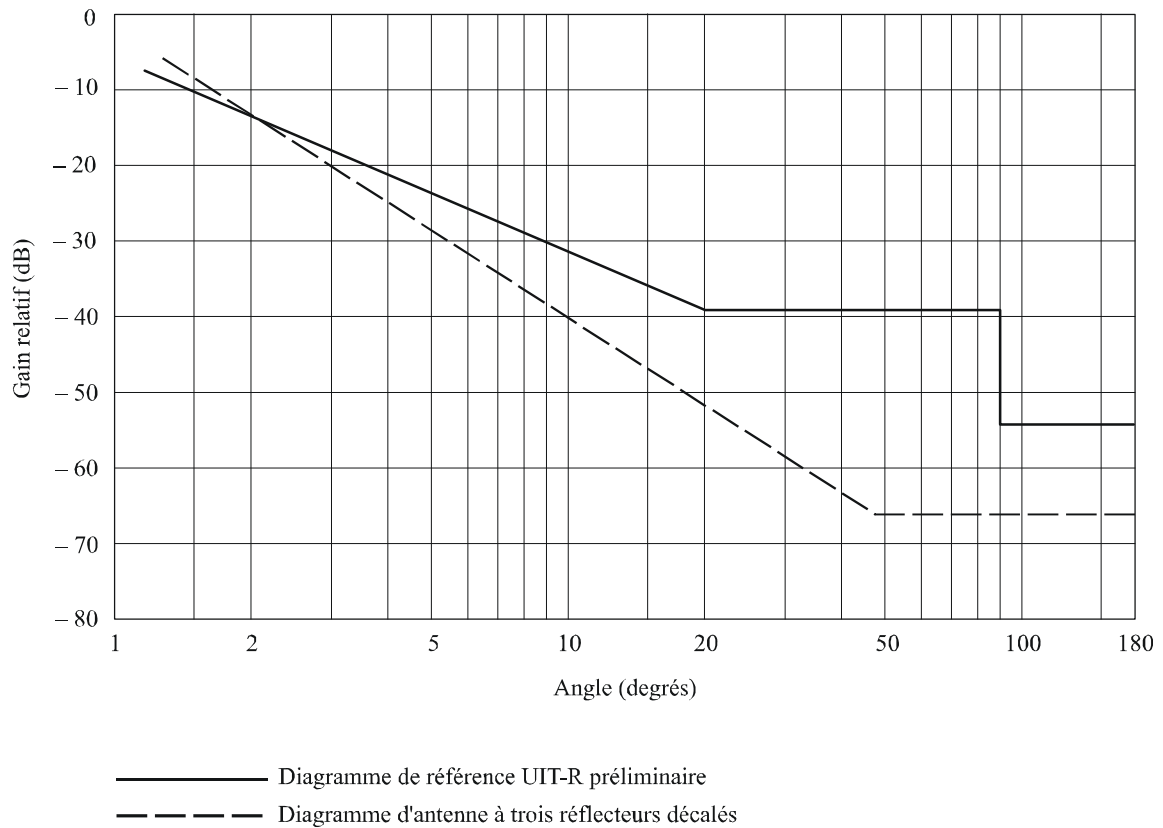
- le rapport porteuse/bruit, C/N , requis est exprimé par:

$$C/N = 10 \log [2^n - 1]/3] + 11,8 \quad \text{dB} \quad (21)$$

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. 7;
- angles aléatoires entre les circuits dérivés.

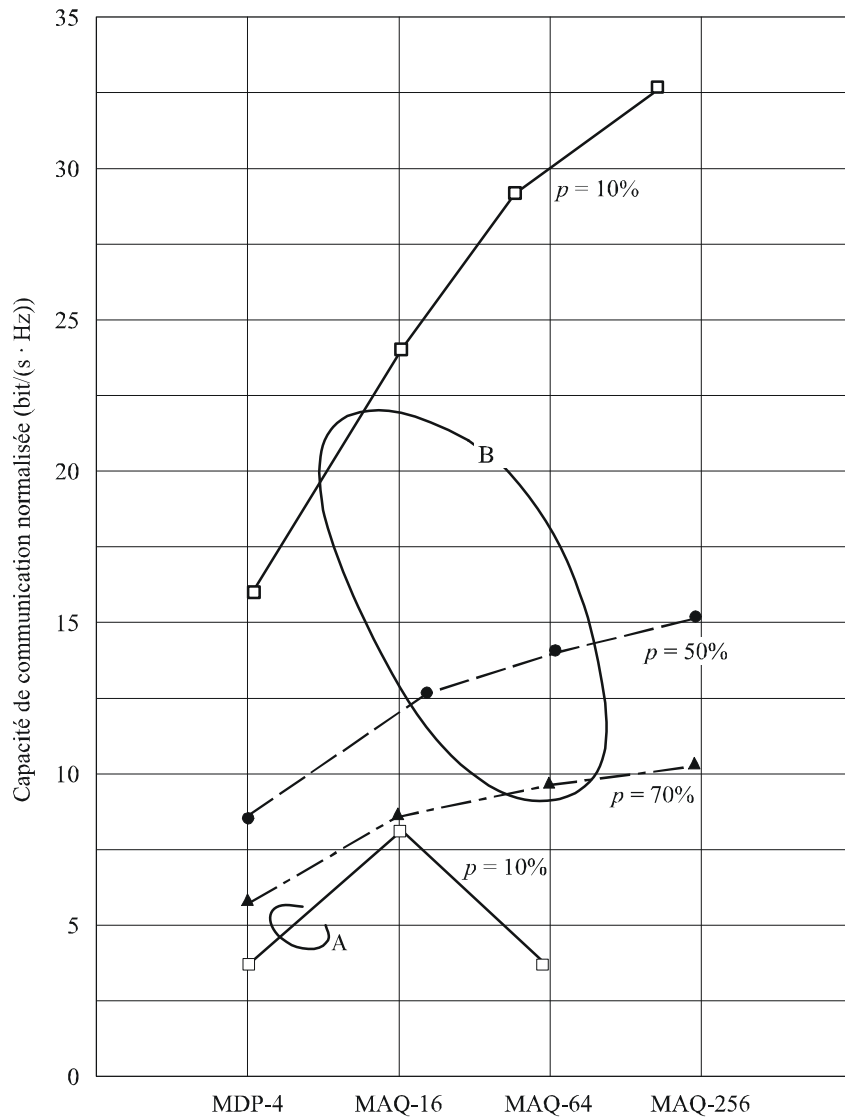
FIGURE 7
Diagramme de l'antenne



1046-07

Les capacités de communication normalisées pour ces deux types d'antennes ont été calculées et sont représentées sur la Fig. 8. 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 8
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

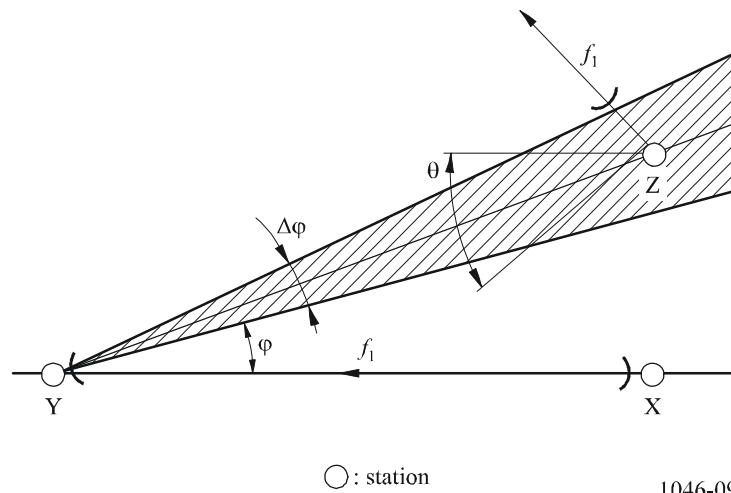
1046-08

2.3 Efficacité SUE par des faisceaux hertziens disposés arbitrairement

2.3.1 Formulation

La Fig. 9 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.

FIGURE 9
Disposition arbitraire des stations



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 SUE, peut s'exprimer par la formule suivante:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p} \cdot A}{p \cdot B_c} \quad (22)$$

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.

2.3.2 Application: efficacité SUE dans le cas d'un système de faisceaux hertziens à 2 GHz

Au moyen de la formule ci-dessus, on a calculé l'efficacité SUE, 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 RSE, 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 2. Les résultats obtenus sont donnés dans la Fig. 10.

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 SUE 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.

TABLEAU 2

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: × 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 | × 1,3 | | | |
| | MDP-4 | 10 ⁻⁶ | 13,7 dB | 5,5 dB | 19,2 dB | 772 kHz | × 1,4 | 1,1 MHz | 24 | 0,022 |
| | MDP-8 | 10 ⁻⁶ | 19,1 dB | 5,5 dB | 24,6 dB | 515 kHz | × 1,5 | 0,77 MHz | 24 | 0,031 |
| | QPRS | 10 ⁻⁶ | 16,8 dB | 5,5 dB | 22,3 dB | 722 kHz | × 1,1 | 0,85 MHz | 24 | 0,028 |
| MAQ-16 | 10 ⁻⁶ | 21,4 dB | 5,5 dB | 26,9 dB | 386 kHz | × 1,6 | 0,62 MHz | 24 | 0,039 | |

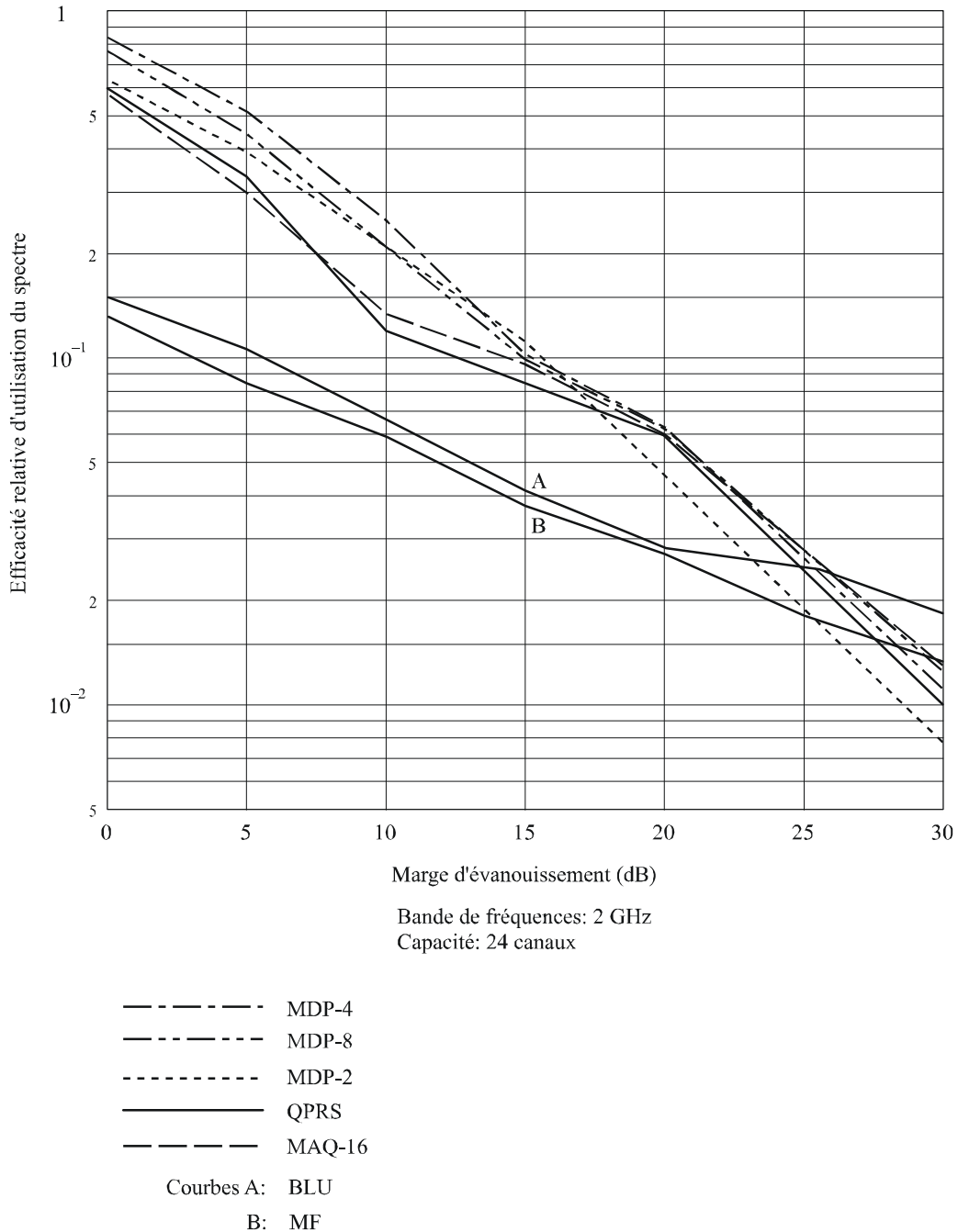
⁽¹⁾ Efficacité propre à chaque type de modulation.

QPRS: système en quadrature avec réponse partielle.

Les hypothèses sont les suivantes:

- pour chaque type de modulation, le brouillage admissible et l'efficacité SUE 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 10
Efficacité d'utilisation du spectre pour une disposition aléatoire des stations



1046-10

2.3.3 Efficacité SUE 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 3 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 (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 3 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.

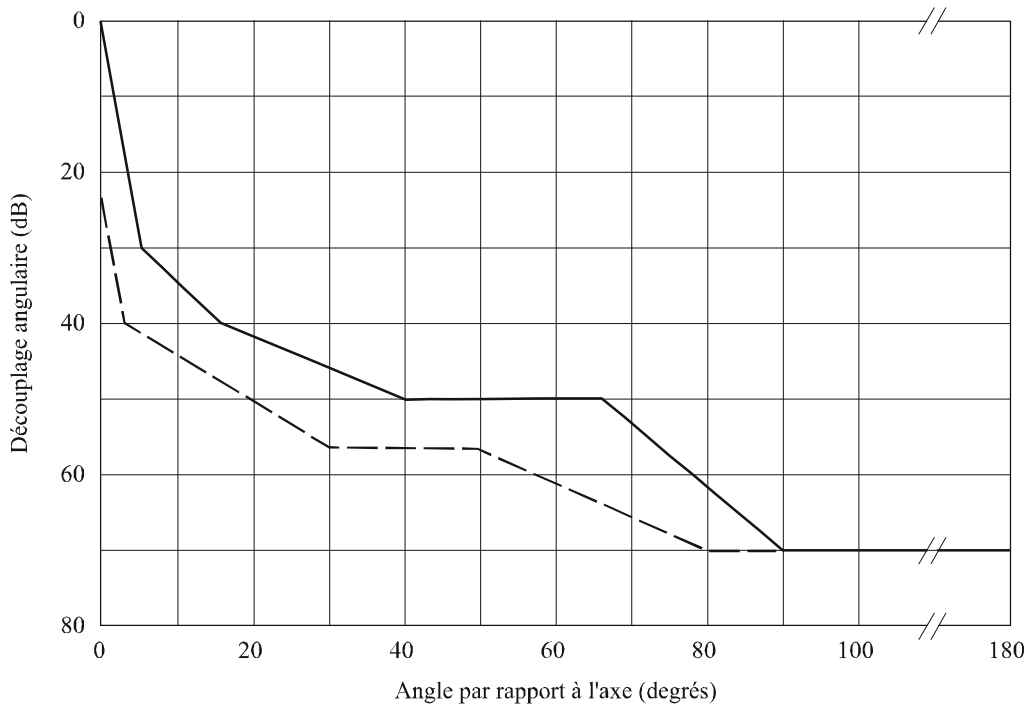
TABLEAU 3

| 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 (découplage de polarisation (XPD) résiduelle): 12 dB.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne utilisé dans l'analyse est présenté dans la Fig. 11; il s'agit d'une antenne parabolique type. On a supposé que la dégradation de la qualité (pour un taux d'erreur binaire (TEB) 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 11
Gabarits de rayonnement des antennes



Réflecteur parabolique $D/\lambda = 75$

— Copolarisation
- - - Polarisation orthogonale

1046-11

On a défini une densité de réseau normalisée, γ :

$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{ensemble de la zone desservie par le réseau}} \quad (23)$$

où:

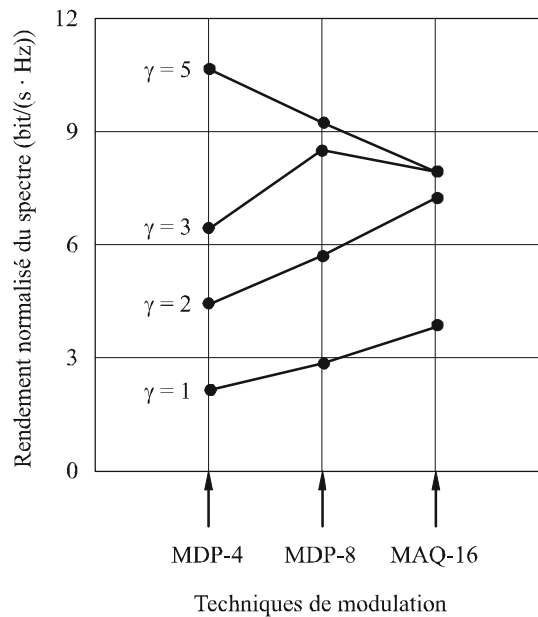
N : nombre de points nodaux radioélectriques dans le réseau

ρ : longueur quadratique moyenne des bords.

Les résultats représentés dans la Fig. 12 montrent que, dans les réseaux très denses, la meilleure efficacité est obtenue 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 SUE résultant des méthodes de modulation dépend des phénomènes de brouillage.

FIGURE 12

Efficacité d'utilisation du spectre dans un réseau maillé



Gabarit de rayonnement d'antenne de la Fig. 11.
 Dégradation de la qualité de fonctionnement due à
 la réutilisation de la fréquence: 1 dB

1046-12

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.

2.4 Evaluation des propriétés d'économie de spectre des nouvelles technologies pour faisceaux hertziens numériques

2.4.1 Introduction

Un modèle informatique a été mis au point pour évaluer les propriétés d'économie de spectre de différents facteurs de conception ou solutions techniques. Il faut quantifier l'efficacité SUE. La notion d'efficacité SUE peut être élargie et définie comme suit:

$$SUE = VC / (T \cdot A \cdot B) \quad (24)$$

où:

VC : nombre de voies téléphoniques

T : fraction du temps pendant laquelle un système est utilisé (définie comme égale à 1 pour la présente analyse)

A : espace refusé (km²)

B : largeur de bande occupée (MHz).

La formule (24) a été choisie parce qu'elle tient compte des fréquences refusées tout comme de l'espace (superficie) refusé pour l'évaluation des propriétés de conservation du spectre d'un système. L'espace refusé est l'espace dans lequel un autre système ne peut fonctionner sans que sa qualité ne tombe au-dessous d'un critère spécifié. L'espace refusé est fonction des caractéristiques du diagramme d'antenne du système, de la puissance de sortie de l'émetteur et du niveau de seuil de brouillage du récepteur.

L'algorithme utilisé pour calculer l'espace refusé suppose la fragmentation (quantification) du diagramme du gain d'antenne de l'émetteur en plusieurs segments, secteurs angulaires, qui représentent avec précision le diagramme d'antenne. Ce diagramme est une donnée d'entrée du modèle qui permet de calculer l'espace refusé en additionnant l'aire de chaque segment. Du point de vue géométrique, chaque segment est un secteur angulaire, dont l'aire peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Aire du secteur angulaire} = \pi R^2 \theta / 360 \quad (25)$$

où:

- R : rayon du secteur (R_1, R_2, \dots, R_n)
- θ : angle au centre du secteur ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$)
- n : nombre de segments angulaires.

Les rayons R_n pour chaque segment ont été calculés à l'aide de la formule:

$$L(R) = P_t + G_t(n) + G_r - I_{max} \quad (26)$$

où:

- $L(R)$: affaiblissement de propagation nécessaire (dB)
- P_t : puissance de sortie de l'émetteur (dBm)
- $G_t(n)$: gain d'antenne de l'émetteur pour le secteur n (dBi)
- G_r : gain d'antenne du récepteur, -10 dBi
- I_{max} : niveau de brouillage maximal admissible (dBm).

Puis, on détermine la distance R correspondant à l'affaiblissement nécessaire à l'aide d'un modèle de propagation à loi inverse considérant une terre lisse. Cela facilite l'évaluation de l'espace refusé pour chaque secteur angulaire (voir la formule (25)).

Pour appliquer la formule (24) à des faisceaux hertziens point à point, il faut définir les caractéristiques d'un système de référence entre deux emplacements de faisceaux hertziens. Ces caractéristiques comprennent la longueur du trajet, l'affaiblissement sur le trajet, le gain d'antenne, les affaiblissements d'insertion, la marge de protection contre les évanouissements et le gain du système. Il est également nécessaire d'établir certaines caractéristiques de modulation pour les types de modulation étudiés. Les modulations numériques considérées dans la présente étude sont la MAQ-16, la MAQ-64 et la MAQ-256. Les caractéristiques supposées dans le cas présent pour les faisceaux hertziens numériques qui sont fondées sur la norme nord-américaine, sont les suivantes:

Paramètres (voir la Note 1) des faisceaux hertziens numériques

- Voies téléphoniques:
 - 1 344 pour la MAQ-16
 - 2 016 pour la MAQ-64
 - 2 688 pour la MAQ-256
- Débit binaire:
 - 90 Mbit/s pour la MAQ-16
 - 135 Mbit/s pour la MAQ-64
 - 180 Mbit/s pour la MAQ-256

- TEB: 1×10^{-6}
- Facteur de bruit du récepteur, F : 4 dB
- Gain du système, G_s : 103 dB.

Pour l'analyse, on a utilisé le rendement de transmission théorique et les niveaux du rapport porteuse/bruit à l'entrée du récepteur $(C/N)_i$, pour les différents types de modulation, afin de garantir une comparaison juste.

On trouvera ci-après un examen de l'application de la formule (24) aux différents domaines de conception: antennes, modulation et traitement des signaux.

NOTE 1 – Les paramètres utilisés dans l'analyse ont été choisis de façon à donner une indication de l'analyse d'efficacité SUE d'un seul trajet pour tous les cas considérés. Ils ne sont donc pas nécessairement représentatifs de systèmes réalisables, en particulier de ceux utilisant des schémas de modulation d'ordre supérieur. Les résultats illustrent donc une application de la notion d'efficacité SUE aux faisceaux hertziens et les administrations devraient utiliser des paramètres représentatifs dans toute analyse d'efficacité SUE.

2.4.2 Antennes

L'espace refusé est un facteur clé dans l'étude de la conservation du spectre. L'un des principaux éléments des systèmes de radiocommunication contribuant à ce refus est l'antenne. Ces dernières années, des progrès importants réalisés dans la conception des antennes, en ce qui concerne la discrimination de polarisation et la réduction des lobes latéraux, ont permis d'améliorer l'efficacité SUE des systèmes de radiocommunication hertziens point à point.

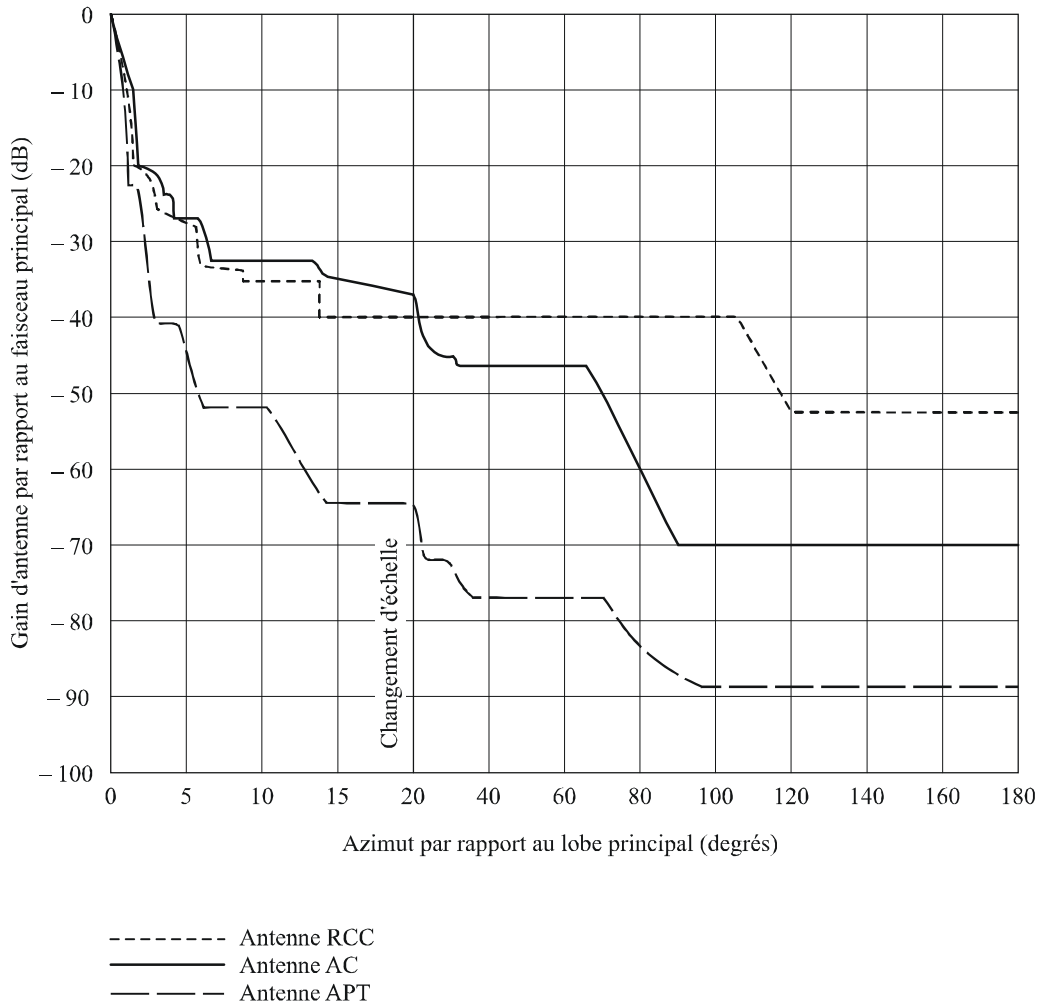
On peut obtenir une réutilisation des fréquences en appliquant des techniques économes de spectre à la conception des antennes. On peut réduire l'espace refusé en minimisant les lobes latéraux. Les diagrammes de rayonnement d'antenne et, par conséquent, les distributions des lobes latéraux, varient avec le type d'antenne. Trois types d'antennes couramment utilisés dans les transmissions hertziennes point à point sont:

- l'antenne parabolique type (APT);
- l'antenne en coiffe (AC);
- le réflecteur à cornet conique (RCC).

Des diagrammes de rayonnement type pour ces antennes, avec un gain à 43 dBi, sont représentés sur la Fig. 13. Les caractéristiques de ces diagrammes ont été utilisées dans le modèle.

FIGURE 13

Diagrammes de rayonnement type pour les antennes APT, AC et RCC

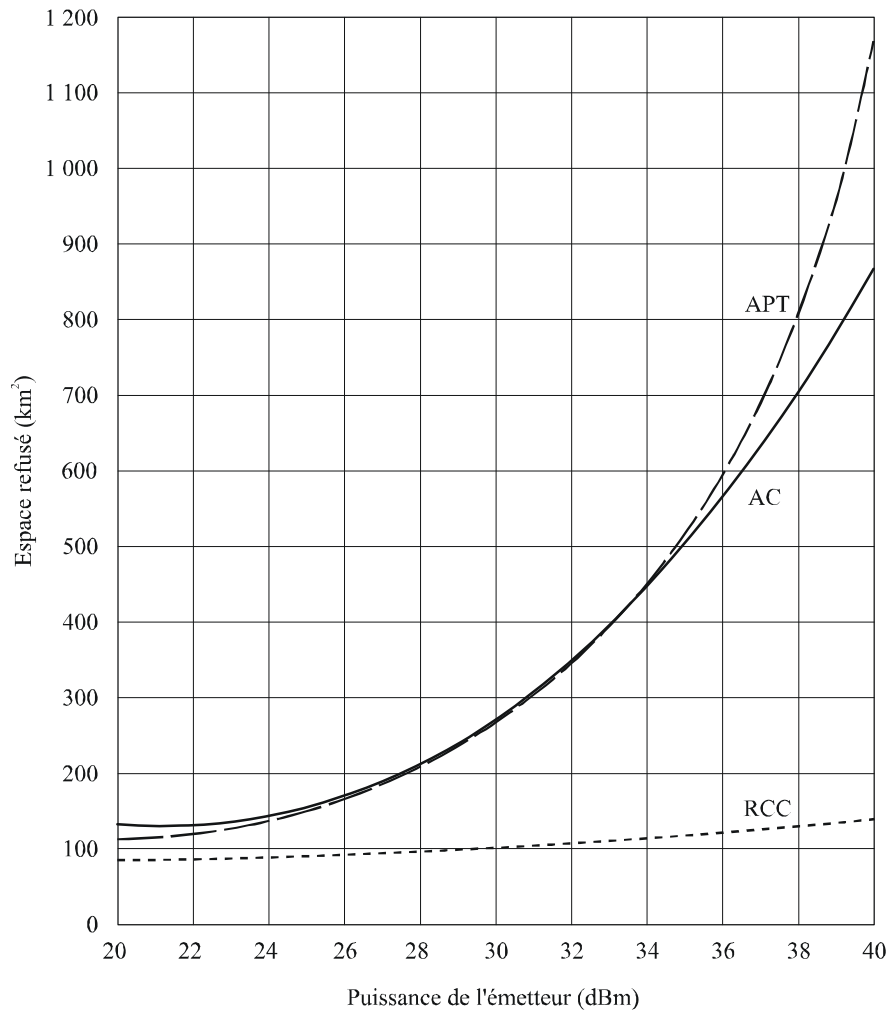


1046-13

La Fig. 14 représente, pour les 3 types d'antennes, une courbe de la puissance de sortie de l'émetteur en fonction de l'espace refusé pour un seuil de brouillage du récepteur de $-102,5$ dBm. Bien que le gain dans le faisceau principal soit le même pour toutes les antennes, les résultats indiqués sur la Fig. 14 montrent que l'antenne RCC présente un espace refusé moins grand que les 2 autres types d'antennes. Par ailleurs, la différence d'espace refusé pour les 3 types d'antennes est petite jusqu'à ce que la puissance d'émetteur dépasse 30 dBm. Cela est compréhensible parce que la contribution à l'espace refusé causée par les caractéristiques des antennes (lobes latéraux/lobes arrière) est petite tant que la puissance de l'émetteur ne dépasse pas 30 dBm. Lorsque la puissance de sortie des émetteurs dépasse 30 dBm, la différence d'espace refusé pour les 3 types d'antennes est significative. L'espace refusé est également fonction du seuil de brouillage du récepteur.

FIGURE 14

Espace refusé en fonction du type d'antenne et de la puissance de sortie de l'émetteur



Calculs basés sur une hauteur d'antenne type de 50 m au-dessus du sol lisse

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= -102,5 \text{ dBm} \\
 G_t(\text{faisceau principal}) &= 43 \text{ dBi} \\
 G_r &= -10 \text{ dBi}
 \end{aligned}$$

1046-14

Etant donné que l'espace refusé pour les 3 types d'antennes est fonction de la puissance P_t et du niveau de brouillage, I_{max} , les propriétés d'économie de spectre pour les trois types d'antennes doivent aussi être rapportées au type de modulation du système. Par conséquent, les propriétés d'amélioration de l'efficacité du spectre des antennes APT, AC et RCC seront examinées dans le paragraphe concernant la modulation.

2.4.3 Modulation

L'évaluation des propriétés d'économie de spectre pour différents systèmes de modulation est très complexe parce que tant le spectre que l'espace refusé sont affectés par le choix du type de modulation utilisé dans un système. De manière générale, les paramètres du système, comme la largeur de bande occupée, le rapport porteuse/bruit nécessaire à l'entrée du récepteur (C/N_i) et le niveau I_{max} sont tous fonction du type de modulation et ont un effet direct sur l'utilisation du spectre.

L'analyse est basée sur le rendement de transmission théorique et le rapport $(C/N)_i$ pour les différents types de modulation de manière à garantir une comparaison exacte. Pour évaluer les propriétés d'économie de spectre, on a déterminé pour chacun les différents types de modulation, la largeur de bande occupée, B , et le niveau P_t . Ces paramètres sont indiqués dans le Tableau 4.

TABLEAU 4
Paramètres du système numérique

| Type de modulation | Rendement de transmission (bit/(s · Hz)) | Largeur de bande occupée, B (MHz) | Rapport porteuse/bruit nécessaire à l'entrée du récepteur, $(C/N)_i$ (dB) | Niveau de bruit (dBm) | Niveau minimum de la porteuse (dBm) | Niveau de puissance de sortie de l'émetteur, P_t (dBm) |
|--------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------|-------------------------------------|--|
| MAQ-16 | 4 | 22,5 | 21,0 | -96,5 | -75,5 | 27,5 |
| MAQ-64 | 6 | 22,5 | 27,0 | -96,5 | -69,5 | 33,5 |
| MAQ-256 | 8 | 22,5 | 33,0 | -96,5 | -63,4 | 39,5 |

La largeur de bande occupée, B , pour les modulations numériques a été déterminée à l'aide de la relation:

$$B \text{ (MHz)} = \text{Débit binaire (Mbit/s)} / \text{rendement de transmission (bit/(s · Hz))} \quad (27)$$

où le débit binaire (voir les paramètres du système numérique) et le rendement de transmission (voir le Tableau 4) sont fonction du type de modulation.

Pour établir la P_t pour chaque type de modulation, on a déterminé le rapport $(C/N)_i$ à l'entrée du récepteur nécessaire pour les critères de qualité spécifiés. Un TEB de 1×10^{-6} a été utilisé comme critère de qualité et le rapport $(C/N)_i$ nécessaire théorique a été obtenu d'après la littérature.

Les niveaux de bruit à l'entrée du récepteur, N_i , donnés dans le Tableau 4 (-96,5 dBm) ont été déterminés pour une largeur de bande du récepteur de 22,5 MHz et un facteur de bruit du récepteur de 4 dB. Le niveau de porteuse minimal nécessaire, C_{min} , à l'entrée du récepteur a ensuite été déterminé à partir de la relation:

$$C_{min} \text{ (dBm)} = (C/N)_i + N_i \quad (28)$$

La puissance de l'émetteur nécessaire, P_t , donnée dans le Tableau 4 a été déterminée à l'aide de la formule:

$$P_t \text{ (dBm)} = C_{min} + G_s \quad (29)$$

où G_s représente le gain du système qui a été fixé à 103 dB.

La zone refusée est également fonction du niveau I_{max} du récepteur victime. Le niveau I_{max} du récepteur associé à chaque modulation a été déterminé dans l'hypothèse où le récepteur victime a le même type de modulation que l'émetteur brouilleur. Dans la présente analyse, le niveau I_{max} a été déterminé à l'aide des critères établis à la Telecommunications Industry Association (TIA) (Bulletin N° 10-E). Pour les systèmes numériques, le critère de qualité était une augmentation du

TEB de 1×10^{-6} à 1×10^{-5} , ce qui correspond à un accroissement de 1 dB environ du niveau de bruit du récepteur. Cela équivaut à un rapport brouillage/bruit à l'entrée du récepteur, $(I/N)_i$ de -6 dB (c'est-à-dire, $I_{max} = -96,5 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -102,5 \text{ dBm}$ pour la MAQ-16, la MAQ-64 et la MAQ-256).

Le Tableau 5 contient les valeurs de l'efficacité SUE calculées à l'aide de la largeur de bande et de la puissance de sortie de l'émetteur (Tableau 4) et du niveau I_{max} de -102,5 dBm. Les chiffres donnés de l'efficacité SUE dans le Tableau 5 concernent trois types de modulation différents et trois types d'antenne (APT, AC et RCC). Les systèmes présentant des valeurs plus élevées de l'efficacité SUE sont plus efficaces du point de vue de l'utilisation du spectre. Il convient de souligner que les résultats calculés font nettement apparaître que l'efficacité SUE varie considérablement d'un type d'antenne à l'autre. Par exemple, l'efficacité SUE pour la MAQ-64 est égale à 0,201 pour l'antenne APT contre 0,212 et 0,811 respectivement pour les antennes AC et RCC. Par conséquent, les résultats indiqués dans le Tableau 5 montrent clairement que l'efficacité SUE ne peut être optimisée que si l'on prend en compte à la fois les effets de l'antenne et ceux de la modulation.

TABLEAU 5

Efficacité d'utilisation du spectre

| Ordre | Efficacité SUE pour différents types d'antenne | | |
|-------|--|--------------------|--------------------|
| | APT | AC | RCC |
| 1 | MAQ-16 (0,307) | MAQ-16 (0,282) | MAQ-256 (0,841) |
| 2 | MAQ-64 (0,201) | MAQ-64 (0,212) | MAQ-64 (0,811) |
| 3 | MAQ-256 (0,112) | MAQ-256 (0,144) | MAQ-16 (0,709) |

Par ailleurs, les résultats d'analyse montrent que l'efficacité SUE est plus élevée pour la MAQ-64 que pour la MAQ-256 pour les antennes APT et AC mais pas pour l'antenne RCC. Le Tableau 6 permet d'expliquer pourquoi la MAQ-64 est plus «efficace du point de vue de l'utilisation du spectre» que la MAQ-256 pour une antenne AC à très haute performance. Les paramètres d'entrée du modèle sont fournis dans ce tableau. Le nombre de voies téléphoniques est de 2016 pour la MAQ-64 et de 2 688 pour la MAQ-256. La largeur de bande nécessaire du système, B , est la même pour la MAQ-64 et la MAQ-256 ($B = 22,5 \text{ MHz}$), mais le niveau nécessaire P_i est sensiblement plus élevé pour la MAQ-256 que pour la MAQ-64 (39,6 dBm contre 33,5 dBm). Etant donné que la puissance de l'émetteur a un effet important sur l'espace refusé à un autre utilisateur (voir la Fig. 14), l'espace refusé pour la MAQ-256 est sensiblement plus grand que pour la MAQ-64, qui est donc la plus efficace des deux du point de vue de l'utilisation du spectre.

TABLEAU 6

**Comparaison de l'efficacité d'utilisation du spectre pour une
antenne AC avec MAQ-64 et MAQ-256**

| Paramètre | MAQ-64 | MAQ-256 |
|--|--------|---------|
| Voies téléphoniques | 2 016 | 2 688 |
| B (MHz) (voir le Tableau 4) | 22,5 | 22,5 |
| P_t (dBm) (voir le Tableau 4) | 33,5 | 39,5 |
| I_{max} (dBm) | -102,5 | -102,5 |
| A (km ²) (voir la Fig. 11) | 421 | 830 |
| Efficacité SUE (voir le Tableau 5) | 0,212 | 0,144 |

Cependant le potentiel d'économie de spectre d'un système dépend de plusieurs facteurs de conception, qui doivent tous être pris en compte lors de l'évaluation de l'efficacité SUE d'un système. On ne peut donc pas dire qu'un système ayant une modulation particulière présente davantage de propriétés de conservation du spectre qu'un système ayant une autre modulation, sans tenir compte de tous les autres facteurs de conception (par exemple: antennes, traitement des signaux, filtres RF, etc.).

Le Tableau 5 peut aussi servir à déterminer l'amélioration relative de la conservation du spectre que l'on peut obtenir avec une antenne AC ou une antenne RCC par rapport à une antenne APT. Comme on l'a dit plus tôt, la plus grande économie de spectre que permet de réaliser l'antenne AC ou RCC dépend du type de modulation. Cela tient au fait que l'espace refusé produit par un type d'antenne donné est fonction de P_t , qui dépend de la modulation (voir la Fig. 14). Le Tableau 7 montre l'amélioration (en pourcentages) de l'efficacité SUE pour les différentes modulations étudiées à l'aide des données d'efficacité SUE du Tableau 5. Pour les modulations numériques, l'amélioration est particulièrement nette pour la MAQ-256, avec une augmentation de 28% et 533% respectivement pour l'antenne AC et pour l'antenne RCC.

TABLEAU 7

**Amélioration de l'efficacité d'utilisation du spectre pour des
antennes AC et RCC en fonction du type de modulation**

| Type de modulation | Amélioration de l'efficacité SUE | |
|--------------------|----------------------------------|-------------|
| | Antenne AC | Antenne RCC |
| MAQ-16 | -8% | 130% |
| MAQ-64 | 6% | 338% |
| MAQ-256 | 28% | 533% |

2.4.4 Traitement des signaux

Dans les faisceaux hertziens du service fixe, le traitement des signaux se fait aux terminaux d'émission et de réception. Il consiste en opérations électriques sur un signal afin de produire certaines caractéristiques souhaitées. Il peut influencer sur des paramètres comme l'amplitude, la fréquence, la phase, le niveau des signaux et la fiabilité. L'utilisation de techniques de traitement des signaux peut améliorer le gain de traitement d'un système, autorisant des niveaux inférieurs de P_t pour des critères de qualité donnés à la sortie de récepteur. Ainsi, grâce à l'utilisation de telles techniques, la puissance P_t peut être abaissée, ce qui réduit l'espace refusé à d'autres systèmes. Il

convient, toutefois, de noter que des techniques de traitement des signaux sont utilisées par les concepteurs des faisceaux hertziens pour améliorer la fiabilité des liaisons et ne sont pas généralement envisagées aux fins de conservation du spectre.

2.4.5 Correction des erreurs/codage

Le codage avec correction d'erreurs directe (CED) est une méthode d'amélioration du TEB des faisceaux hertziens numériques, notamment lorsque le système a une puissance limitée. L'utilisation des techniques de codage CED permet de corriger un nombre limité d'erreurs à l'extrémité de réception au moyen d'un codage spécial et d'un logiciel (ou d'un matériel) mis en œuvre aux deux extrémités d'un circuit. Cette amélioration du TEB peut être compensée par une réduction du rapport $(C/N)_i$, pour obtenir un TEB donné, ce qui réduit l'espace refusé à d'autres systèmes. La réduction du rapport $(C/N)_i$ est rapportée au gain de codage. La qualité d'une technique de codage est décrite par le gain et le taux de codage. Toutefois, le taux de codage a un impact sur la largeur de bande occupée par le système, ce qui augmente le spectre refusé à d'autres utilisateurs.

Pour montrer l'effet du codage sur la conservation du spectre, on a pris comme modulation la MAQ-64. Quatre types de codes CED ont été choisis. Le Tableau 8 montre le taux de codage, le facteur d'expansion de la largeur de bande (1/taux de codage), la largeur de bande occupée B après codage, la réduction que l'on peut obtenir du rapport $(C/N)_i$ pour un TEB de 1×10^{-6} et la puissance P_t nécessaire, après prise en compte de la réduction du rapport $(C/N)_i$ que l'on peut obtenir. Les valeurs de B et de P_t , indiquées dans le Tableau 8, ont été introduites dans le modèle d'efficacité SUE pour évaluer le codage en tant que technique d'évaluation du spectre. Le Tableau 9 montre l'efficacité SUE pour les trois types d'antennes: APT, AC et RCC. L'efficacité SUE pour la MAQ-64 sans codage est également représentée dans le Tableau 9 pour une comparaison de référence entre la modulation avec et la modulation sans codage.

TABLEAU 8

Correction des erreurs/codage (modulation MAQ-64)

| Traitement des signaux | Taux de codage | Facteur d'expansion de la largeur de bande | Largeur de bande occupée, B , (MHz) | Réduction de C/N (dB) | Puissance de sortie de l'émetteur, P_t (dBm) |
|-------------------------------|----------------|--|---------------------------------------|-------------------------|--|
| Correction des erreurs/codage | 1/2 | 2 | 45,00 | 6,0 | 27,5 |
| | 3/4 | 1,333 | 30,00 | 3,5 | 30,0 |
| | 7/8 | 1,142 | 25,70 | 2,0 | 31,5 |
| | 18/19 | 1,055 | 23,74 | 3,0 | 30,5 |

En résumé, les valeurs de l'efficacité SUE données dans le Tableau 9 indiquent que les techniques de traitement des signaux comme la correction des erreurs ou le codage qui font appel à des compromis entre la largeur de bande RF et le rapport C/N n'entraînent une amélioration de la conservation du spectre des valeurs supérieures de l'efficacité SUE que lorsque des techniques de codage à haut rendement (c'est-à-dire présentant des débits et un gain de codage élevés) sont utilisées. L'amélioration relative de la conservation du spectre est également plus grande lorsque le système a une antenne de type APT que lorsqu'il a une antenne de type AC ou RCC. Cela tient au fait que la réduction de l'espace refusé est plus grande pour les antennes APT en raison des caractéristiques plus élevées dans les lobes latéraux/lobes arrière.

TABLEAU 9

Efficacité d'utilisation du spectre pour correction des erreurs/codage (modulation MAQ-64)

| Type de traitement des signaux | | Efficacité SUE pour différents types d'antennes | | |
|--------------------------------|----------------|---|-------|-------|
| | | APT | AC | RCC |
| Sans traitement des signaux | | 0,201 | 0,212 | 0,811 |
| Correction des erreurs/codage | Taux de codage | | | |
| | 1/2 | 0,230 | 0,211 | 0,532 |
| | 3/4 | 0,249 | 0,240 | 0,673 |
| | 7/8 | 0,235 | 0,237 | 0,754 |
| | 18/19 | 0,294 | 0,285 | 0,838 |

2.4.6 Égaliseurs adaptatifs/transversaux

Les égaliseurs adaptatifs/transversaux améliorent la qualité des systèmes numériques en présence d'évanouissements par trajets multiples, de distorsion linéaire ou des deux. Les égaliseurs ne peuvent qu'atténuer les aspects dispersifs des évanouissements par trajets multiples. Ils remodèlent l'impulsion de manière à minimiser les brouillages entre symboles. Dans les récepteurs MAQ-64, ils permettent d'obtenir une amélioration de 4 à 6 dB environ de la marge composite contre les évanouissements. Leur principal inconvénient est leur coût. Le modèle a été utilisé pour une largeur de bande de système de 22,5 MHz et une puissance P_t de 29,5 dBm (une réduction de 4 dB de P_t pour la MAQ-64). Le Tableau 10 donne l'efficacité SUE pour les trois types d'antennes: APT, AC et RCC. Les valeurs de la SUE sans égaliseurs adaptatifs sont également indiquées dans le tableau pour une comparaison de référence avec des égaliseurs adaptatifs.

TABLEAU 10

Efficacité d'utilisation du spectre pour un égaliseur adaptatif (modulation MAQ-64)

| Type de traitement des signaux | | Efficacité SUE pour les différents types d'antennes | | |
|--------------------------------|--|---|-------|-------|
| | | APT | AC | RCC |
| Sans traitement des signaux | | 0,201 | 0,212 | 0,811 |
| Avec égaliseurs adaptatifs | | 0,355 | 0,337 | 0,930 |

Pour la MAQ-64, l'utilisation d'égaliseurs adaptatifs permet d'améliorer de 15% à 75% environ les propriétés d'économie de spectre d'un système, l'amélioration étant la plus sensible pour les systèmes avec antennes de type APT.

2.4.7 Correction d'erreurs/codage et égaliseurs adaptatifs

Dans certains systèmes numériques, on utilise à la fois la correction d'erreurs/le codage et des égaliseurs adaptatifs pour améliorer la qualité. Pour la MAQ-64, l'utilisation de la correction d'erreurs du codage (taux de codage 18/19) et d'égaliseurs adaptatifs permet de réduire le rapport $(C/N)_i$ de 7 dB pour un TEB de 1×10^{-6} . L'application du modèle d'efficacité SUE pour une largeur de bande occupée B de 23,74 MHz et une puissance P_t de 26,5 dBm (une réduction de 7 dB de P_t pour la MAQ-64) est représentée dans le Tableau 11. Il ressort de ce Tableau que l'utilisation de la correction d'erreurs, du codage et d'égaliseurs adaptatifs permet d'améliorer de 30% à 150% les propriétés d'économie de spectre d'un système, l'amélioration étant particulièrement marquée pour les systèmes qui utilisent des antennes paraboliques types.

TABLEAU 11

**Efficacité d'utilisation du spectre pour correction des erreurs/codage
et égaliseurs adaptatifs (modulation MAQ-64)**

| Type de traitement des signaux | Efficacité SUE pour différents types d'antennes | | |
|---|---|-------|-------|
| | APT | AC | RCC |
| Sans traitement des signaux | 0,201 | 0,212 | 0,811 |
| Correction d'erreurs/codage et égaliseurs | 0,503 | 0,441 | 1,066 |

2.4.8 Résumé

2.4.8.1 Le potentiel d'économie de spectre d'un système est fonction de plusieurs facteurs de conception qui doivent tous être pris en considération lors de l'évaluation de l'efficacité SUE d'un système. On ne peut pas dire qu'un système ayant une modulation particulière soit plus économe de spectre qu'un système ayant une autre modulation sans tenir compte de tous les autres facteurs de conception (antennes, traitement des signaux, filtres RF, etc.).

2.4.8.2 Les modulations numériques d'ordre supérieur (modulations avec rendement de transmission plus élevé, (bit/(s · Hz))) nécessitent des niveaux de puissance plus élevés à la sortie des émetteurs. Par conséquent, quand on applique la définition de l'utilisation du spectre et de l'efficacité SUE, qui tient compte de l'espace refusé, des modulations ayant un rendement de transmission supérieure ne sont pas nécessairement plus économes de spectre. Par conséquent, le rendement de transmission de la modulation numérique peut ne pas suffire comme indicateur de l'efficacité SUE.

NOTE 1 – On pourra trouver un complément d'information dans:

HINKLE, R.L. et FARRAR, A.A. [mai 1989] Spectrum-conservation techniques for fixed microwave systems. NTIA Report TR-89-243. National Telecommunications and Information Administration. US Dept. of Commerce, Etats-Unis d'Amérique.

2.5 Efficacité relative RSE de liaisons hertziennes rurales à un seul bond

Les valeurs de l'efficacité relative RSE de faisceaux hertziens ruraux point-multipoint à un seul bond utilisant différents pas de modulation ont été comparées à celles du système MTES (voir le § 3 et l'équation (4) de l'Annexe 1).

Dans le modèle adopté pour un tel réseau, chaque station centrale a une zone de service bien précise à l'intérieur de laquelle elle communique, via des liaisons à une seule section, avec quatre stations locales situées dans différents emplacements en milieu rural.

On considère que l'efficacité relative RSE d'un tel réseau par rapport à celle d'un système MTES est fonction de nombreux paramètres: bande de fréquences utilisée, type de fréquence et de polarisation, planification dans l'espace du réseau, hauteur à laquelle est suspendue l'antenne, diamètre de l'antenne dans différents types de réseau, paramètres de modulation (MF et modulation par impulsions et codage (MIC) avec MDP- M -valente).

Le Tableau 12 présente quelques résultats de ces calculs dans le cas d'un réseau fonctionnant dans la bande des 8 GHz, avec une hauteur de suspension de l'antenne de 45 m, des diamètres d'antenne, D , de 1,5 m et 3,0 m, 2 ou 4 fréquences d'exploitation ($K = 2$ ou $K = 4$, respectivement) et deux types de plan de polarisation – avec utilisation dans le réseau d'un type (1P) ou de deux types (2P) de polarisation. Pour la modulation MIC, les données sont données pour une modulation MDP-2 ($M = 2$), une modulation MDP-4 ($M = 4$) et pour une valeur (M_{max}) qui garantit une valeur maximale de l'efficacité relative RSE. Les tirets dans le Tableau 12 indiquent qu'avec les

combinaisons de paramètres données, les normes de qualité de fonctionnement ne peuvent pas être respectées. Comme le montre ce même Tableau, l'utilisation combinée de la modulation MIC et de la modulation MDP se traduit par un gain d'efficacité relative RSE uniquement dans des conditions de modulation optimales ($M_{max} \geq 8$) et avec des antennes de 3 m de diamètre.

NOTE 1 – On pourra trouver un complément d'information dans l'Annexe IV du Rapport 662-3 (Düsseldorf, 1990).

2.6 Utilisation du spectre par des systèmes point à point

2.6.1 Introduction

Dans le cas général, l'efficacité d'utilisation du spectre pour un système point à point est donnée par l'expression complexe suivante:

$$SUE = \{M, U\} \tag{30}$$

où:

M: effet utile obtenu avec le système point à point considéré; et

U: facteur d'utilisation du spectre pour ce système.

TABLEAU 12

Efficacité relative RSE de liaisons hertziennes rurales à un seul bond

| Modulation | Plan de fréquences | Paramètres de modulation | Efficacité relative RSE | | | |
|------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|--------|------------------|--------|
| | | | <i>D</i> = 1,5 m | | <i>D</i> = 3,0 m | |
| | | | 1P | 2P | 1P | 2P |
| MF | <i>K</i> = 2 | | 0,27 | 0,3 | 0,285 | 0,285 |
| | <i>K</i> = 4 | | 0,2 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| MIC | <i>K</i> = 2 | <i>M</i> = 2 | – | – | 0,055 | 0,049 |
| | | <i>M</i> = 4 | – | – | – | – |
| | | <i>M</i> _{max} | – | – | 0,055 | 0,055 |
| | <i>K</i> = 4 | <i>M</i> = 2 | 0,125 | 0,0625 | 0,0625 | 0,0625 |
| | | <i>M</i> = 4 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| | | <i>M</i> _{max} | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,5 |

2.6.2 Définition de l'effet utile pour un système point à point

La notion d'effet utile d'un système point à point s'applique aussi bien aux systèmes analogiques qu'aux systèmes numériques. On pourrait considérer simplement que l'effet utile d'un système analogique se détermine par référence au nombre de canaux vocaux de transmission. Toutefois, pour des systèmes point à point, il est également intéressant d'étudier la distance totale sur laquelle l'information est transmise. Ainsi, l'effet utile du système analogique point à point peut être défini comme suit:

$$M = n_{vc} \cdot D \tag{31}$$

où:

- M : effet utile obtenu avec un système analogique point à point
- n_{vc} : nombre de canaux vocaux assurés par la liaison
- D : distance sur laquelle l'information est transmise.

Pour une liaison donnée, la distance D à utiliser est la longueur de la liaison réelle. Toutefois, pour ce qui est de l'évaluation d'un système général, on utilise différentes valeurs types de D selon la fréquence d'exploitation du système.

Dans le cas de systèmes numériques, il est possible de mesurer l'effet utile en multipliant le débit de transmission par la distance totale sur laquelle l'information est transmise.

L'information transmise par un système numérique comprend de nombreuses données supplémentaires (surdébit) en plus des données utiles. Ce surdébit comprend des protocoles de contrôle, des codes de détection et de correction des erreurs et des informations relatives à la gestion du système. Le débit de transmission total du système est constitué du surdébit et des données utiles. Afin de mesurer le volume de données utiles transmises, il est proposé d'utiliser un facteur de surdébit comme suit.

$$M = T_{TR} \cdot O_F \cdot D \quad (32)$$

où:

- M : effet utile obtenu avec un système numérique point à point
- T_{TR} : débit total de transmission du système
- O_F : facteur de surdébit, dont la valeur est comprise entre 0 et 1
- D : distance sur laquelle l'information est transmise.

Si l'on connaît le débit de transmission du message de l'utilisateur, le facteur de surdébit peut être remplacé par le débit de transmission effectif.

$$M = E_{TR} \cdot D \quad (33)$$

où:

- M : effet utile obtenu avec un système numérique point à point
- E_{TR} : débit de transmission effectif du système
- D : distance sur laquelle l'information est transmise.

Dans les cas où il n'est pas possible de mesurer le débit de transmission total ou effectif, on peut utiliser le débit de transmission minimum requis pour les fréquences radioélectriques utilisées par l'équipement.

2.6.3 Définition du facteur d'utilisation du spectre pour des systèmes point à point

Le facteur d'utilisation du spectre pour un système point à point peut être calculé avec l'équation suivante:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (34)$$

où:

- U : facteur d'utilisation du spectre pour un système point à point
- B : largeur de bande refusée
- S : espace géométrique refusé (aire)
- T : durée refusée, dont la valeur est comprise entre 0 et 1.

La largeur de bande, B , correspond au gabarit défini dans les règlements applicables aux fréquences radioélectriques. Il est également possible d'utiliser la largeur de canal lorsque l'on ne dispose pas d'informations relatives au gabarit.

Lorsque l'on calcule l'espace géométrique refusé, S , il conviendrait d'examiner les zones refusées par l'émetteur et par le récepteur, dans les deux cas sur la base de la valeur réelle des paramètres de liaison. L'espace géométrique refusé correspondra à la somme des superficies des secteurs, A_{S_i} , refusées par l'émetteur et le récepteur. Lorsque la zone refusée par l'émetteur comprend la totalité de la zone refusée par le récepteur, il n'est pas nécessaire de calculer cette dernière. Dans les autres cas, il conviendrait d'ajouter la partie de la zone refusée par le récepteur située à l'extérieur de la zone refusée par l'émetteur à cette dernière pour obtenir la zone refusée totale (S).

Le calcul de la zone refusée par un émetteur ou par un récepteur se fait par référence au diagramme de l'antenne. Il est possible de calculer la zone refusée en faisant la somme des superficies des secteurs angulaires dans lesquels on peut considérer que le gain d'antenne est presque constant.

$$S = \sum_{i=1}^n A_{S_i} \quad (35)$$

où:

- S : espace géométrique refusé (km^2)
- A_{S_i} : aire refusée du i ème secteur (km^2)
- n : nombre de secteurs.

La superficie d'un secteur (A_S) peut être calculée comme suit:

$$A_S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta}{360} \quad (36)$$

où:

- A_S : superficie du secteur (km^2)
- R : rayon du secteur (km)
- θ : angle du secteur (degrés).

En règle générale, on analysera la totalité de la circonférence de la zone entourant l'émetteur (360°) pour obtenir la zone refusée. Des résultats concrets montreront certainement que seules des angles donnés avec une certaine direction (azimut) présenteront un intérêt. Ainsi, dans de nombreux cas, on peut n'étudier qu'un secteur dont l'angle est égal à l'ouverture à mi-puissance du faisceau de l'antenne pour l'enveloppe du diagramme de rayonnement de l'antenne considérée. En procédant à cette simplification, il est possible de calculer l'espace géométrique refusé S comme suit:

$$S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta_{HP}}{360} \quad (37)$$

où:

- S : espace géométrique refusé (km^2)
- R : rayon du secteur (km)
- θ_{HP} : ouverture à mi-puissance du faisceau de l'antenne (degrés).

Lorsque l'on calcule le rayon du secteur pour la zone refusée par l'émetteur, on part du principe que dans chaque secteur, un récepteur est pointé en direction de l'émetteur. De même, pour calculer le rayon du secteur pour la zone refusée par le récepteur, on part du principe que dans chaque secteur, un émetteur est pointé en direction du récepteur. Le rayon du secteur peut être calculé comme suit:

$$R = 10^{A/20} \quad (38)$$

$$A = P_{TX} - L_{CTX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{CRX} - I_{RX} - 20 \log(f) - 32,44 - A_D \quad (39)$$

où:

- P_{TX} : puissance d'émission (dBm)
- L_{CTX} : affaiblissement du circuit d'émission (dB)
- G_{TX} : gain de l'antenne de l'émetteur au centre de l'ouverture de faisceau du secteur (dBi)
- G_{RX} : gain de l'antenne du récepteur en direction de l'émetteur (azimut) (dBi)
- L_{CRX} : affaiblissement du circuit du récepteur (dB)
- I_{RX} : seuil de brouillage du récepteur (dBm)
- f : fréquence centrale de fonctionnement (MHz)
- A_D : affaiblissement de diffraction additionnel (dB).

Pour des liaisons subissant une diffraction, l'affaiblissement de diffraction additionnel A_D est calculé comme suit:

$$A_D = 10 - \frac{20h}{F_1} \quad (40)$$

où:

- A_D : affaiblissement de diffraction additionnel (dB)
- h : distance entre l'obstacle le plus gênant et la ligne de visibilité directe (h est négative lorsque cette ligne est occultée) (m)
- F_1 : rayon du premier ellipsoïde de Fresnel à h (m).

NOTE 1– L'affaiblissement de diffraction additionnel adopté ne tient compte que d'un obstacle le plus gênant. D'autres modèles peuvent également être choisis afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

Dans le cas de l'analyse d'un système général, on a adopté un modèle de propagation en espace libre. Si l'on connaît l'emplacement du système, d'autres modèles de propagation peuvent également être utilisés afin de gagner en précision.

Le niveau du seuil de brouillage du récepteur, I_{RX} , peut être calculé selon deux méthodes différentes:

Méthode A

Lorsque l'on connaît la valeur maximale du rapport porteuse/brouillage du récepteur d'un système brouillé, on peut considérer que le signal C reçu par les récepteurs de la liaison brouillée est égal à la sensibilité de l'équipement de réception, I_{RX} étant obtenu directement comme suit:

$$I_{RX} = C - C/I_{MAX} \quad (41)$$

où:

I_{RX} : niveau du seuil de brouillage du récepteur (dBm)

C : niveau du signal reçu par les récepteurs, donné par la sensibilité des équipements de réception (dBm)

I_{MAX} : niveau de brouillage maximal au récepteur.

Méthode B

Si l'on ne connaît pas la valeur du rapport C/I_{MAX} , il faut définir une marge minimale requise au récepteur pour pouvoir calculer I_{RX} . Dans ce cas:

$$I_{RX} = 10 \log \left[10^{(D + I_{EQ})/10} - 10^{I_{EQ}/10} \right] \quad (42)$$

$$D = D_M - D_S \quad (43)$$

$$D_M = M_C - M_M \quad (44)$$

où:

I_{RX} : niveau du seuil de brouillage du récepteur (dBm)

I_{EQ} : niveau de brouillage de référence, calculé à partir du rapport C/I_{MAX} du récepteur brouillé; C est donc égal à la sensibilité du récepteur (dBm)

D : dégradation maximum qui peut être produite par l'émetteur considéré (dB)

D_M : dégradation maximum autorisée par le récepteur (dB)

D_S : dégradation estimée présente dans le récepteur (dB)

M_M : marge minimum autorisée (dB)

M_C : marge calculée pour le système (dB).

NOTE 1 – Dans le cas d'un système général, pour lequel il n'est pas possible de définir précisément la marge requise, la valeur de M_C est la marge souhaitée pour le système.

NOTE 2 – On doit déterminer la dégradation estimée D_S en calculant le brouillage cumulatif produit par d'autres émetteurs situés à proximité du récepteur considéré.

NOTE 3 – Si l'on ne dispose pas des informations requises sur les autres systèmes brouilleurs, on adoptera une valeur de 3 dB pour la dégradation.

2.6.4 Calcul de l'efficacité SUE pour des systèmes point à point

Le présent exemple porte sur l'analyse d'un système point à point basée sur l'hypothèse selon laquelle la zone refusée par l'émetteur comprend la totalité de la zone refusée par le récepteur. Lorsque ce n'est pas le cas, la partie de la zone du récepteur située à l'extérieur de la zone de l'émetteur doit être ajoutée à la zone de l'émetteur pour obtenir la zone refusée totale, S . La méthode de calcul de la zone refusée est la même pour le récepteur et l'émetteur.

Le Tableau 13 expose les caractéristiques d'un système numérique, qui serviront d'exemple pour le calcul de l'efficacité d'utilisation du spectre pour des systèmes point à point. L'effet utile peut également être calculé à partir de ces éléments.

TABLEAU 13

Débit de transmission et facteur de surdébit

| Bande de fréquences (GHz) | Débit de transmission total (Mbit/s) | O_F du système |
|----------------------------------|---|------------------------------------|
| 8,5 | 17 (8E1) | 0,9035 |

L'effet utile pour le système pris en exemple est le débit de transmission effectif, qui correspond au débit de transmission total multiplié par le facteur de surdébit (équations (32) et (33)). Le Tableau 14 indique la valeur calculée du débit de transmission effectif, M .

TABLEAU 14

Débit de transmission effectif, M

| Débit de transmission effectif (Mbit/s) |
|--|
| 15,36 |

Le Tableau 15 indique la valeur du trajet type, D pour des liaisons fonctionnant dans la bande de fréquences donnée.

TABLEAU 15

Distance sur laquelle l'information est transmise

| Distance (km) |
|----------------------|
| 20,1 |

Le Tableau 16 indique la largeur de bande refusée par le système.

TABLEAU 16

Largeur de bande

| Largeur de bande (MHz) |
|-------------------------------|
| 7 |

Dans cet exemple de calcul, on part du principe que le système est toujours actif. Ainsi, le paramètre, T correspondant à la durée de l'équation (34) a une valeur de 1.

Les Tableaux ci-après indiquent les valeurs calculées nécessaires pour déterminer l'espace géométrique refusé par l'émetteur ou le récepteur de systèmes point à point. Pour des questions d'organisation, la procédure est présentée sous forme de séquence.

a) Angle des secteurs, θ

Selon les bandes de fréquences, on utilise des antennes ayant des caractéristiques spécifiques. Ainsi, le paramètre θ aura une valeur différente pour chaque bande. Le Tableau 17 indique l'angle et le nombre de secteurs choisis pour le système donné en exemple.

TABLEAU 17
Angle des secteurs, θ

| Angle des secteurs (degrés) ⁽¹⁾ | Nombre de secteurs adopté ⁽²⁾ |
|--|--|
| 10 | 3 |

⁽¹⁾ Correspond approximativement à l'ouverture à mi-puissance du faisceau pour l'enveloppe du diagramme de rayonnement de l'antenne considérée.

⁽²⁾ Nombre de secteurs considérés.

b) Rayon des secteurs, R

Le Tableau 18 indique des valeurs des paramètres qui peuvent être obtenues directement à partir des spécifications du système sans que d'autres calculs soient nécessaires.

TABLEAU 18
Fréquence centrale et paramètres du système

| P_{TX} (dBm) | L_{CTX} (dB) | L_{CRX} (dB) | G_{RX} (dBi) | $f^{(1)}$ (GHz) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 24,5 | 4,4 | 4,2 | 36,7 | 8,45 |

⁽¹⁾ Fréquence centrale dans la partie supérieure de la bande.

c) Gain d'antenne de l'émetteur, G_{TX}

Le paramètre G_{TX} est le gain d'antenne de l'émetteur le long de l'axe d'un secteur donné. Le Tableau 19 indique les valeurs calculées de G_{TX} pour chaque secteur, θ défini dans le Tableau 17.

TABLEAU 19
Gain d'antenne de l'émetteur pour chaque secteur*

| Secteur d'angle θ_1 | Secteur d'angle $\theta_2^{(1)}$ | Secteur d'angle θ_3 |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| G_{TX1} | G_{TX2} | G_{TX3} |
| 14,7 | 36,7 | 14,7 |

* Obtenu à partir de l'enveloppe du diagramme de rayonnement de l'antenne.

⁽¹⁾ On fait coïncider l'axe du secteur θ_2 avec celui du lobe principal de l'antenne. θ_1 et θ_3 sont adjacents à θ_2 .

Selon les équations (38) et (39), chaque valeur de G_{TX} correspondra à une valeur de R étant donné que seul le gain d'antenne de l'émetteur variera pour chaque secteur choisi.

d) Seuil de brouillage du récepteur, (I_{RX})

Deux méthodes permettant de calculer le seuil de brouillage du récepteur ont été proposées: calculer directement le seuil à partir du rapport C/I_{MAX} ou calculer le seuil à partir de la marge minimum requise au récepteur. Etant donné qu'elle nécessite un plus grand nombre d'étapes, la seconde méthode sera utilisée pour illustrer les calculs.

Le Tableau 20 donne des valeurs types pour C/I_{MAX} et I_{EQ} , calculées sur la base des spécifications des équipements. Ces valeurs sont utilisées dans l'équation (42).

TABLEAU 20
Valeurs de C/I_{MAX} et I_{EQ}

| C/I_{MAX} (dB) | I_{EQ} du système ⁽¹⁾ (dBm) |
|---------------------|---|
| 17,0 | -105,0 |

⁽¹⁾ Hypothèse de travail: C est égal au seuil de brouillage du récepteur.

e) Dégradation maximale, D

Le Tableau 21 regroupe les paramètres D_M , D_S , M_C et M_M pour le système utilisé en exemple et la valeur calculée pour D (équations (43) et (44)), qui est le dernier paramètre à utiliser dans l'équation (42).

TABLEAU 21
Paramètres de dégradation

| Marge calculée ou souhaitée, M_C (dB) | Marge minimale, M_M (dB) | Dégradation maximale, D_M (dB) | Dégradation estimée, D_S ⁽¹⁾ (dB) | Dégradation maximale produite, D (dB) |
|--|-------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 35,8 | 30,1 | 5,7 | 3,0 | 2,7 |

⁽¹⁾ La dégradation estimée D_S devrait être une valeur obtenue en concentrant les systèmes brouilleurs à proximité du système considéré. Lorsque l'on ne dispose pas d'une telle information, on prend pour valeur $D_S = 3$ dB.

L'utilisation de la valeur D dans l'équation (42) permet d'obtenir la valeur de I_{RX} pour le système.

On a choisi arbitrairement une valeur de -2 pour le rapport h/F_1 figurant dans l'équation (40) pour déterminer l'affaiblissement de diffraction additionnel, A_D , qui est nécessaire pour calculer l'affaiblissement total. Cette valeur a été établie compte tenu de la courbure de la Terre et de la production d'un affaiblissement de diffraction additionnel compatible avec les observations pratiques. On peut vérifier cette assertion en observant les rayons de secteur obtenu (Tableau 22) qui concordent avec les valeurs limite de brouillage utilisées pour ces bandes.

I_{RX} et A_D ayant été déterminés, le rayon, R , peut être calculé avec l'équation (38).

A ce stade, il est possible de calculer l'aire du secteur refusé. Les Tableaux 22 et 23 indiquent les valeurs de paramètres requises.

TABLEAU 22
Paramètres de brouillage et rayons des secteurs

| I_{RX} (dBm) | Ouverture du faisceau θ_1 | | Ouverture du faisceau θ_2 | | Ouverture du faisceau θ_3 | |
|-------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| | A_1 (dBm) | R_1 (km) | A_2 (dBm) | R_2 (km) | A_3 (dBm) | R_3 (km) |
| -105,6 | 12,0 | 4,0 | 34,0 | 49,9 | 12,0 | 4,0 |

TABLEAU 23
Zones de secteur et espace géométrique refusé

| Ouverture du faisceau θ_1 | Ouverture du faisceau θ_2 | Ouverture du faisceau θ_3 | Espace géométrique refusé, S (km ²) |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| A_{S1} (km ²) | A_{S2} (km ²) | A_{S3} (km ²) | |
| 1,4 | 217,6 | 1,4 | 220,3 |

La somme des zones refusées pour chaque secteur donnera l'espace géométrique refusé, S , qui est le dernier paramètre requis pour déterminer l'efficacité SUE. Le Tableau 24 indique le résultat final pour cet exemple.

TABLEAU 24
Efficacité SUE pour un système point à point

| |
|-------------------|
| SUE (Mb/s.km.MHz) |
| 0,2 |

3 Utilisation du spectre par des systèmes de radiodiffusion télévisuelle ou sonore

3.1 Introduction

Considérons un système de radiodiffusion télévisuelle ou sonore situé dans une zone géographique donnée avec un nombre J d'émetteurs. Dans le cas général, l'efficacité d'utilisation du spectre est donnée par l'expression complexe suivante:

$$SUE = \{M, U\} \tag{45}$$

où:

- M : effet utile obtenu avec le système de radiodiffusion considéré; et
- U : facteur d'utilisation du spectre pour ce système.

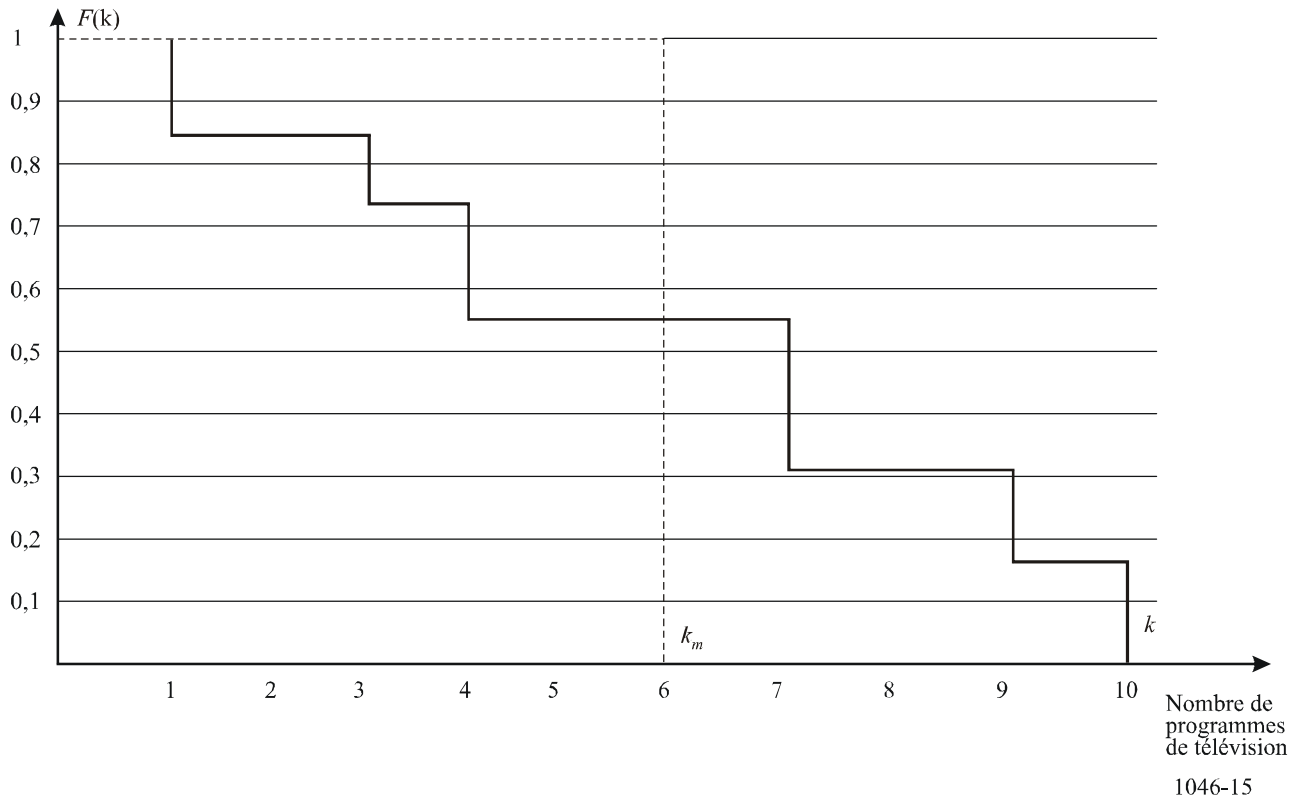
3.2 Définition de l'effet utile pour un système de radiodiffusion télévisuelle

L'utilité d'une émission de radiodiffusion télévisuelle est déterminée par le nombre d'utilisateurs (population) en mesure de recevoir cette émission, en général depuis leur lieu de résidence.

L'effet utile d'un système de radiodiffusion télévisuelle varie en fonction de la densité de population dans les différents endroits de la zone géographique considérée et en fonction du nombre de programmes de télévision qui peuvent être reçus. Il est possible de représenter la disponibilité des

programmes de télévision dans la population considérée à l'aide de la fonction de distribution cumulative représentée par la Fig. 15.

FIGURE 15



1046-15

Dans ce graphique, $F(k)$ est la proportion d'utilisateurs en mesure de recevoir au moins k programmes de télévision. Plus la valeur de la fonction est élevée plus le nombre d'utilisateurs disposant d'un grand nombre de programmes est élevé et, par conséquent, plus l'effet utile du système de radiodiffusion télévisuelle dans cette zone géographique est important. La fonction $F(k)$ donne une représentation assez complète de l'effet utile et illustre sa structure. Toutefois, d'un point de vue pratique, l'utilisation de cette fonction n'est pas particulièrement adaptée à l'évaluation de l'efficacité d'utilisation du spectre par des systèmes de radiodiffusion télévisuelle. Il est plus commode d'utiliser un indicateur unidimensionnel fonctionnellement dépendant de $F(k)$. Sachant que l'effet utile augmente avec $F(k)$, il est possible d'obtenir un indicateur simple en calculant la superficie située sous la courbe, ou la base d'un rectangle équivalent ayant la même superficie (en pointillé dans la Fig. 15), k_m . Ce dernier correspond au nombre moyen de programmes de télévision qui peuvent être reçus par un utilisateur. Ce nombre peut servir d'indicateur simple de l'effet utile produit par des systèmes de radiodiffusion télévisuelle. L'équation permettant d'obtenir cet indicateur d'effet utile prend la forme analytique suivante:

$$M = k_m = \sum_{i=1}^I \alpha_i k_i \quad (46)$$

où:

I : nombre d'éléments constituant la zone géographique

$\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: proportion de la population qui vit à l'intérieur du i ème élément de zone

n_i : nombre d'habitants vivant à l'intérieur du i ème élément de zone

- k_i : nombre de programmes de télévision qui peuvent être reçus dans le i ème élément de zone; et
- N : taille de la population dans la zone géographique.

Exemple de calcul de l'effet utile

Considérons une région avec une population $N = 250\ 000$ et un nombre d'éléments de zones séparées $I = 9$. La répartition de la population et la disponibilité des programmes de télévision par élément de zone (respectivement n_i et k_i) sont indiqués dans le Tableau 25.

TABLEAU 25
Répartition de la population et disponibilité des programmes de télévision par élément de zone

| | | | | | | | | | |
|---------------------|----|----|----|---|-----|----|----|----|---|
| Elément de zone | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| n_i , en milliers | 20 | 10 | 60 | 0 | 100 | 10 | 40 | 10 | 0 |
| k_i (option 1) | 4 | 2 | 8 | 1 | 10 | 2 | 6 | 4 | 1 |
| k_i (option 2) | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 8 | 10 | 6 | 2 |

Dans le cas de la première option présentée dans le Tableau, l'effet utile peut être calculé à partir de ces données avec l'équation (46), ce qui donne:

$$M = \frac{20 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 8}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{40 \cdot 6}{250} + \frac{10 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} = 7,52 \text{ (programmes)}$$

Si la répartition des bandes se fait selon la seconde option, qui ne tient pas complètement compte de la répartition de la population, alors l'effet utile est calculé comme suit:

$$M = \frac{20 \cdot 1}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 8}{250} + \frac{40 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 6}{250} + \frac{0 \cdot 2}{250} = 4,88 \text{ (programmes)}$$

Cet exemple montre que l'indicateur proposé pour l'effet utile est un instrument de mesure sensible pour ce qui est des stratégies de mise en place des systèmes de radiodiffusion télévisuelle dans la zone géographique considérée.

3.3 Définition du facteur d'utilisation du spectre pour des systèmes de radiodiffusion télévisuelle

On détermine ce facteur en étudiant les restrictions imposées par les stations de télévision existantes pour ce qui est de l'utilisation du spectre par de nouvelles stations. Dans le cas d'une station de télévision située au centre de l'élément de zone i , ces restrictions peuvent être le nombre total, K_i , de canaux de télévision refusés dans cet élément de zone pour des raisons de compatibilité électromagnétique avec des stations de télévision existantes. Elles peuvent également dépendre du rapport: $U_i = \frac{K_i}{K}$, où K est le nombre total de canaux de télévision. On estime que les conditions de compatibilité électromagnétique ne sont pas respectées dans un canal de télévision donné lorsque les brouillages préjudiciables causés par un ou plusieurs émetteurs de télévision existants empêchent le fonctionnement normal des récepteurs associés au nouvel émetteur de télévision, ou si

le nouvel émetteur de télévision, lorsqu'il émet des signaux à la fréquence de ce canal, cause des brouillages inacceptables aux récepteurs en communication avec les émetteurs de télévision existants, y compris ceux qui fonctionnent dans d'autres canaux de télévision. Les brouillages doivent être considérés dans les mêmes canaux et dans les canaux adjacents, hétérodynes et conjugués.

Etant donné que les restrictions dépendent de la position théorique du nouvel émetteur de télévision, on obtient plusieurs résultats, qu'il est possible de simplifier en prenant les restrictions obtenues pour différents emplacements sur le territoire considéré et en effectuant un calcul adapté. La meilleure solution consiste à calculer la moyenne pondérée des restrictions à tous les emplacements théoriques du nouvel émetteur, en prenant pour facteur de pondération la proportion de la population vivant à proximité de chaque emplacement. Il est donc ainsi possible, d'une part, de reconnaître que la quantité de spectre attribuée à des systèmes de télévision augmente avec la densité de population locale et, d'autre part, d'harmoniser les deux indicateurs M et U utilisés pour évaluer l'utilisation du spectre. Le facteur d'utilisation du spectre peut donc être calculé avec l'équation suivante:

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i \quad (47)$$

où

$U_i = \frac{K_i}{K}$: proportion de bandes refusée au nouvel émetteur de télévision supposé au centre du i ème élément de zone.

3.4 Calcul de l'efficacité SUE pour des systèmes de radiodiffusion télévisuelle

Pour évaluer l'efficacité d'utilisation du spectre par des systèmes de radiodiffusion télévisuelle, il est recommandé de procéder comme suit:

- Diviser la zone géographique en élément de 3 à 5 km².
- Calculer la proportion α_i de la population totale vivant dans le i ème élément de zone.
- Déterminer le rayon R_s des zones de service des émetteurs des systèmes de télévision existants d'après leurs caractéristiques techniques.
- Calculer la distance R_{ij} entre le centre de chaque élément de zone i et les émetteurs des systèmes existants.
- Pour chaque élément de zone, déterminer le nombre d'émetteurs de télévision existants dans la zone de service desquels le système est situé en comparant R_s et R_{ij} .
- Généraliser les résultats obtenus pour les éléments de zone et calculer l'effet utile à l'aide de l'équation (46).
- Faire une simulation du fonctionnement d'un émetteur du nouveau système au centre de l'élément de zone et calculer le rapport signal/bruit à l'entrée des récepteurs en communication avec les émetteurs de télévision (existants et nouveaux).
- Déterminer les bandes de fréquences dans lesquelles la compatibilité électromagnétique n'est pas assurée entre, d'une part, le nouvel émetteur de télévision et les récepteurs avec lesquels il communique et, d'autre part, les émetteurs de télévision existants et les récepteurs qu'ils desservent.
- Généraliser les résultats obtenus pour les éléments de zone et calculer le facteur d'utilisation du spectre avec l'équation (47).

Les résultats de l'évaluation peuvent être présentés sous la forme d'une carte géographique indiquant les valeurs de l'effet utile et du facteur d'utilisation du spectre dans la zone considérée (voir la Fig. 16) ou sous la forme de la valeur moyenne pour l'ensemble de la zone.

3.5 Observations concernant l'évaluation de l'efficacité SUE pour des systèmes de radiodiffusion sonore

A de nombreux égards, les systèmes de radiodiffusion sonore et les systèmes de radiodiffusion télévisuelle utilisent le spectre de la même manière. Certaines différences sont dues au fait qu'un nombre considérable d'utilisateurs relativement actifs de systèmes de radiodiffusion sonore sont des particuliers, propriétaires ou passagers d'automobile. Il serait donc judicieux, lorsque l'on calcule l'effet utile et le facteur d'utilisation du spectre, de tenir compte du fait qu'une grande proportion des utilisateurs de services de radiodiffusion se trouvent le long des grandes routes et des autoroutes.

Comme dans le cas des systèmes de télévision, il est proposé de calculer l'effet utile comme le nombre moyen k_m de programmes de radiodiffusion sonore qu'un utilisateur est en mesure de recevoir dans une région donnée. De même, le facteur d'utilisation du spectre doit être calculé comme la moyenne pondérée du nombre estimé de bandes refusées, pour un nouveau système de radiodiffusion sonore donné, pour non-respect des conditions de compatibilité électromagnétique appliquées aux systèmes existants.

L'évaluation du facteur d'utilisation du spectre pour un système de radiodiffusion sonore est soumis aux conditions particulières suivantes:

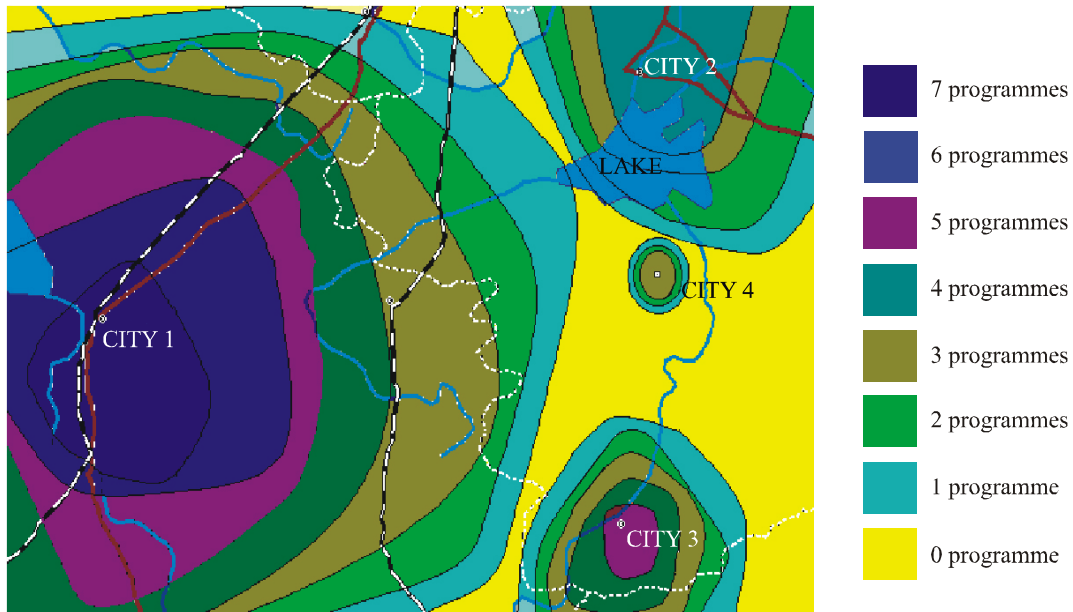
- Les éléments de zone contenant les principales routes correspondent à des zones urbaines (du fait de la présence d'usagers des services de radiodiffusion sonore) et les facteurs α_i correspondants sont déterminés en conséquence.
- Dans le calcul du facteur d'utilisation du spectre, il est tenu compte de combinaisons de bandes incompatibles qui sont typiques des systèmes de radiodiffusion sonore. Ainsi, le fait que des systèmes de radiodiffusion sonores peuvent fonctionner dans une bande de fréquences commune sans brouillages dans les canaux hétérodynes et conjugués doit être pris en compte.

FIGURE 16

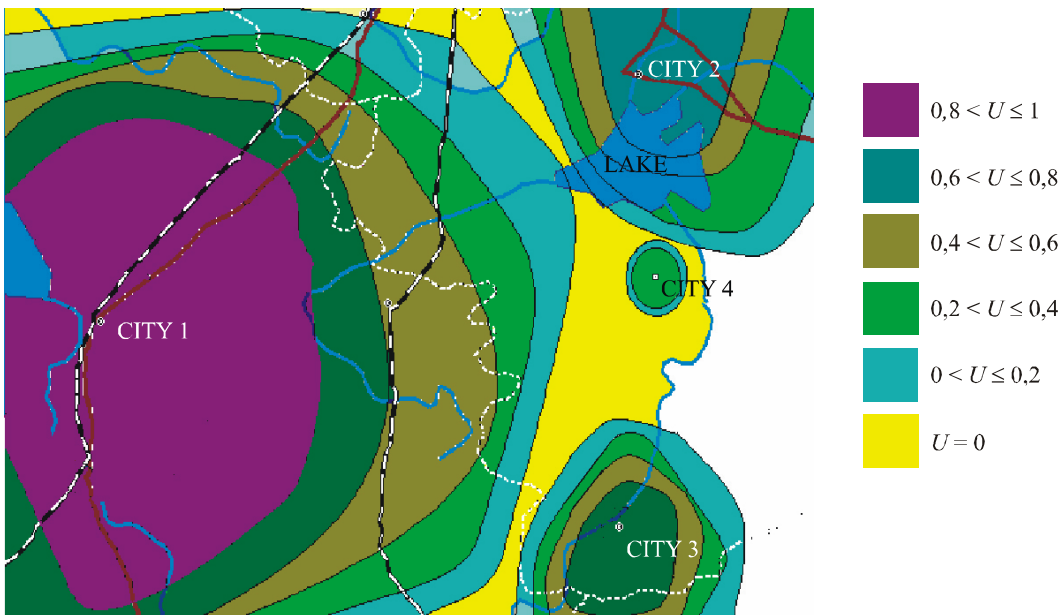
Evaluation de l'efficacité d'utilisation du spectre

Représentations cartographiques

Effet utile, M



Facteur d'utilisation du spectre, U



Indicateur moyen: SUE = ($M = 3,2$ programmes, $U = 0,4$)