

RECOMMANDATION UIT-R S.1425

**CONSIDÉRATIONS DE TRANSMISSION RELATIVES AUX PORTEUSES
NUMÉRIQUES UTILISANT DES MÉTHODES DE MODULATION
PLUS ÉLABORÉES SUR DES CIRCUITS PAR SATELLITE***

(Questions UIT-R 73/4 et UIT-R 230/4)

(2000)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le spectre des fréquences radioélectriques et l'orbite des satellites géostationnaires sont des ressources limitées;
- b) que certaines bandes de fréquences attribuées au SFS sont encombrées;
- c) qu'en raison de l'évolution rapide de différents services de radiocommunication, les conditions de partage dans de nombreuses bandes de fréquences deviennent de plus en plus difficiles;
- d) qu'il est possible d'améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre par les réseaux à satellite en faisant appel à des méthodes de modulation plus élaborées que la MDPQ, par exemple la MDP-8 et la MAQ-16;
- e) que l'efficacité en termes de puissance des réseaux à satellite peut être améliorée grâce à l'utilisation de techniques de codage appropriées;
- f) qu'il existe en permanence un besoin de mise à jour des informations disponibles sur les caractéristiques et la qualité des transmissions par satellite;
- g) que différentes techniques de transmission peuvent être mises en œuvre afin de transporter le même flux d'informations,

tenant compte du fait

- a) que les circuits par satellite qui émettent en utilisant des techniques de modulation plus élaborées et en particulier la modulation MAQ (la modulation MAQ-16 par exemple), sont plus sensibles aux distorsions linéaires et non linéaires que ceux qui émettent en modulation MDPQ;
- b) que les circuits par satellite qui émettent en utilisant des techniques de modulation plus élaborées (les modulations MDP-8 et MAQ-16 par exemple), sont plus sensibles au bruit de phase que ceux qui émettent en modulation MDPQ;
- c) que l'emploi de techniques de modulation plus élaborées améliore l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande, pour une valeur donnée du rapport E_b/N_0 , au prix d'une puissance d'émetteur accrue ou d'une augmentation du rapport G/T de la station terrienne et d'un accroissement de la p.i.r.e. de la station terrienne,

recommande

- 1** que les informations contenues dans l'Annexe 1 soient utilisées comme lignes directrices pour l'obtention d'une qualité de transmission des circuits par satellite utilisant des méthodes de modulation plus élaborées, par exemple la modulation MDP-8 et MAQ-16.

* La présente Recommandation doit être soumise à l'attention des Groupes de travail 4 SNG et 10-11S des radiocommunications.

Considérations relatives à la transmission dans le cas des porteuses utilisant des méthodes de modulation plus élaborées sur les circuits par satellite

1 Introduction/objet

La présente Annexe fournit des informations concernant la mise au point de nouvelles techniques destinées, mais non réservées aux réseaux du SFS, le but étant d'abord d'accroître la capacité de débit du spectre disponible qui est attribué à ce service. Ce résultat pourrait être obtenu en appliquant des techniques de modulation plus efficaces en matière de transmission de l'information.

2 Généralités

2.1 Objectif

Grâce à la puissance accrue des répéteurs de satellite et aux techniques de correction d'erreur à concaténation, des méthodes de modulation plus élaborées (par exemple la modulation MDP-8 et MAQ-16) sont actuellement applicables aux systèmes de communication à satellites OSG. Ces techniques de modulation améliorent nettement l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande du répéteur conformément aux besoins propres aux structures et aux applications du format large bande, telles que mode de transfert asynchrone (ATM), à relais de trame et TVHD. Pour atteindre un niveau acceptable de qualité de service, caractérisé par un faible taux TEB et des débits de données accrus associés aux techniques de modulation plus élaborées, il est nécessaire non seulement d'obtenir un meilleur rapport C/N à l'entrée du démodulateur, mais aussi de limiter le brouillage et de réduire la distorsion à l'intérieur des circuits de transmission par satellite.

Cette Recommandation décrit les caractéristiques propres des techniques de modulation plus élaborées jugées applicables aux réseaux à satellite géostationnaire et donne une explication détaillée de leur vulnérabilité et de leur sensibilité accrue aux dégradations de la transmission. Elle présente en outre les essais et les résultats concernant des circuits MDP-8 et MAQ-16 visant à déterminer leurs spécifications de fonctionnement dans un réseau à satellite type.

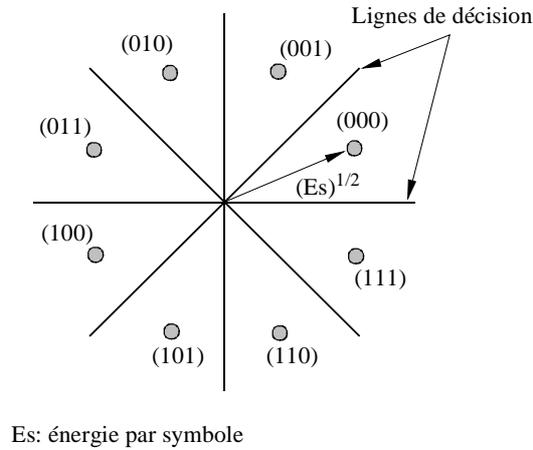
2.2 Techniques de modulation MDP-8 et MAQ-16

Dans le cas d'une modulation MDP-8, le symbole transmis est une porteuse sinusoïdale comportant 8 phases régulièrement espacées. Le diagramme vectoriel de codage est représenté à la Fig. 1.

Chaque symbole modulé MDP-8 correspond à trois occupations de bits de l'utilisateur, contre deux dans le cas de la modulation MDPQ, augmentant ainsi de 50% l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande. Par ailleurs, les symboles sont rapprochés en phase de 45° par comparaison à la modulation MDPQ, ce qui complique le processus de prise de décision au niveau du récepteur. D'après des calculs théoriques, et en l'absence de toute technique de correction d'erreur, la modulation MDP-8 exige 7 dB de plus d'énergie par bit que la modulation MDPQ, pour obtenir un TEB de 1×10^{-8} .

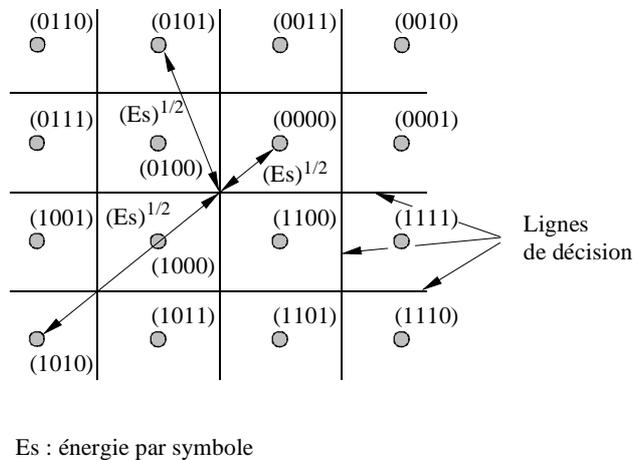
La Fig. 2 est un exemple de diagramme vectoriel de codage relatif à la modulation MAQ 4×4 (MAQ-16). Chaque symbole correspond à 4 bits d'information, le récepteur devant distinguer entre les différentes combinaisons propres au processus de modulation en phase et en amplitude. Comme indiqué à la Fig. 2, le récepteur doit donc distinguer entre les 12 phases et les quatre amplitudes possibles, pour pouvoir prendre une décision. Puisque la séparation entre les états du signal est encore plus réduite que pour la modulation MDP-8, le bruit d'amplitude, et le bruit de phase, influenceront davantage sur le processus de prise de décision. Toutefois, en dépit d'une vulnérabilité à la dégradation des transmissions supérieure à la modulation MDP-8, l'utilisation de la largeur de bande est améliorée de 100% par rapport à la modulation MDPQ.

FIGURE 1
Diagramme vectoriel de codage pour la modulation MDP-8



1425-01

FIGURE 2
Diagramme vectoriel de codage pour la modulation MAQ-16



1425-02

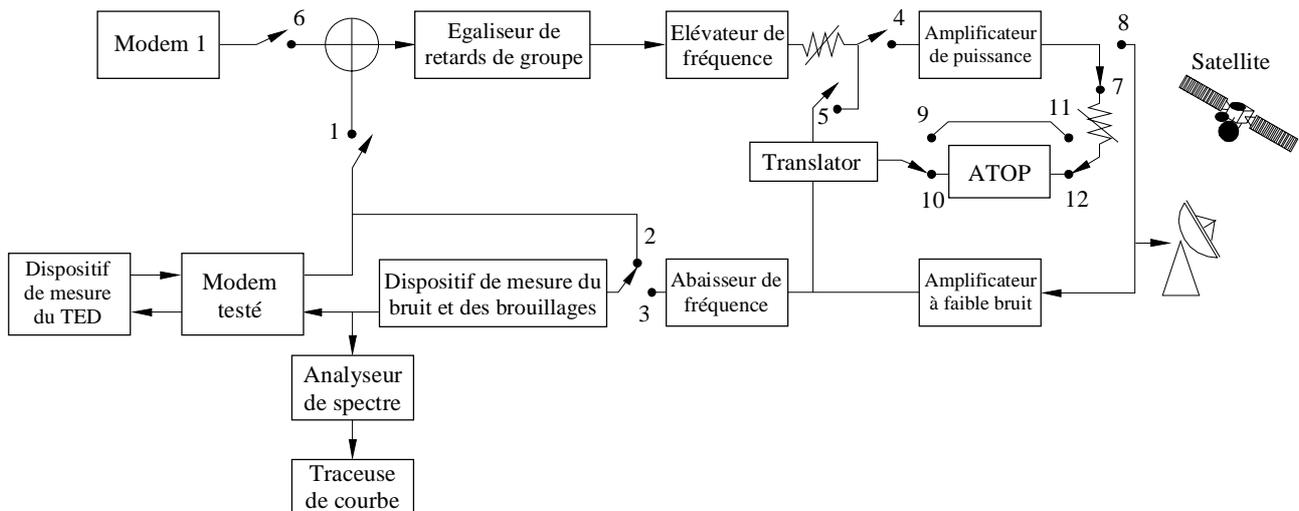
3 Méthodes d'essai et mesures relatives aux transmissions

3.1 Description de l'installation d'essai

Des essais ont été réalisés afin d'étudier les limites en matière de capacité et de circuit nécessaires aux transmissions large bande à modulation MAQ-16 dans un réseau à satellite. A cet effet, une configuration d'essai souple a été mise en œuvre permettant également de déterminer et d'optimiser les points intermédiaires de niveau relatif zéro associés aux éléments de transmission non linéaires du réseau. La Fig. 3 présente un schéma fonctionnel de la configuration d'essai utilisée. Les interrupteurs indiqués sur cette Figure permettent d'obtenir les différentes configurations expérimentales employées.

FIGURE 3

Dispositif expérimental utilisé pour les essais de transmission de données



ATOP: amplificateur à tube à ondes progressives

1425-03

La largeur de bande d'émission de toutes les configurations de réseau a été limitée à celle d'un répéteur 36 MHz. Dans tous les essais, le débit de transmission numérique choisi a été 45 Mbit/s (DS-3). Des largeurs de bande d'environ 26 et 15 MHz ont été déterminées pour les modems de transmission de données MDP-8 et MAQ-16 utilisés dans ces essais. Un fonctionnement multiporteuse dans un répéteur unique a donc été possible dans le cas de la modulation MAQ-16. A tous les débits, tous les modems utilisés lors des essais décrits ici utilisent un taux de CED de 3/4 et un débit de codage externe Reed-Solomon (RS) avec concaténation de 188,204.

Les mesures du CED effectuées au cours de ces essais ont été réalisées sous forme de mesure du rapport E_b/N . Pour les besoins de la présente Annexe, les résultats obtenus ont été convertis en rapport C/N . La formule de transformation suivante a été utilisée:

$$C/N = E_b/N_0 + 10 \log (p \times CED \times RS/1,2)$$

avec:

p = 2 pour la modulation MDPQ

= 3 pour la modulation MDP-8

= 4 pour la modulation MAQ-16

CED : taux de CED (par exemple 3/4)

RS : débit de codage Reed-Solomon (par exemple 188,204)

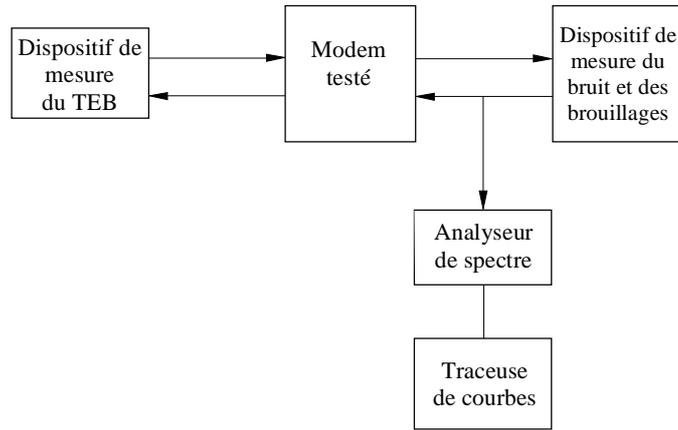
1,2: rapport largeur de bande/débit de symbole.

3.2 Configurations expérimentales et résultats

3.2.1 Essai de référence FI sur boucle avec retour

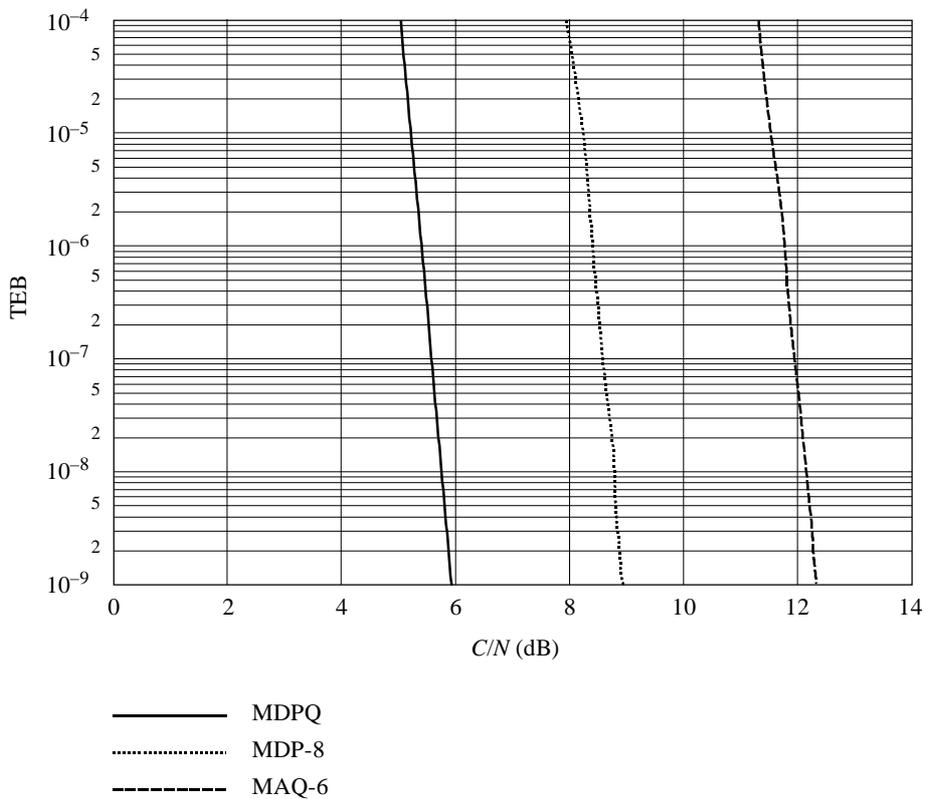
Un premier dispositif expérimental a été réalisé afin de tester les modems dans un montage d'essai FI sur boucle avec retour. Cet essai correspond à la fermeture de l'interrupteur 2 et à l'ouverture de l'interrupteur 1 représentés sur la Fig. 3, c'est-à-dire à la configuration expérimentale représentée à la Fig. 4. L'objectif était d'obtenir une mesure de référence pour les mesures expérimentales RF ultérieures. Les mesures ont été réalisées pour les différentes techniques de modulation considérées (MDPQ, MDP-8 et MAQ-16). La Fig. 5 représente les valeurs du TEB obtenues pour chacune de ces méthodes de modulation.

FIGURE 4
Schéma fonctionnel de l'essai FI sur boucle avec retour



1425-04

FIGURE 5
Résultats de l'essai FI sur boucle avec retour



1425-05

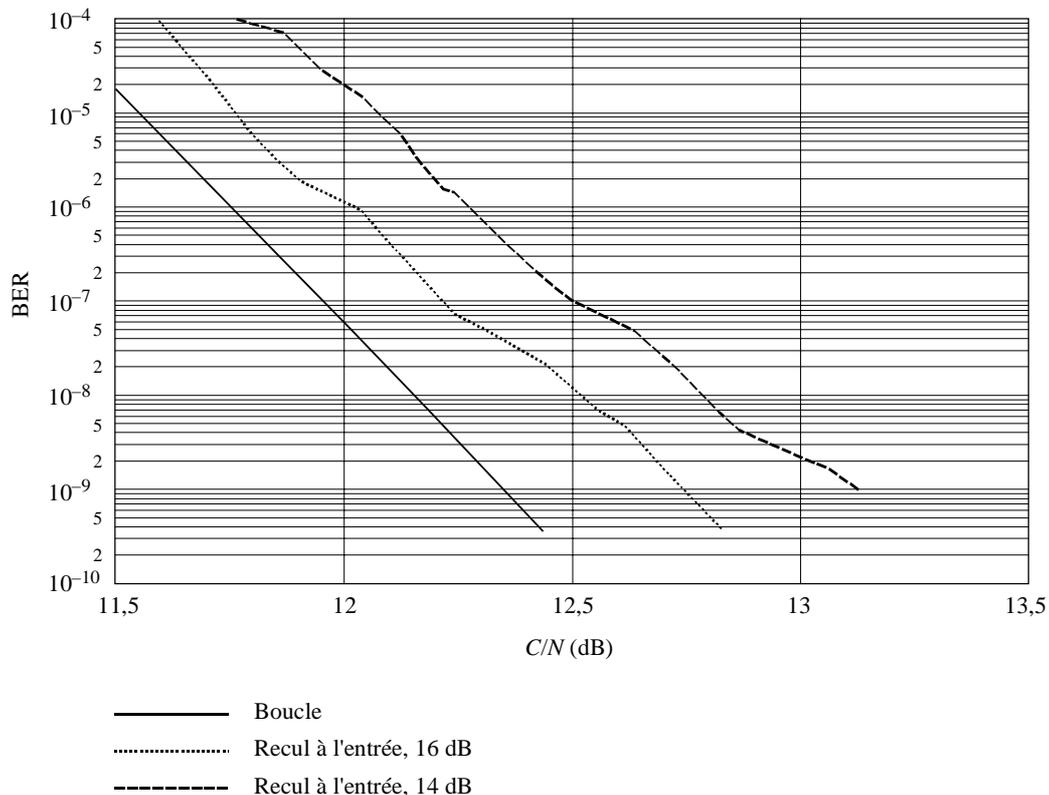
Comme on peut le constater sur la Fig. 5, un TEB de 1×10^{-8} exige des rapports C/N du circuit de transmission respectivement égaux à 5,5, 8,7 et 12,2 dB en ce qui concerne les techniques de modulation MDPQ, MDP-8 et MAQ-16.

3.2.2 Mesures RF de référence

Pour quantifier les effets de la non-linéarité de l'amplificateur de puissance de la station terrienne, le montage expérimental a été configuré (ce qui correspond sur la figure à la fermeture des interrupteurs 3, 4, 6 et 7) de façon à obtenir un circuit excluant les composantes spatiales. Des essais ont été réalisés pour déterminer les effets de la distorsion de linéarité sur la modulation MAQ-16, en réduisant le niveau d'entrée des signaux par rapport au niveau de saturation, jusqu'à obtention d'un point de fonctionnement acceptable. D'après la série d'essais effectués, la réduction à l'entrée doit être de 14 à 16 dB par rapport au niveau de saturation, avant que des niveaux acceptables de non-linéarité puissent être atteints. La Fig. 6 représente la dégradation de la qualité de fonctionnement due à la non-linéarité de l'amplificateur de puissance, par rapport aux essais FI sur boucle avec retour. D'après les résultats, l'utilisation de l'amplificateur de puissance avec une réduction à l'entrée de 14 à 16 dB a pour effet d'augmenter le rapport C/N de 0,4 à 0,6 dB dans la première partie, pour un TEB égal à 1×10^{-8} .

FIGURE 6

Linéarité de l'amplificateur de puissance de la station terrienne à l'entrée de la porteuse à modulation MAQ-16



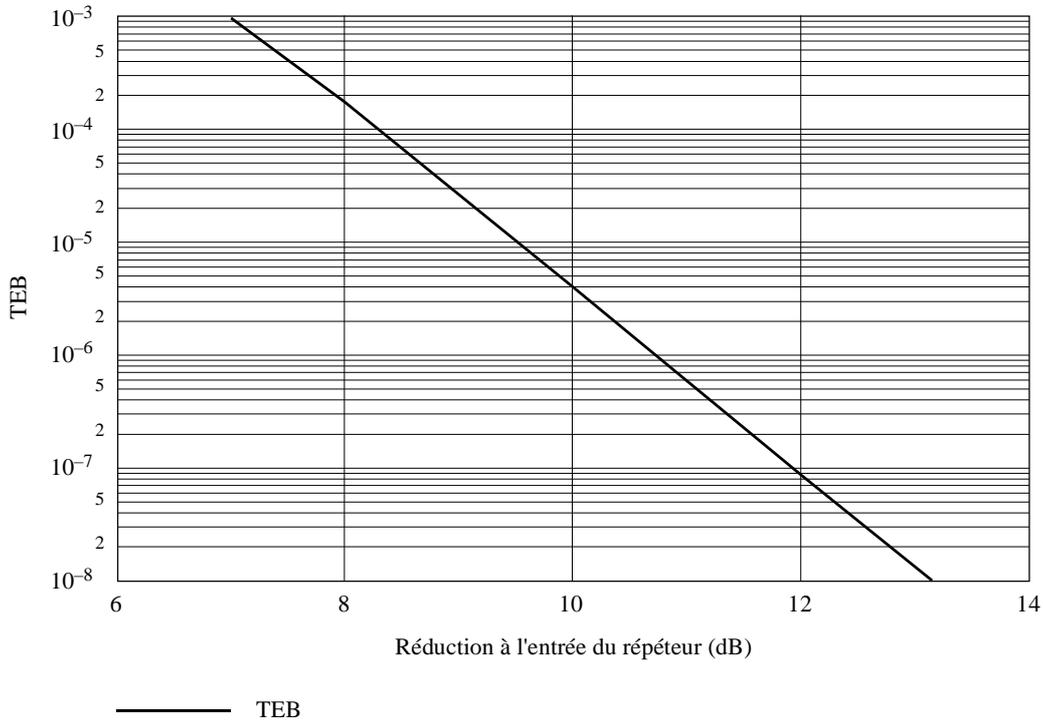
1425-06

3.2.3 Linéarité du répéteur de satellite

Pour déterminer un point de fonctionnement acceptable de l'amplificateur ATOP, le dispositif d'essai de réseau a été configuré de façon à inclure une composante de trajet RF (fermeture des interrupteurs 3, 4, 7, 10 et 12 sur le schéma de la Fig. 3). Cette configuration a permis de faire passer le signal RF par l'amplificateur ATOP. L'essai a consisté à faire varier le niveau d'un signal d'entrée d'une porteuse unique à modulation MAQ-16 appliqué à l'amplificateur ATOP, avec une réduction de 16 dB à l'entrée de l'amplificateur de puissance et un rapport C/N constant d'environ 14 dB. La Fig. 7 représente les résultats en termes de TEB du signal à modulation MAQ-16 en fonction de la réduction à l'entrée par rapport au niveau de saturation. Le Tableau 1 indique les caractéristiques de transfert d'un amplificateur ATOP type.

FIGURE 7

Linéarité du répéteur de satellite
Réduction à l'entrée de l'amplificateur de puissance de la station terrienne = 16 dB,
rapport C/N d'entrée de l'amplificateur ATOP = 13,8 dB



1425-07

TABLEAU 1

Caractéristiques de transfert d'un amplificateur ATOP type

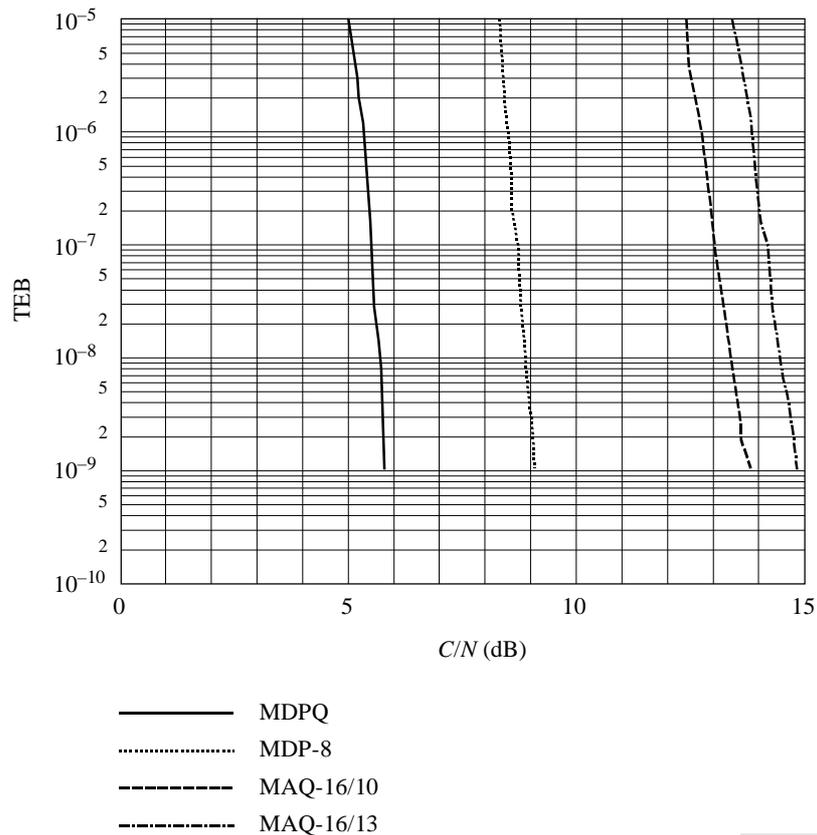
Réduction à l'entrée (dB)	Réduction à la sortie (dB)
0,0	0,0
1,0	0,1
2,0	0,3
3,0	0,6
4,0	1,0
5,0	1,4
6,0	1,8
7,0	2,4
8,0	3,0
9,0	3,8
10,0	4,6
11,0	5,5
12,0	6,5
13,0	7,6

3.2.4 Essais effectués sur la totalité du système

La Fig. 8 présente les valeurs de TEB obtenues pour des porteuses uniques à modulation MDPQ, MDP-8 et MAQ-16 à travers un réseau complet. Les résultats des mesures sont indiqués pour deux niveaux du signal d'entrée au récepteur du

satellite, correspondant respectivement à des points de fonctionnement avec réduction à l'entrée de 13 et 10 dB respectivement à l'amplificateur ATOP du satellite. Le point de fonctionnement de l'amplificateur de puissance de la station terrienne a été maintenu avec une réduction constante de 16 dB. La comparaison des Fig. 5 et 8 fait apparaître, par rapport à l'essai FI sur boucle avec retour, une dégradation du TEB du réseau complet d'environ 1,1 à 2,5 dB, selon la réduction à l'entrée de l'amplificateur ATOP du satellite.

FIGURE 8
Système complet
Réduction à l'entrée de l'amplificateur de puissance
ATOP = 16/10 et 16/13 dB



1425-08

3.2.5 Configuration à porteuses multiples et résultats des essais correspondants

Un montage d'essai à porteuses multiples a été réalisé en ajoutant un deuxième modem au réseau (fermeture des interrupteurs 3, 4, 6 et 8). Des essais ont été effectués sur un conduit RF dont la configuration correspondait au fonctionnement de deux porteuses MAQ-16 à 45 Mbit/s dans un répéteur unique. Les fréquences centrales ont été ajustées pour obtenir une séparation de 17 MHz dans le répéteur à 36 MHz. La puissance totale d'entrée appliquée à l'amplificateur de puissance/ATOP a été maintenue à un niveau de réduction de 16/13 dB. La Fig. 9 compare les TEB respectivement obtenus dans l'essai de référence FI sur boucle avec retour pour une et pour deux porteuses. Ces résultats montrent que pour un TEB de 1×10^{-8} par canal la dégradation du fonctionnement de deux porteuses à 45 Mbit/s et modulation MAQ-16 dans un répéteur unique n'est que de 1,7 dB, par comparaison aux essais FI de référence sur boucle avec retour.

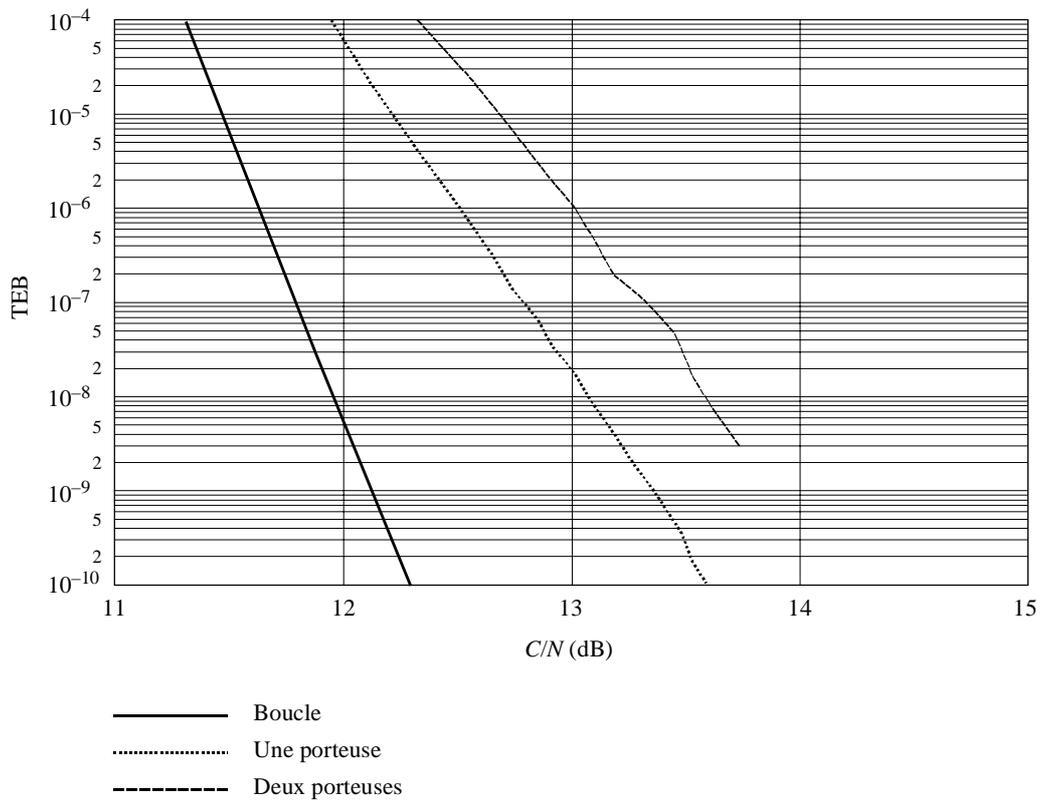
3.3 Récapitulation des mesures de qualité de fonctionnement

Des mesures de TEB relatives à des porteuses à 45 Mbit/s ont été réalisées sur circuit par satellite dans le cas des modulations MDPQ, MDP-8 et MAQ-16. Chaque porteuse utilisait un codage convolutif interne avec un taux de correction de 3/4 et un codage externe RS de 188,204. Les résultats des mesures de TEB effectuées pour les trois types de modulation sont présentés à la Fig. 8. La Fig. 9 compare les TEB obtenus pour une et pour deux porteuses à modulation MAQ-16.

Le Tableau 2 récapitule les spécifications concernant le rapport C/N_0 au démodulateur du récepteur, avec un TEB de 1×10^{-8} pour chacune des trois méthodes de modulation.

FIGURE 9

Porteuse multiples à modulation MAQ-16
Réduction à l'entrée de l'amplificateur ATOP = 13 dB total



1425-09

TABLEAU 2

Rapport C/N requis pour un TEB de 1×10^{-8} , dans le cas de porteuses à modulation MDPQ, MDP-8 et MAQ-16

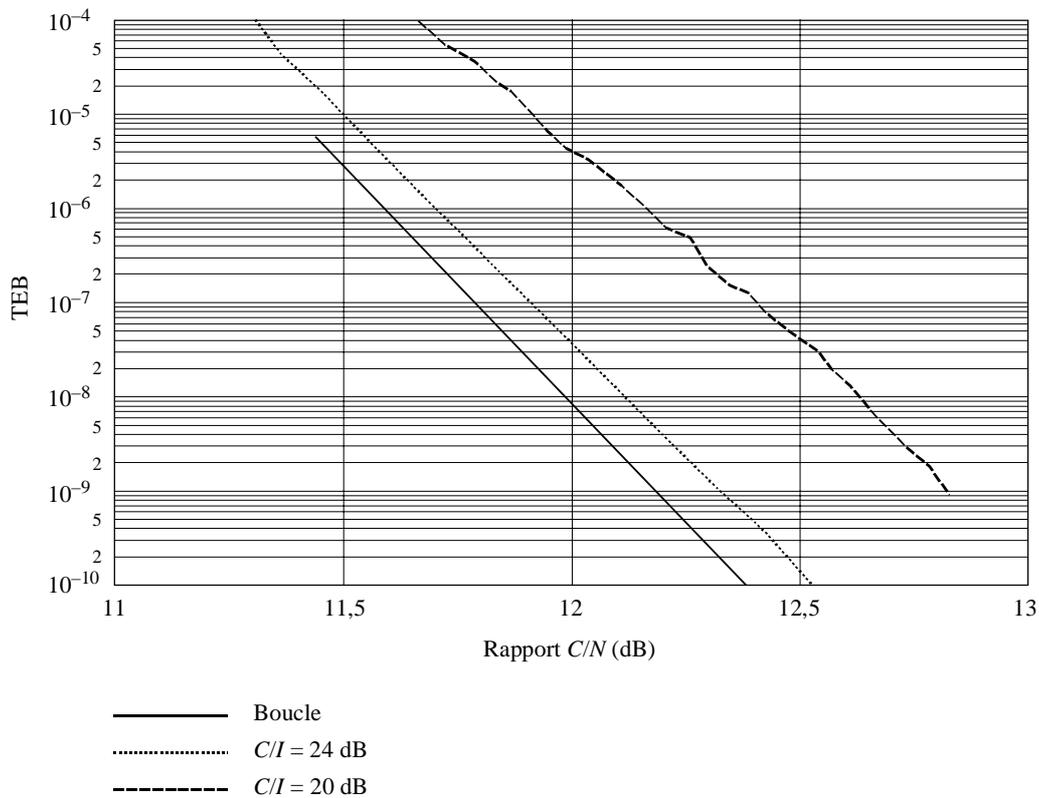
Configuration	MDPQ	MDP-8	MAQ-16
CED + RS	3/4 + 188,204	3/4 + 188,204	3/4 + 188,204
Boucle FI (dB)	5,7	8,7	12,2
Une porteuse unique, réduction à l'entrée de l'amplificateur de puissance/ATOP requise = 16/13 (dB)	5,7	8,8	13,2
Deux porteuses, réduction à l'entrée de l'amplificateur de puissance/ATOP requise = 16/13 (dB)			13,6

3.4 Effets du brouillage dans le même canal

Afin d'étudier les effets du brouillage dans le même canal, un signal brouilleur à modulation numérique a été appliqué au circuit d'essai FI sur boucle avec retour, selon la Fig. 2. L'intensité du brouillage a été ajustée afin d'obtenir des rapports C/I de 20 et 24 dB. Le TEB a été mesuré à différents niveaux du rapport C/N_0 en présence ou non du signal brouilleur.

La Fig. 10 représente les valeurs du TEB dans le cas d'une porteuse unique à modulation MAQ-16, pour les différents scénarios de brouillage. On constate qu'il faut alors contrôler soigneusement le brouillage occasionné par un circuit à modulation MAQ-16.

FIGURE 10
Sensibilité au brouillage de la modulation MAQ-16
Essai sur boucle avec retour



1425-10

4 Conclusions

Les résultats présentés ci-dessus montrent que les modulations plus élaborées telles que la modulation MAQ-16 augmentent l'efficacité d'utilisation de la bande de fréquences, pour une valeur donnée du rapport E_b/N_0 au prix d'un accroissement de la puissance du répéteur, et d'une augmentation de la p.i.r.e. de la station terrienne. Outre la contribution importante de l'affaiblissement dû à la pluie dans les bandes des 14/11 GHz et des 30/20 GHz, les caractéristiques non linéaires du réseau à satellite jouent un rôle important dans la distorsion du signal reçu au niveau du démodulateur du récepteur.

Parmi les principaux points à prendre en considération en ce qui concerne l'application de techniques de modulation plus élaborées à l'exploitation des systèmes à satellites figure l'exigence d'une limitation du niveau d'entrée appliqué à l'amplificateur ATOP du satellite ou de la distorsion résultante observée à la sortie. Cela tend à démontrer la nécessité éventuelle d'une régulation de la puissance de la station terrienne.

Il convient également de signaler qu'aucun des essais ci-dessus n'a comporté une égalisation d'amplitude ou de phase; cela donne à penser que l'utilisation de linéariseurs et d'égaliseurs à bord du satellite ou dans le circuit de la liaison montante pourrait donc permettre d'obtenir une amélioration supplémentaire de la qualité de fonctionnement.

Les résultats des essais montrent que les trois techniques de modulation de la porteuse sont, relativement parlant, affectées de manière identique par les modifications du rapport C/N de fonctionnement. Par exemple, dans les trois cas, un TEB de 1×10^{-10} au point de fonctionnement, tombe à 1×10^{-3} si le rapport C/N du réseau diminue de moins de 2 dB. Pour de nombreuses applications, un TEB de 1×10^{-3} n'est pas acceptable.