

RECOMMANDATION UIT-R SM.1046-1

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

(Question UIT-R 47/1)

(1994-1997)

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 poser comme principe de base que la mesure de l'efficacité SUE est le rapport volume d'informations transmises sur une distance donnée (ou la communication réalisée) à facteur d'utilisation du spectre (voir l'Annexe 1). Des exemples d'application de ce principe sont donnés dans l'Annexe 2;
- 3** d'utiliser le principe de base d'efficacité relative d'utilisation du spectre (RSE – relative spectrum efficiency) exposé dans l'Annexe 1, pour les comparaisons d'efficacité SUE entre systèmes radioélectriques;
- 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 6 du Manuel sur la gestion nationale du spectre (Genève, 1995) 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 comme suit:

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

où:

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

3 Efficacité relative d'utilisation du spectre (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 6 du Manuel sur la gestion nationale du spectre (Genève, 1995) 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.

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:

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

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

1.1.2 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.

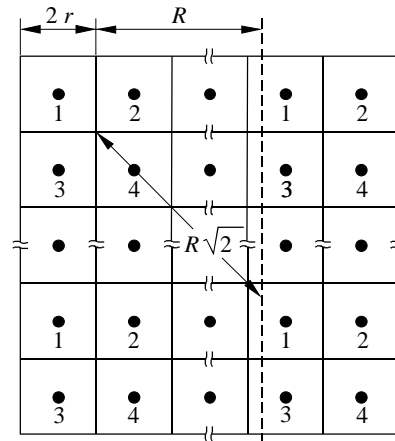
Le réseau pris pour modèle se compose de carrés d'égales dimensions, la station centrale (de base) étant située au centre du carré (voir la Fig. 1). On considère que le rayon, r , de la zone de service est donné. Dans les carrés portant le même numéro, (voir la Fig. 1) on peut utiliser le même ensemble 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;

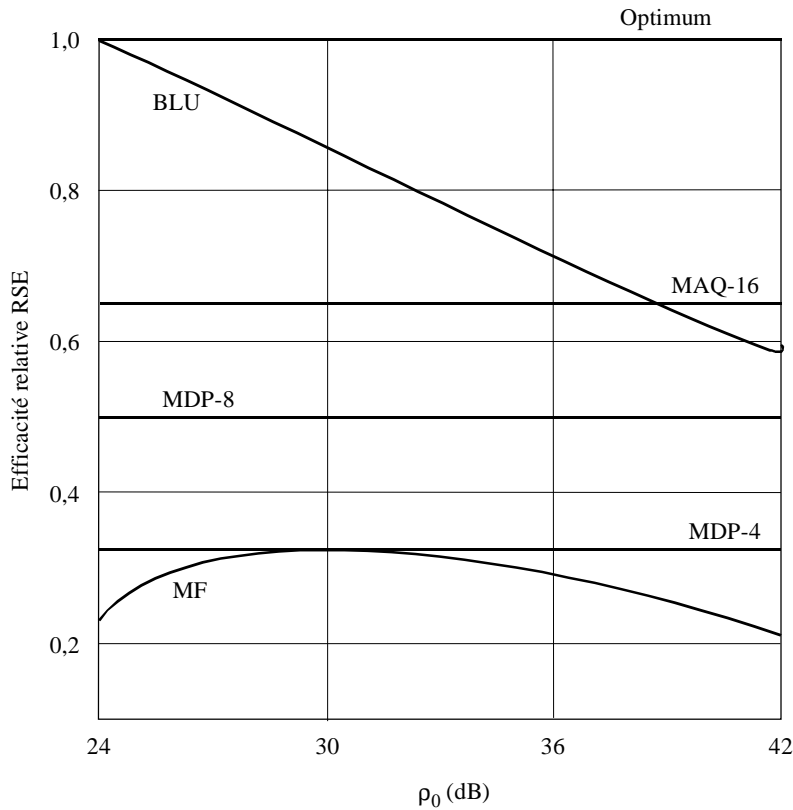
S : zone considérée;

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:

$$Occ = \sum_0^m F_n \tag{11}$$

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 .

$$\text{Indice par cellule} = \frac{F_n}{B \cdot a} \tag{12}$$

$$\text{Indice moyen} = \frac{Occ}{B \cdot S} \tag{13}$$

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:

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

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)

$E/kHz/km^2 \times 10^{-3}$	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 $1,7 \times 10^{-3} E/kHz/km^2$. 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 $4,9 \times 10^{-3} E/kHz/km^2$. 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)

Vancouver: 138-174 MHz – Sur la base des canaux disponibles

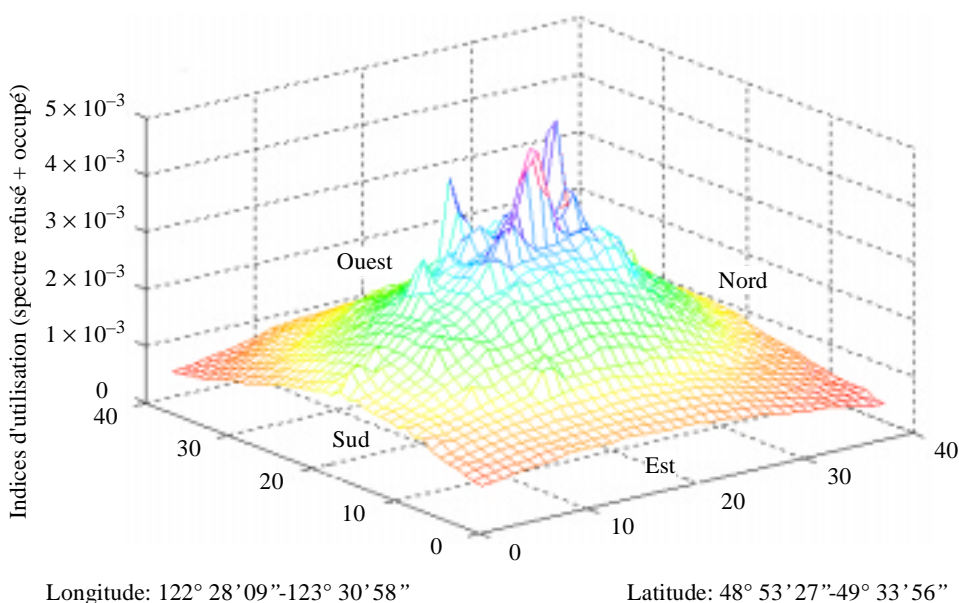
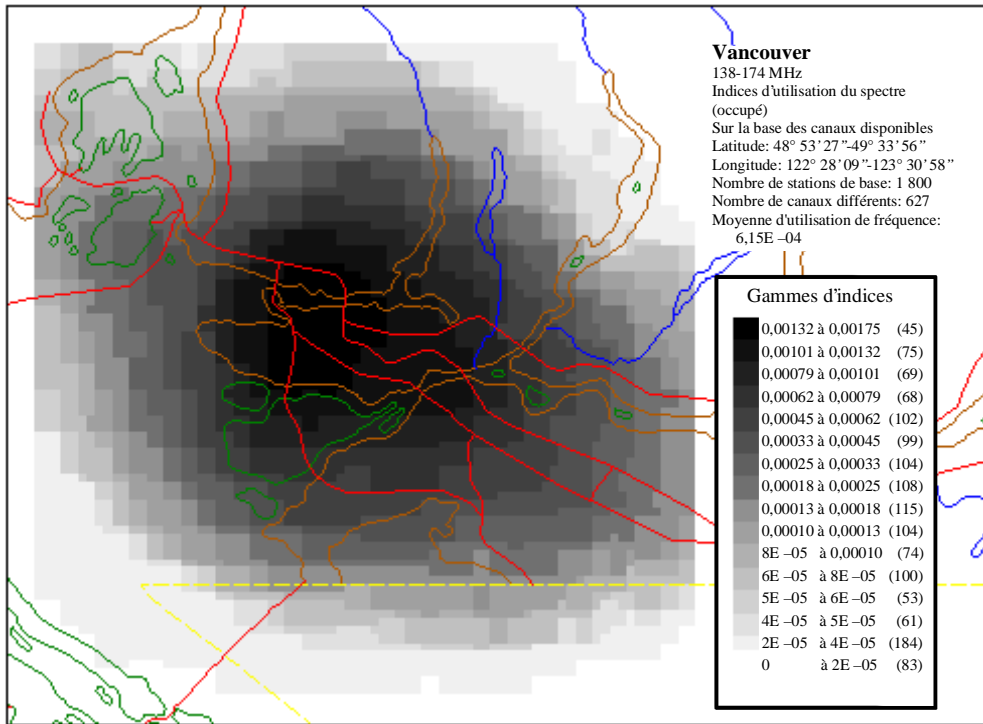


FIGURE 4

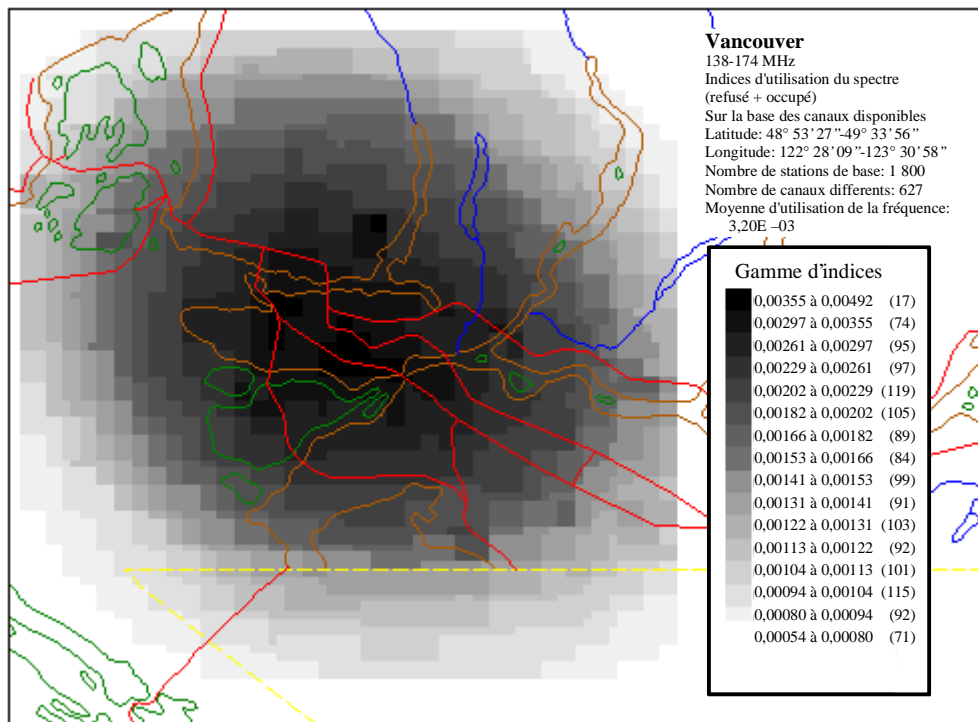
Représentation en 2 dimensions de l'indice de spectre occupé (Vancouver)



1046-04

FIGURE 5

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



1046-05

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:

$$SUE = \frac{C}{B \cdot S_{\alpha}} \quad (15)$$

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:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (16)$$

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.

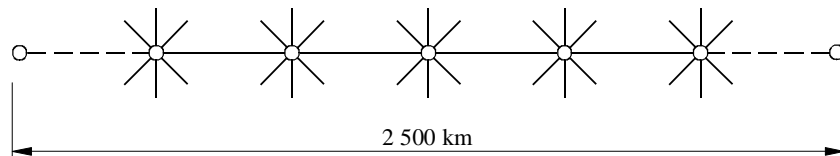
Cette formule tient compte de la mesure géométrique N (N dépend de l'angle admissible entre les circuits dérivés).

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

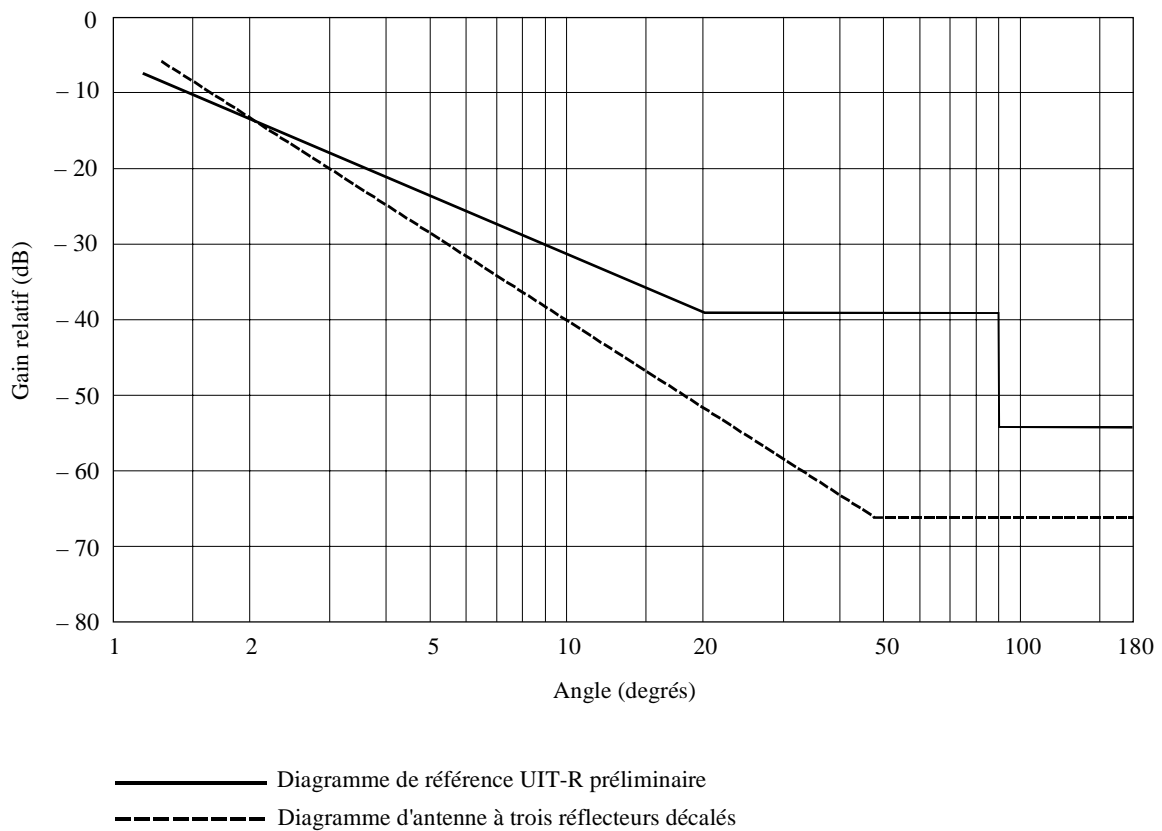
- le rapport porteuse/bruit, C/N , requis est exprimé par:

$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11,8 \quad \text{dB} \quad (17)$$

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

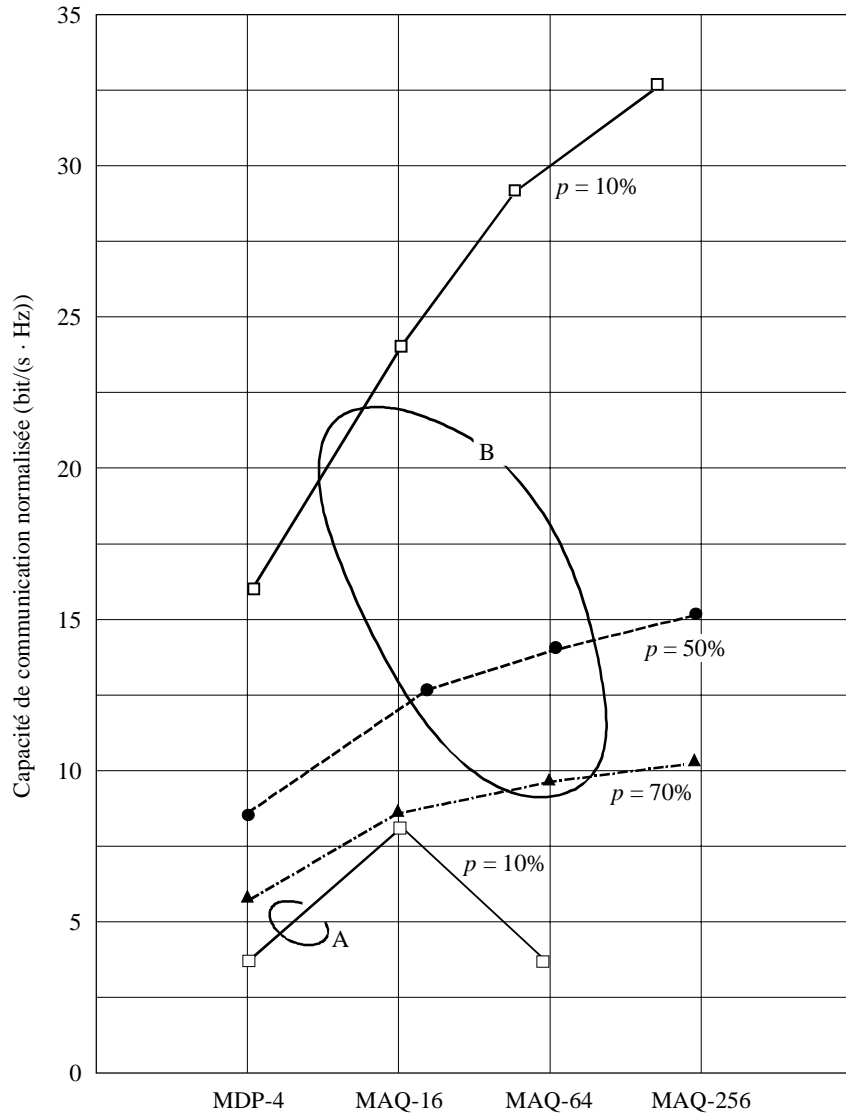
Les capacités de communication normalisées pour ces deux types d'antennes ont été calculées et sont représentées sur la Fig. 8. Les performances de l'antenne circulaire données dans la Recommandation UIT-R F.699 sont insuffisantes pour estimer l'efficacité de l'emploi du spectre radioélectrique par les 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.

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 8
Capacité de communication normalisée

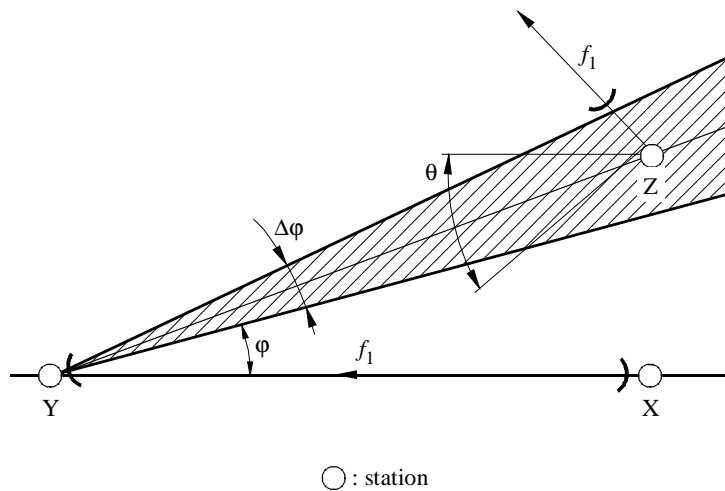


Type de modulation

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

FIGURE 9
Disposition arbitraire des stations



1046-09

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:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p}}{p} \frac{A}{B_c} \quad (18)$$

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: $\times 2$ Tolérance de fréquence: 20 kHz		236 kHz	24	0,1
Transmission numérique	MDP-2	10^{-6}	(C/N)	(Dégradation)	16,2 dB	Fréquence d'horloge	Coefficient du filtre	2 MHz	24	0,012
			10,7 dB	5,5 dB		1 544 kHz	$\times 1,3$			
	MDP-4	10^{-6}	13,7 dB	5,5 dB	19,2 dB	772 kHz	$\times 1,4$	1,1 MHz	24	0,022
	MDP-8	10^{-6}	19,1 dB	5,5 dB	24,6 dB	515 kHz	$\times 1,5$	0,77 MHz	24	0,031
	QPRS	10^{-6}	16,8 dB	5,5 dB	22,3 dB	722 kHz	$\times 1,1$	0,85 MHz	24	0,028
MAQ-16	10^{-6}	21,4 dB	5,5 dB	26,9 dB	386 kHz	$\times 1,6$	0,62 MHz	24	0,039	

⁽¹⁾ Efficacité propre à chaque type de modulation.

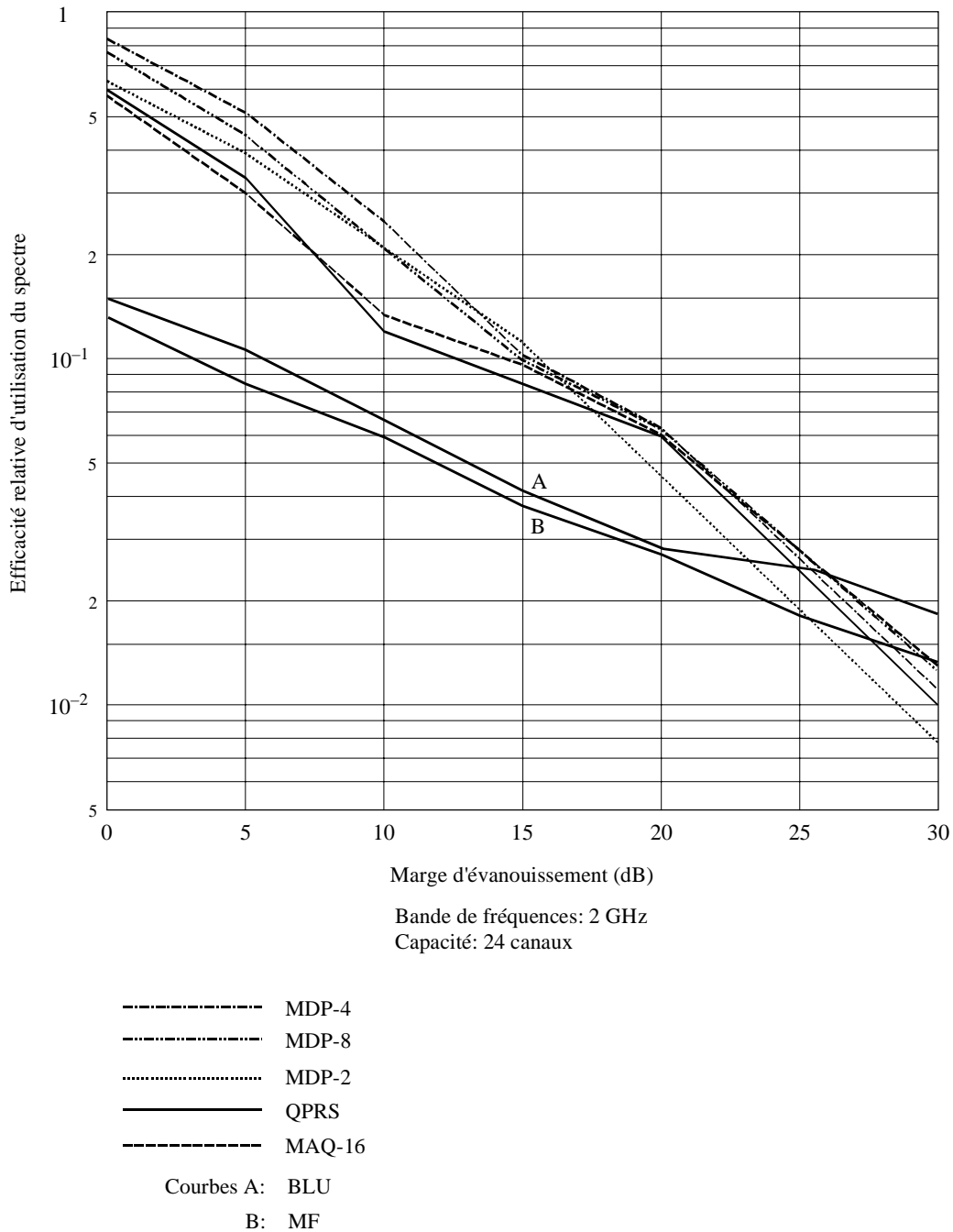
QPRS: système en quadrature avec réponse partielle.

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.

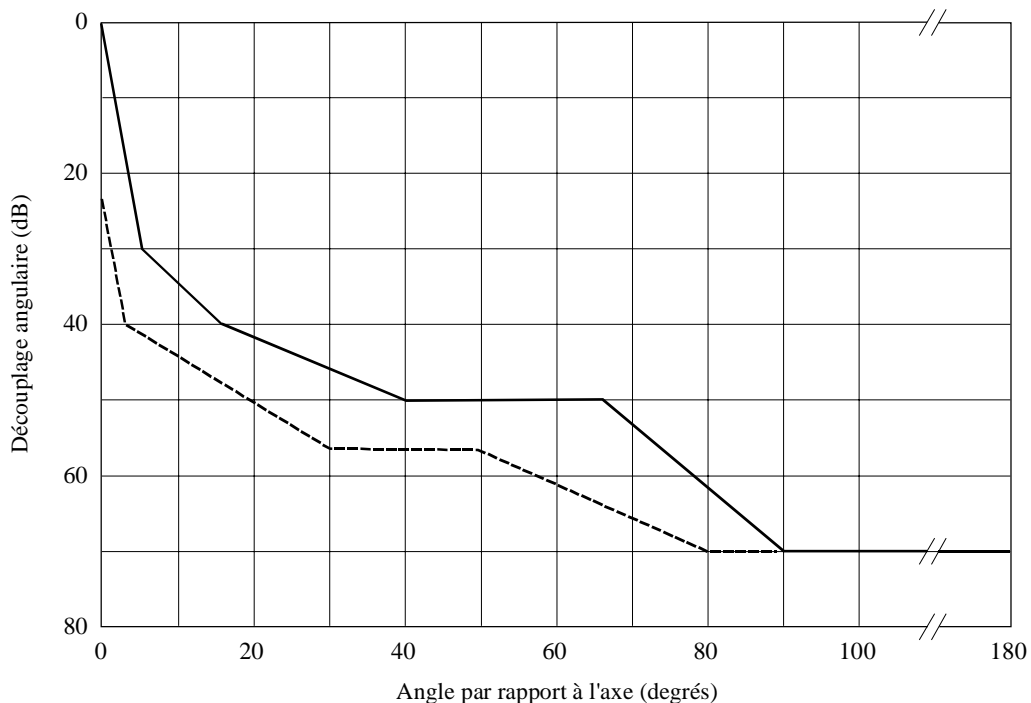
– Filtres de canal: à coupure progressive (0,5) en cosinus carré surélevé.

– 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

On a défini une densité de réseau normalisée, γ :

$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{ensemble de la zone desservie par le réseau}} \quad (19)$$

où:

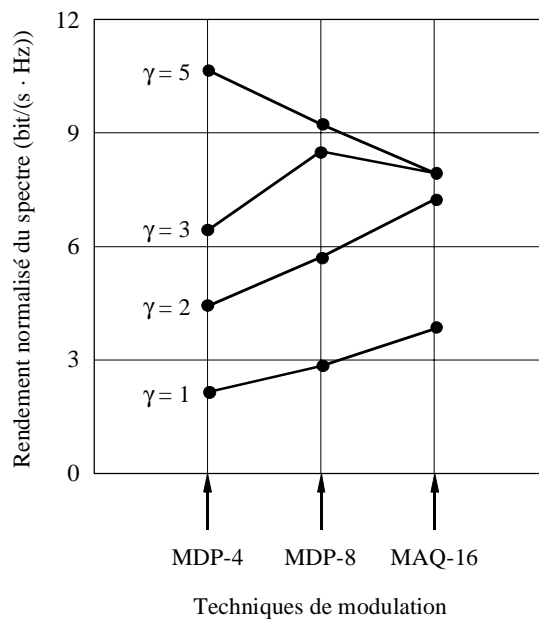
N : nombre de points nodaux radioélectriques dans le réseau

ρ : longueur quadratique moyenne des bonds.

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:

$$SUE = VC / (T \cdot A \cdot B) \quad (20)$$

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 (20) 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:

$$\text{Aire du secteur angulaire} = \pi R^2 \theta / 360 \quad (21)$$

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:

$$L(R) = P_t + G_t(n) + G_r - I_{max} \quad (22)$$

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 (21)).

Pour appliquer la formule (20) 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 (20) 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.

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 13
 Diagrammes de rayonnement type pour les antennes APT, AC et RCC

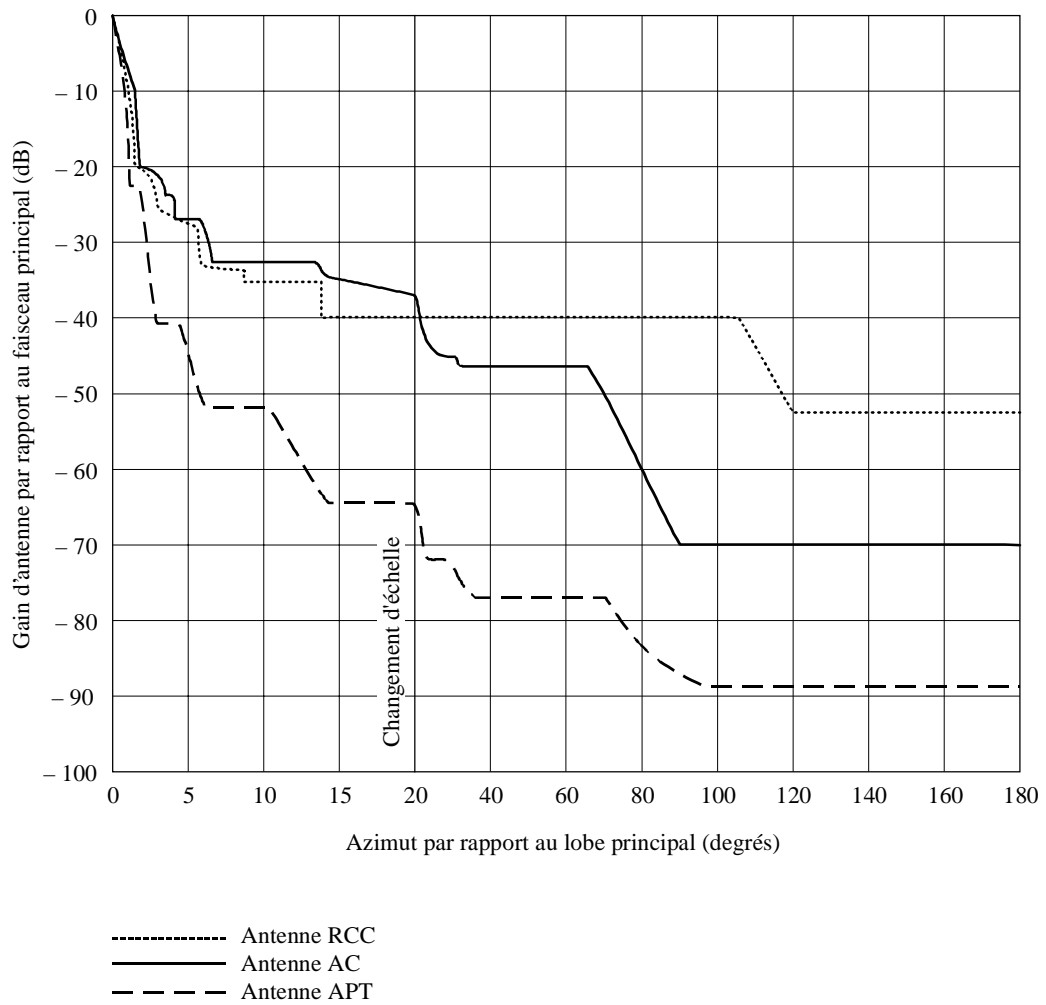
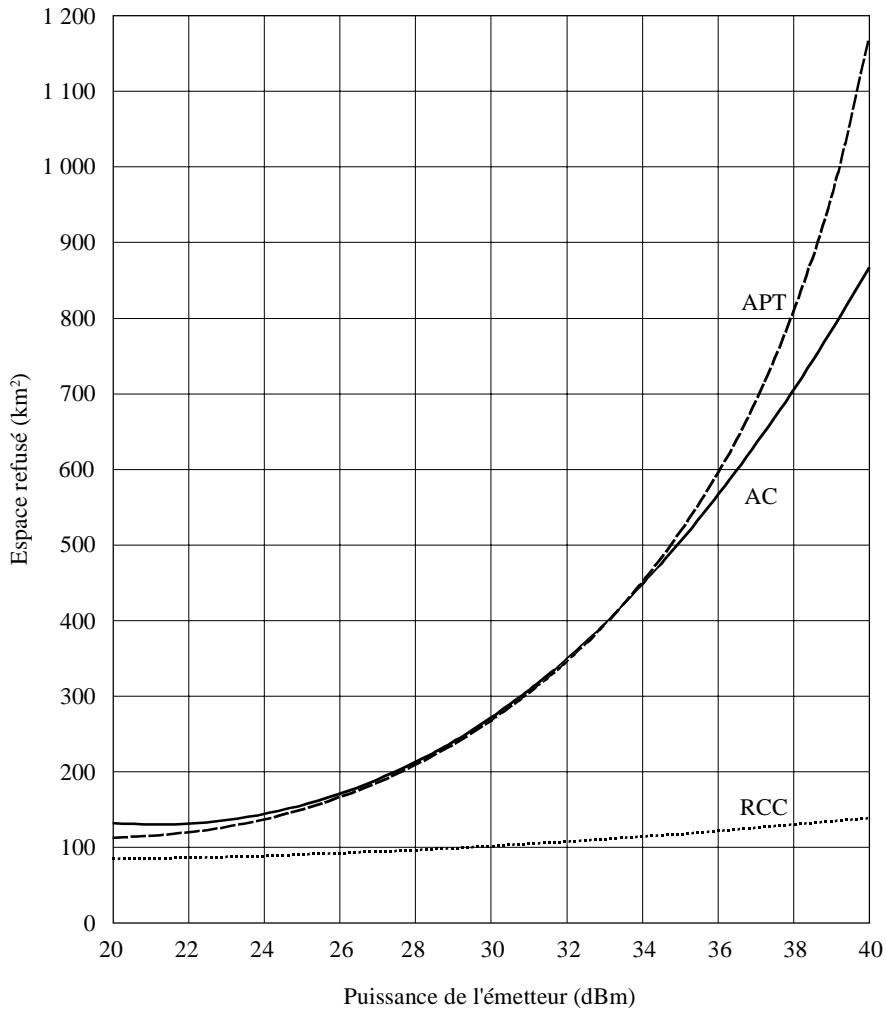


FIGURE 14

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

$$I_{max} = -102,5 \text{ dBm}$$

$$G_t (\text{faisceau principal}) = 43 \text{ dBi}$$

$$G_r = -10 \text{ dBi}$$

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:

$$B \text{ (MHz)} = \text{Débit binaire (Mbit/s)} / \text{rendement de transmission (bit/(s · Hz))} \quad (23)$$

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:

$$C_{min} \text{ (dBm)} = (C/N)_i + N_i \quad (24)$$

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

$$P_t \text{ (dBm)} = C_{min} + G_s \quad (25)$$

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 2 016 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 ($B = 22,5$ MHz), mais le niveau nécessaire P_t 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	2016	2688
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 ($1/\text{taux de codage}$), 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 Egaliseurs 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 remodelent 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).

TABLEAU 12

Efficacité relative RSE de liaisons hertziennes rurales à un seul bond

Modulation	Plan de fréquences	Paramètres de modulation	Efficacité relative RSE			
			$D = 1,5$ m		$D = 3,0$ m	
			1P	2P	1P	2P
MF	$K = 2$		0,27	0,3	0,285	0,285
	$K = 4$		0,2	0,25	0,25	0,25
MIC	$K = 2$	$M = 2$	–	–	0,055	0,049
		$M = 4$	–	–	–	–
		M_{max}	–	–	0,055	0,055
	$K = 4$	$M = 2$	0,125	0,0625	0,0625	0,0625
		$M = 4$	0,125	0,125	0,125	0,125
		M_{max}	0,25	0,25	0,25	0,5