

RAPPORT UIT-R SM.2022-1

Effets sur les systèmes de télécommunication numériques des brouillages produits par d'autres systèmes de modulation

(Question UIT-R 202/1)

(2000-2004)

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE A

Examen théorique

	Page
1 Introduction	3
2 Objectifs et plan du projet	4
2.1 Objectifs du projet	4
2.2 Protocole d'essai.....	4
2.3 Travaux additionnels apparus en cours de projet	5
3 Méthode de simulation du système SPW	6
3.1 Configuration de simulation pour le système SPW	6
3.1.1 Liaison fixe utile à modulation MDP-4, avec récepteur (système SPW)	7
3.1.2 Liaison fixe utile à modulation MAQ-16, avec récepteur (système SPW)	10
3.1.3 Conception SPW pour la modulation MDF, avec récepteur.....	11
3.2 Mesure du taux SER ou TEB par la méthode de Monte Carlo.....	13
3.2.1 Choix d'une méthode d'évaluation du niveau TEB/SER des liaisons fixes	13
3.2.2 Incertitude au sujet de la mesure du TEB/SER.....	13
3.3 Validation des configurations de simulation SPW pour les liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MAQ-16 ou MDF	14
3.3.1 Méthodologie	14
4 Résultats	16
4.1 Taux TEB/SER des liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MAQ-16 ou MDF	16
4.2 Courbes de densité spectrale de puissance des sources utile et brouilleuse	22
4.3 Diagrammes en œil et diagramme de dispersion des liaisons fixes MDP-4 et MAQ-16 affectées par du brouillage et du bruit.....	25

5	Résumé et conclusions	33
5.1	Amélioration obtenue en matière d'assignation et de planification des fréquences par un environnement à brouillage limité relativement à l'environnement à bruit limité.....	33
5.1.1	Liaison fixe utile à modulation MDP-4	33
5.1.2	Liaison fixe utile à modulation MAQ-16.....	33
5.1.3	Liaison fixe utile à modulation MDF.....	34

PARTIE B

Mesures

1	Introduction	35
2	Détecteurs existants – Présentation	35
2.1	Caractéristiques du détecteur de quasi-crête (QP) du Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR)	35
2.2	Caractéristiques d'autres détecteurs	35
2.3	Répartition de probabilité des amplitudes	37
3	Services de radiocommunication numérique.....	37
3.1	Considérations générales	37
3.2	Caractéristiques du système.....	37
4	Pondération des perturbations des systèmes de télécommunication numérique.....	37
4.1	Principe de mesure.....	38
4.2	Signaux brouilleurs.....	39
4.3	Exemple expérimental 1: radiodiffusion vidéo numérique par câble.....	40
4.4	Exemple expérimental 2: radiodiffusion audio numérique	41
5	Conclusions	42
	Références bibliographiques et Bibliographie	42

PARTIE C

Méthode de simulation pour l'identification des sources de brouillage

	Page
1 Introduction	43
2 Méthode de simulation	43
2.1 Configuration de simulation	44
2.2 Calcul du TEB à l'aide de la méthode d'échantillonnage par importance amélioré (IIS, <i>improved importance sampling</i>).....	45
3 Résultats de la simulation.....	46
3.1 TEB.....	46
3.2 Densité de probabilité du rapport E_b/N_0	53
4 Conclusions	59

PARTIE A

Examen théorique**1 Introduction**

La Partie A examine la situation dans laquelle une liaison fixe numérique est exposée aux brouillages provoqués par le bruit radioélectrique (naturel) et par un signal brouilleur d'une puissance établie à 6 dB au-dessus du bruit naturel.

Les programmes d'assignation de fréquence aux liaisons fixes tiennent généralement compte des limitations imposées par le bruit. Cela signifie que le niveau minimal au-dessous de l'évanouissement du signal au récepteur est fixé à une valeur donnée par rapport au bruit de fond et au bruit ambiant du système. Les assignations sont ensuite planifiées de manière à fixer le niveau maximum d'un signal brouilleur au moyen d'un rapport de protection qui situe généralement les signaux brouilleurs à 6 dB environ au-dessous du bruit.

Cette manière de procéder est relativement sûre et simple à définir mais elle a pour inconvénient de ne pas être optimale. Elle a pour avantage de permettre d'introduire un nombre maximal de liaisons dans une bande et une zone géographique données sans exposition excessive aux brouillages. Autrement dit, c'est le niveau des signaux brouilleurs, et non celui du bruit naturel, qui fixe le niveau du bruit de fond ambiant.

Une telle manière de procéder oblige à évaluer la qualité de fonctionnement des récepteurs de liaison fixe en présence de signaux brouilleurs produits par d'autres systèmes de modulation et par du bruit gaussien.

La présente étude porte sur trois types de modulation de liaison fixe numérique, à savoir la modulation par déplacement de fréquence (MDF), la modulation par déplacement de phase quadrivalente (MDP-4) et la modulation d'amplitude en quadrature à 16 états (MAQ-16) affectés par le bruit et par le brouillage produit par une source de modulation, MDF, MDP-4, MDP-8 ou MAQ-16.

L'examen théorique a été effectué au moyen du système opérationnel de traitement des signaux spéciaux (SPW, *signal processing work system*).

Le rapport conclut, par l'analyse des résultats des simulations sur ordinateur, que la planification et l'assignation des fréquences aux liaisons fixes dans un environnement peu exposé aux brouillages (brouillage de 6 dB au-dessus du bruit) permettront de rapprocher les assignations de fréquence aux liaisons fixes, avec une efficacité accrue.

2 Objectifs et plan du projet

Ce projet avait pour objectif de faire une étude théorique, répondant aux objectifs et au plan de travail fixés dans le temps avec le commanditaire; la nécessité de procéder à des tâches supplémentaires est toutefois apparue au cours d'un examen approfondi.

2.1 Objectifs du projet

L'étude a pour objet de simuler les effets d'une liaison hertzienne typique d'énergie brouilleuse constituée de bruit et de brouillage (causé par un autre système de modulation), ayant un rapport de niveaux donné, et d'évaluer ensuite, par analyse, le potentiel des programmes de planification et d'assignation des fréquences sur la base de scénarios à faible brouillage susceptibles d'être plus efficaces.

Pour les besoins du présent projet, on a mesuré ou calculé le taux d'erreur sur les symboles (SER, *symbol error rate*) ou le taux d'erreur sur les bits (TEB) pour diverses valeurs du rapport signal/bruit + brouillage ($S/(N+I)$) où le bruit correspond au bruit blanc gaussien additif (BBGA) et où le brouillage provient des autres systèmes de modulation spécifiés. Sauf indication contraire, le niveau de brouillage a été systématiquement fixé à 6 dB au-dessus de celui du bruit.

2.2 Protocole d'essai

Les diverses tâches qui doivent répondre aux objectifs spécifiés au § 2.1 sont énumérées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Cas qu'il est convenu de considérer

N° de tâche	Système de modulation de liaison fixe utile	Bruit et type de système de modulation de liaison fixe brouilleuse pour divers niveaux du signal
1	Modulation MDP-4	BBGA pour un taux SER de 1×10^{-6}
2	Modulation MDP-4	Bruit + brouillage de modulation MDP-4 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
3	Modulation MDP-4	Bruit + brouillage de modulation MAQ-16 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
4	Modulation MDP-4	Bruit + brouillage de modulation MDF de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
5	Modulation MAQ-16	BBGA pour un taux SER de 1×10^{-6}
6	Modulation MAQ-16	Bruit + brouillage de modulation MDP-4 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
7	Modulation MAQ-16	Bruit + brouillage de modulation MAQ-16 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
8	Modulation MAQ-16	Bruit + brouillage de modulation MDF de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
9	Modulation MDF	BBGA pour un taux SER de 1×10^{-6}
10	Modulation MDF	Bruit + brouillage MDF de même niveau que le bruit
11		Bruit + brouillage de modulation MDF de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
12		Bruit + brouillage de modulation MDP-4 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
13		Bruit + brouillage de modulation MDP-8 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
14		Bruit + brouillage de modulation MAQ-16 de 6 dB au-dessus du niveau du bruit

2.3 Travaux additionnels apparus en cours de projet

Pendant l'exécution du projet, il est apparu qu'il était nécessaire de préciser deux points: premièrement, la manière dont les liaisons fixes utiles des systèmes de modulation MDP-4, MAQ-16 et MDF sont affectées par le brouillage résultant du système de modulation MDF avec son indice de modulation variable.

Deuxièmement, la manière dont le système de modulation MDF de liaison fixe utile est affecté par le brouillage produit par les systèmes de modulation MDF, MDP-4 et MAQ-16 selon les variations de l'indice de modulation MDF de la liaison fixe.

TABLEAU 2

Travaux additionnels

N° de tâche	Système de modulation de liaison fixe utile	Bruit et type de système de modulation de liaison fixe brouilleuse pour divers niveaux du signal (0,0 à 1)
1	Modulation MDF	Bruit + modulation MDF pour un rapport $S/(N + I)$ fixe de 8 dB avec brouillage de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
2	Modulation MDP-4	Bruit + brouillage MDF pour un rapport $S/(N + I)$ fixe de 15 dB avec brouillage de 6 dB au-dessus du niveau du bruit
3	Modulation MAQ-16	Bruit + brouillage MDF pour un rapport $S/(N + I)$ fixe de 15 dB avec brouillage de 6 dB au-dessus du niveau du bruit

3 Méthode de simulation du système SPW

L'objectif du projet est de comparer l'effet sur les symboles, ou bits, de la probabilité d'erreur résultant, d'une part du bruit gaussien pur (à titre de référence), d'autre part, du signal brouilleur majoré du bruit, pour les diverses configurations d'essai des Tableaux 1 et 2.

La méthode choisie consiste à établir des combinaisons de simulation SPW pour une liaison fixe courante, respectivement avec les modulations MDP-4, MAQ-16 et MDF, à prouver le bien-fondé de chaque combinaison par rapport aux résultats théoriques escomptés puis de procéder à la simulation proprement dite.

On trouvera ci-après des précisions sur les modèles de simulation, les méthodes de dénombrement des erreurs, les preuves de validité et les résultats des simulations par ordinateur sur les liaisons fixes à modulation MDP-4, MAQ-16 et MDF avec leur courbe de densité spectrale de puissance. Les diagrammes de dispersion et les diagrammes en oeil des liaisons fixes utiles à modulation MDP-4 et MAQ-16 ont varié, compte tenu du signal brouilleur et du bruit, dans des proportions qui sont également mentionnées.

3.1 Configuration de simulation pour le système SPW

Une configuration de simulation de liaison fixe typique est constituée d'un signal utile et d'un signal brouilleur de modulation appropriée, qui sont réunis dans le récepteur avec la possibilité de faire varier le BBGA et de l'ajouter au signal utile jusqu'à obtenir le S/N ou le $S/(N + I)$ voulu à l'entrée d'un démodulateur, pour les besoins de calcul ou pour les mesures du TEB et du SER.

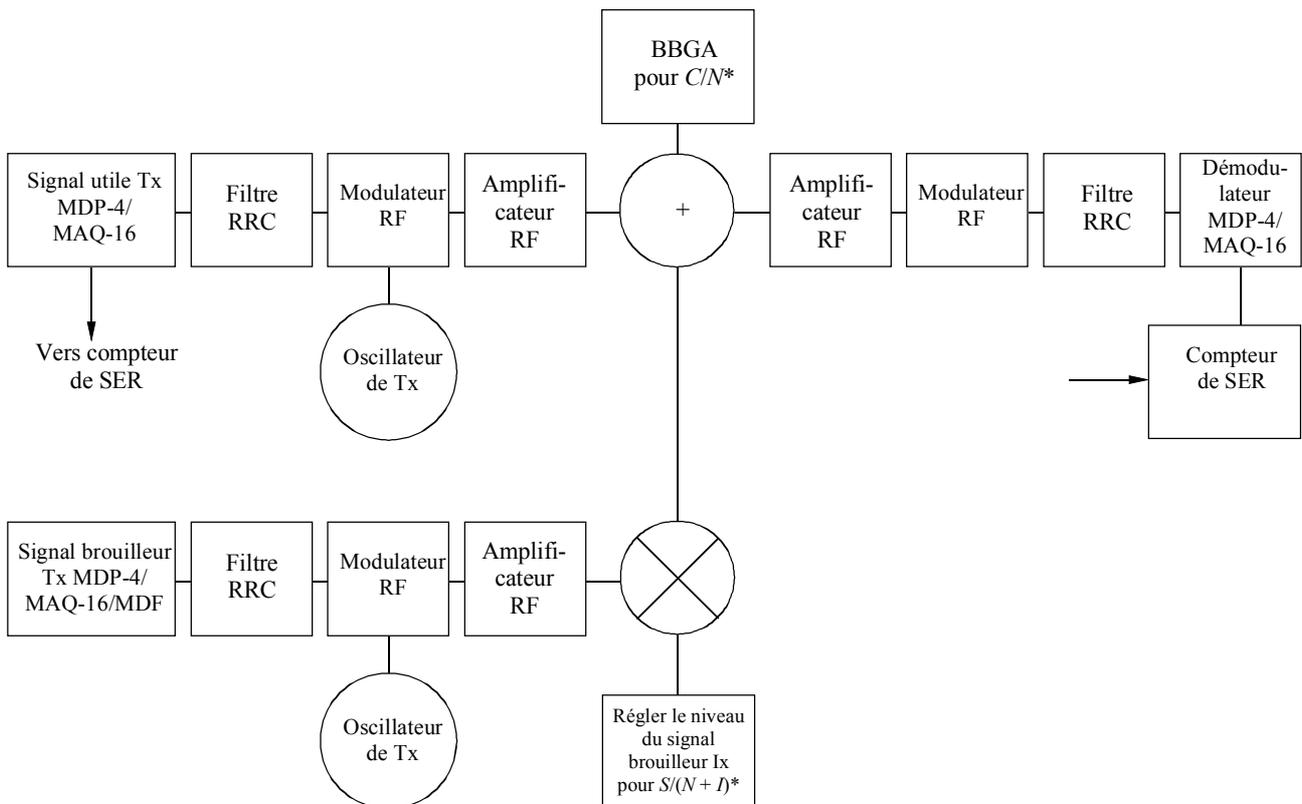
La Fig. 1 représente une configuration de simulation générique pour liaison fixe utile à modulation MDP-4 ou MAQ-16 formée d'un émetteur (Tx) d'un récepteur (Rx) et d'une source de brouillage (Ix). La Fig. 2 représente la configuration pour la simulation de la liaison fixe utile à modulation MDF.

3.1.1 Liaison fixe utile à modulation MDP-4, avec récepteur (système SPW)

La liaison fixe utile à modulation MDP-4 est constituée d'un émetteur et d'un récepteur.

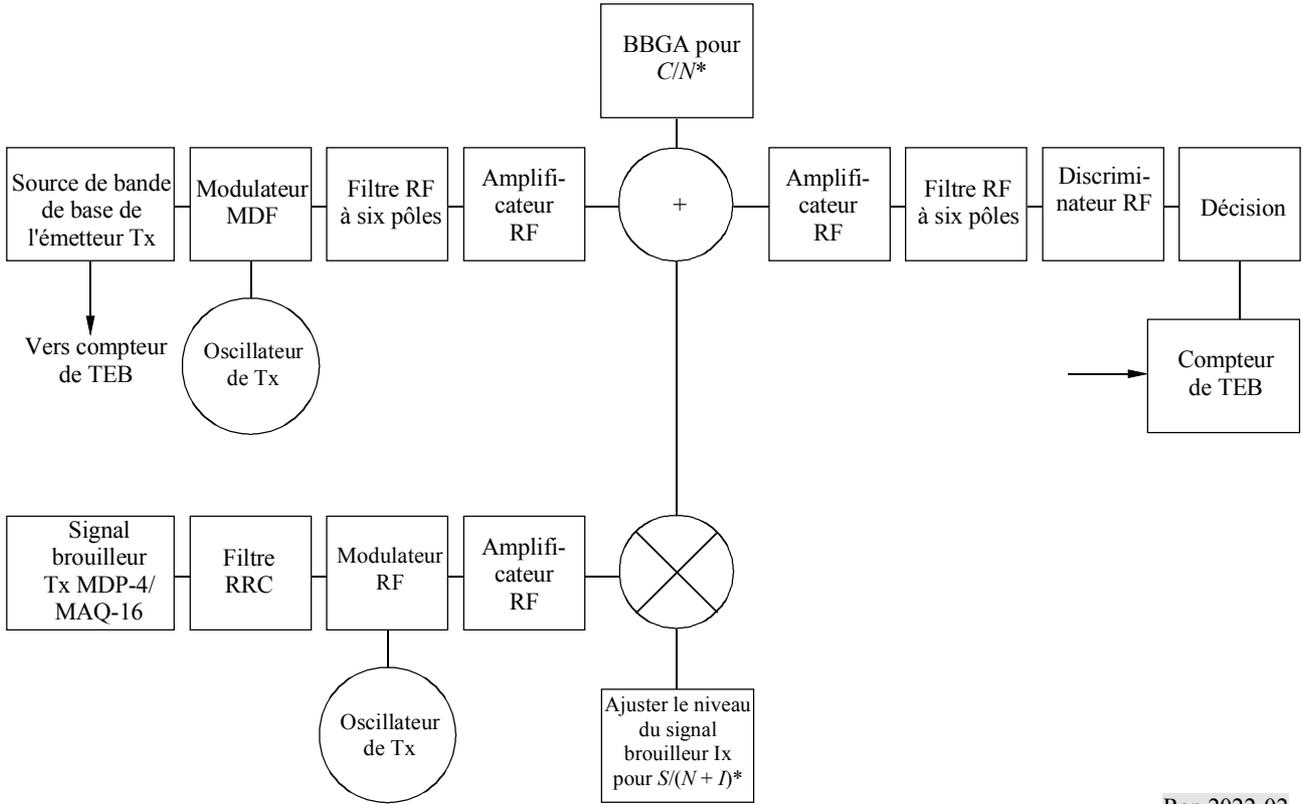
Pour souci de simplicité, la Fig. 3 se rapporte à un émetteur MDP-4 et la Fig. 4 à un récepteur MDP-4.

FIGURE 1
Configuration de simulation générique pour liaison fixe utile à modulation MDP-4 et MAQ-16 en présence de bruit et de brouillage



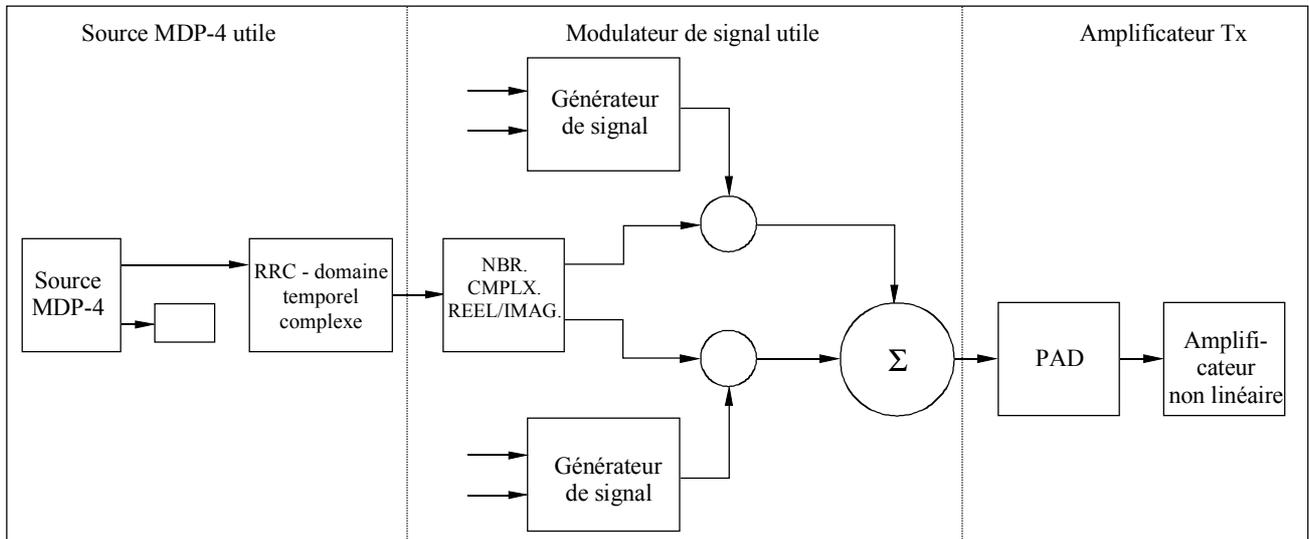
RRC: filtre en racine de cosinus biaisé (*root-raised cosine filter*)

FIGURE 2
 Configuration de simulation simplifiée pour liaison fixe utile à modulation MDF
 en présence de bruit et de brouillage



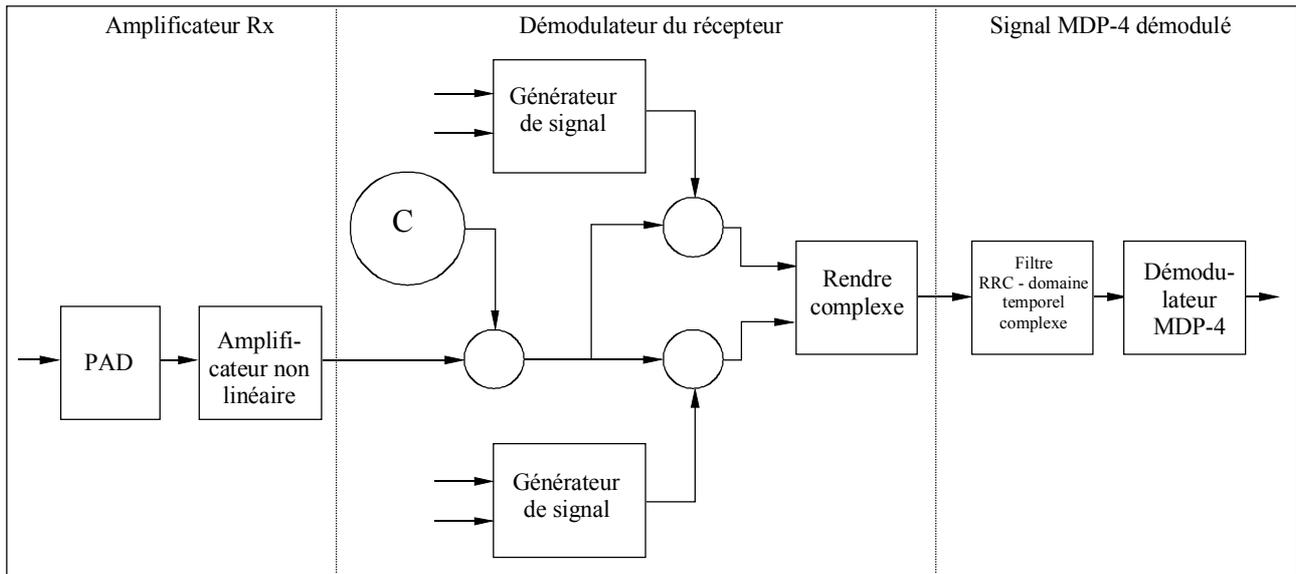
Rap 2022-02

FIGURE 3
 Emetteur MDP-4



Rap 2022-03

FIGURE 4
Récepteur MDP-4



Rap 2022-04

Emetteur MDP-4: L'émetteur est constitué d'une source à modulation MDP-4, d'un filtre RRC, d'un modulateur de radiofréquence RF et d'un amplificateur RF. Le signal de sortie de l'amplificateur est ensuite combiné dans le récepteur avec un signal brouilleur à modulation identique ou différente et avec du bruit BBGA. Les illustrations de la Partie B montrent la manière dont le brouilleur et le bruit BBGA sont combinés. La même configuration d'émetteur MDP-4 a été utilisée pour produire les signaux brouilleurs MDP-4 et MDP-8.

Paramètres de simulation d'un émetteur MDP-4: Les paramètres suivants ont été utilisés pour chaque simulation de système SPW:

- a) *Rapidité de modulation de la source MDP-4:* 1,024 Msymbol/s.
- b) *Filtre RRC:* facteur de coupure de 0,5 (utilisation de 512 prises de retard pour aboutir au facteur de coupure spécifique).
- c) *Modulateur RF:* 2,5 MHz
- d) *Amplificateur RF:*
 - fonctionnant à 10 dB au-dessous du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception du 3^{ème} ordre est mis à 6 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception du 2^{ème} ordre est mis à 16 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le bruit de l'amplificateur RF est de 10 dB.

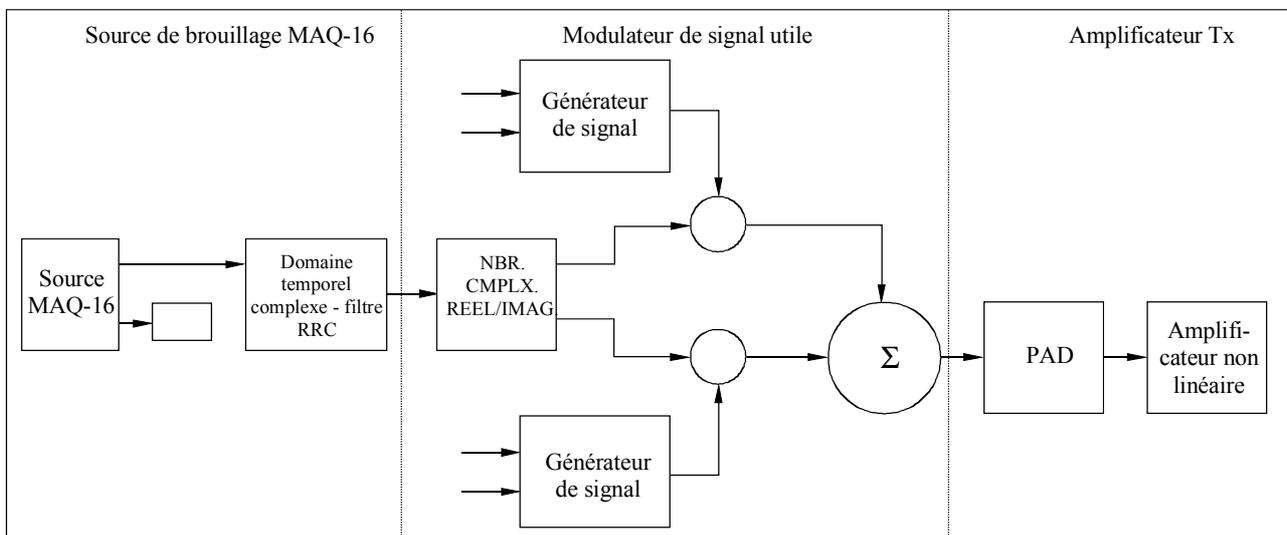
Récepteur MDP-4: Ce récepteur est constitué d'un amplificateur RF, d'un démodulateur RF, d'un filtre RRC à facteur de coupure de 0,5 et d'un démodulateur cohérent MDP-4. L'amplificateur RF est réglé de manière à fonctionner linéairement et le démodulateur RF convertit la porteuse à 2,5 MHz; le démodulateur MDP-4 est de type à filtre adapté. Le signal de sortie du démodulateur MDP-4 est introduit dans le compteur de SER.

3.1.2 Liaison fixe utile à modulation MAQ-16, avec récepteur (système SPW)

La liaison fixe utile à modulation MAQ-16 est constituée d'un émetteur et d'un récepteur. Par souci de simplicité, la Fig. 5 représente la conception SPW d'un émetteur MAQ-16 et la Fig. 6 représente celle d'un récepteur MAQ-16.

Emetteur MAQ-16: L'émetteur est constitué d'une source à modulation MAQ-16, d'un filtre RRC, d'un modulateur de radiofréquence RF et d'un amplificateur RF. Le signal de sortie de l'amplificateur est ensuite combiné dans le récepteur avec un brouillage à modulation identique ou différente et avec du bruit BBGA. Les valeurs données dans la Partie B montrent la manière dont le brouilleur et le bruit BBGA sont combinés. La même conception d'émetteur MAQ-16 a été utilisée pour produire le signal brouilleur.

FIGURE 5
Emetteur MAQ-16



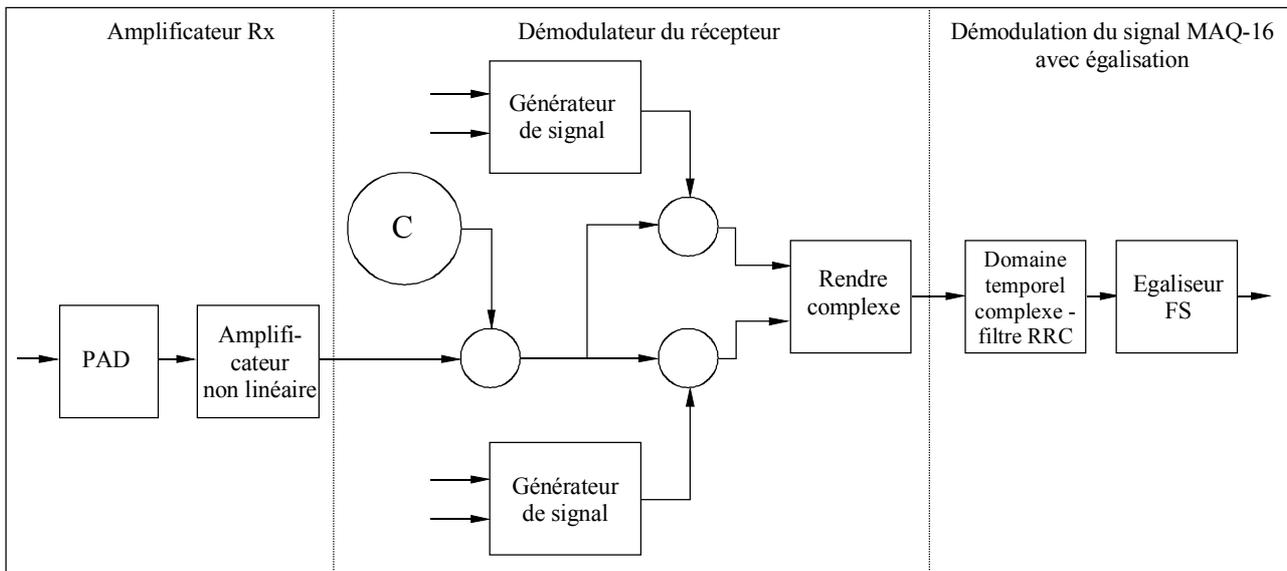
Rap 2022-05

Paramètres de simulation de l'émetteur MAQ-16: Les paramètres suivants ont été utilisés pour chaque simulation du système SPW:

- a) *Rapidité de modulation de la source MAQ-16:* 1,024 Msymboles/s.
- b) *Filtre RRC:* Facteur de coupure de 0,5 (utilisation de 512 prises de retard pour aboutir au facteur de coupure spécifié).
- c) *Modulateur RF:* 2,5 MHz.
- d) *Amplificateur RF:*
 - fonctionne à 10 dB au-dessous du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception du 3^{ème} ordre est mis à 6 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception de 2^{ème} ordre est mis à 16 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le bruit de l'amplificateur est de 10 dB.

Récepteur MAQ-16: Le récepteur est constitué d'un amplificateur RF, d'un démodulateur RF, d'un filtre RRC avec facteur de coupure de 0,5 et d'une égalisation adaptative avec démodulateur MAQ-16. L'amplificateur RF est réglé de manière à fonctionner linéairement et le démodulateur RF convertit le type de filtre de la porteuse à 2,5 MHz. Le signal de sortie du démodulateur est introduit dans le compteur de SER.

FIGURE 6
Récepteur MAQ-16



Rap 2022-06

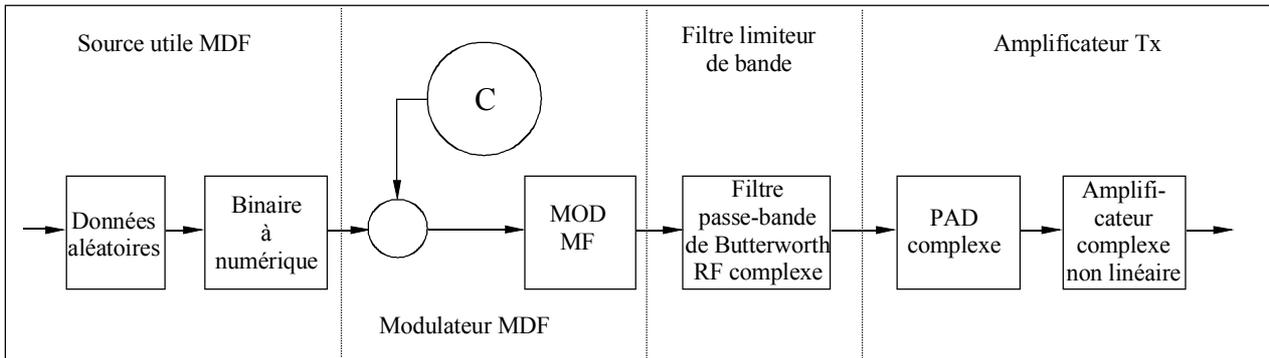
Il est nécessaire d'utiliser une égalisation adaptative dans le processus de démodulation étant donné que le filtre RRC produit une distorsion notable d'amplitude et de phase du signal utile MAQ-16.

3.1.3 Conception SPW pour la modulation MDF, avec récepteur

La liaison fixe utile à modulation MDF est constituée d'un émetteur et d'un récepteur. Par souci de simplicité, la Fig. 7 montre la conception SPW de l'émetteur MDF et la Fig. 8 montre celle du récepteur MDF. La même conception d'émetteur MDF a été utilisée pour produire le signal brouilleur.

Emetteur MDF: L'émetteur MDF est constitué d'une source de données, d'un modulateur MDF, d'un filtre passe-bande RF et d'un amplificateur RF. Le signal de sortie de l'amplificateur est combiné dans le récepteur avec un signal brouilleur ayant la même modulation ou une modulation différente et avec du bruit BBGA. Les valeurs montrées dans la Partie B montrent la manière dont le signal brouilleur et le bruit BBGA sont combinés.

FIGURE 7
Emetteur MDF

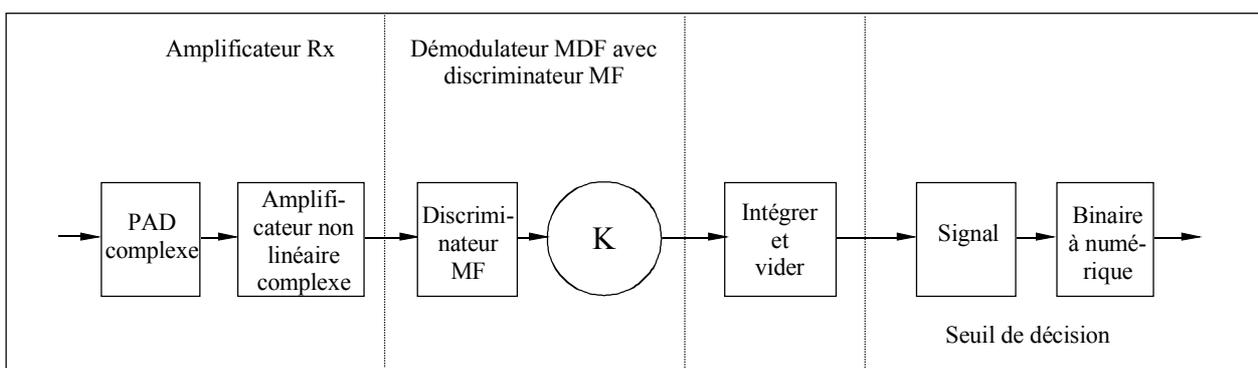


Rap 2022-07

Paramètres de simulation de l'émetteur MDF: Les paramètres suivants ont été utilisés au cours de chaque simulation SPW:

- a) *Débit binaire de la source de données aléatoires:* 1,024 Mbit/s.
- b) *Filtre de Butterworth:* filtre RF passe-bande de Butterworth à 6 pôles centré sur la fréquence porteuse 2,048 MHz. Sa largeur de bande BW est de 2 (débit) (1 + indice de modulation).
- c) *Modulateur MF:* réglé de manière à fonctionner à une fréquence porteuse de 2,048 MHz avec un indice de modulation de 0,45 pour le signal utile et de 0,35 pour le signal brouilleur.
- d) *Amplificateur RF:*
 - fonctionne à 10 dB au-dessous du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception du 3^{ème} ordre est mis à 6 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le point d'interception de 2^{ème} ordre est mis à 16 dB au-dessus du point de compression à 1 dB;
 - le bruit de l'amplificateur est de 10 dB.

FIGURE 8
Récepteur MDF



Rap 2022-08

Récepteur MDF: Ce récepteur est constitué d'un amplificateur RF, d'un filtre passe-bande, d'un discriminateur MF pour démoduler le signal utile modulé MDF et d'un circuit de prise de décisions pour régénérer les données aléatoires transmises. L'amplificateur RF est réglé pour fonctionner linéairement. Le signal de sortie du démodulateur est introduit dans le compteur de TEB.

3.2 Mesure du taux SER ou TEB par la méthode de Monte Carlo

L'évaluation du taux d'erreur TEB ou SER des systèmes de communication numérique est effectuée au moyen d'une simulation SPW sur une station SUNSparc. Le moyen habituel pour obtenir une évaluation numérique du TEB à partir de la simulation est la méthode de Monte Carlo, qui consiste à compter les erreurs.

La définition du TEB utilisée dans le cas présent est le nombre fractionnaire d'erreurs dans une séquence émise. Etant donné que l'on peut escompter qu'une erreur se produise tous les p^{-1} bits, ou symboles, où p est le TEB, la longueur des séquences de Monte Carlo doit augmenter à mesure que P décroît à un point où, pour une valeur p relativement petite, la durée de fonctionnement devient trop longue. A l'heure actuelle, la méthode de simulation de Monte Carlo n'est efficace que pour vérifier le taux TEB jusqu'à 1×10^{-5} .

Pour des valeurs de TEB inférieures, il faut considérer la réduction de la variance, l'extrapolation ou les techniques semi-analytiques. L'objectif de celles-ci est d'obtenir des estimations fiables avec un nombre moindre de symboles, ou de bits, que celui requis par la méthode de Monte Carlo. Toutefois, la méthode de Monte Carlo modifiée fait des hypothèses au sujet du système proprement dit et du type de brouillage (bruit), mais pas en ce qui concerne les autres types de brouillage (c'est-à-dire produits par les systèmes MDF, MDP-4 et MAQ-16).

3.2.1 Choix d'une méthode d'évaluation du niveau TEB/SER des liaisons fixes

On a choisi la méthode de Monte Carlo pour évaluer les niveaux de TEB et de SER des liaisons fixes brouillées par des combinaisons de bruit et de brouillage résultant d'autres systèmes de modulation, car elle ne requiert pas d'hypothèse au sujet du processus d'entrée et/ou du système.

Pour maintenir la durée de chaque simulation SPW au minimum, on a compté un maximum de 50 erreurs et de 1×10^{-7} symboles ou bits. Cela donne lieu à:

- 50 erreurs comptées jusqu'à un taux SER/TEB de 1×10^{-5} ;
- 10 à 50 erreurs comptées jusqu'à un taux SER/TEB de 1×10^{-5} à 1×10^{-6} .

3.2.2 Incertitude au sujet de la mesure du TEB/SER

Pour chaque simulation SPW relative aux configurations d'essai des Tableaux 1 et 2, le degré d'incertitude:

- du taux SER/TEB de 1×10^{-5} avec un niveau de confiance de 95% est de $\pm 20\%$;
- du taux SER/TEB de 1×10^{-5} à 1×10^{-6} avec un niveau de confiance de 95% est de $\pm 20\%$ à $\pm 62\%$.

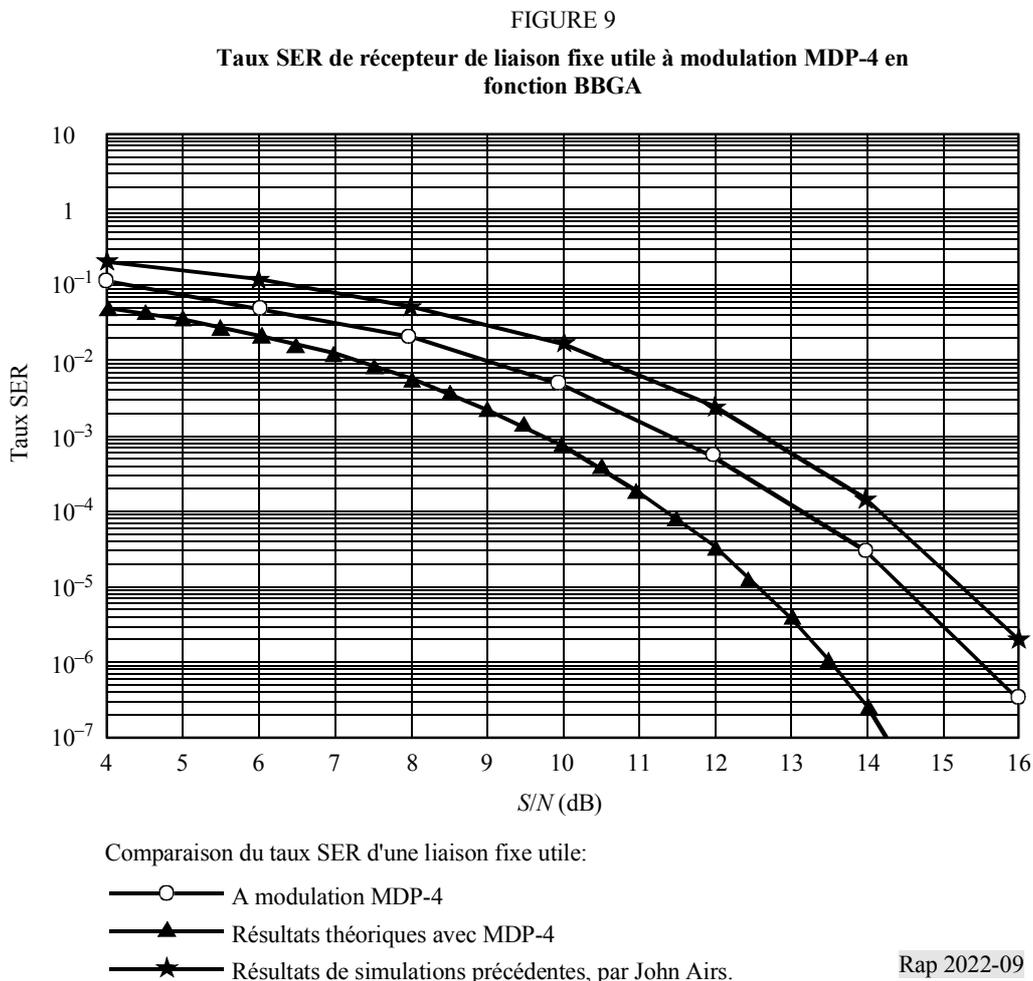
3.3 Validation des configurations de simulation SPW pour les liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MAQ-16 ou MDF

3.3.1 Méthodologie

Chaque configuration de simulation SPW d'émetteur et de récepteur pour les liaisons utiles à modulation MDP-4, MAQ-16 et MDF a été validée par l'évaluation du taux SER ou du TEB et du niveau de qualité avec le bruit BBGA, au moyen de la méthode de Monte Carlo. Chaque configuration de récepteur SPW a été élaborée avec précision pour aboutir au niveau le plus favorable de taux SER/TEB par rapport aux résultats théoriques ou aux résultats de simulations antérieures.

Critères utilisés pour la validation:

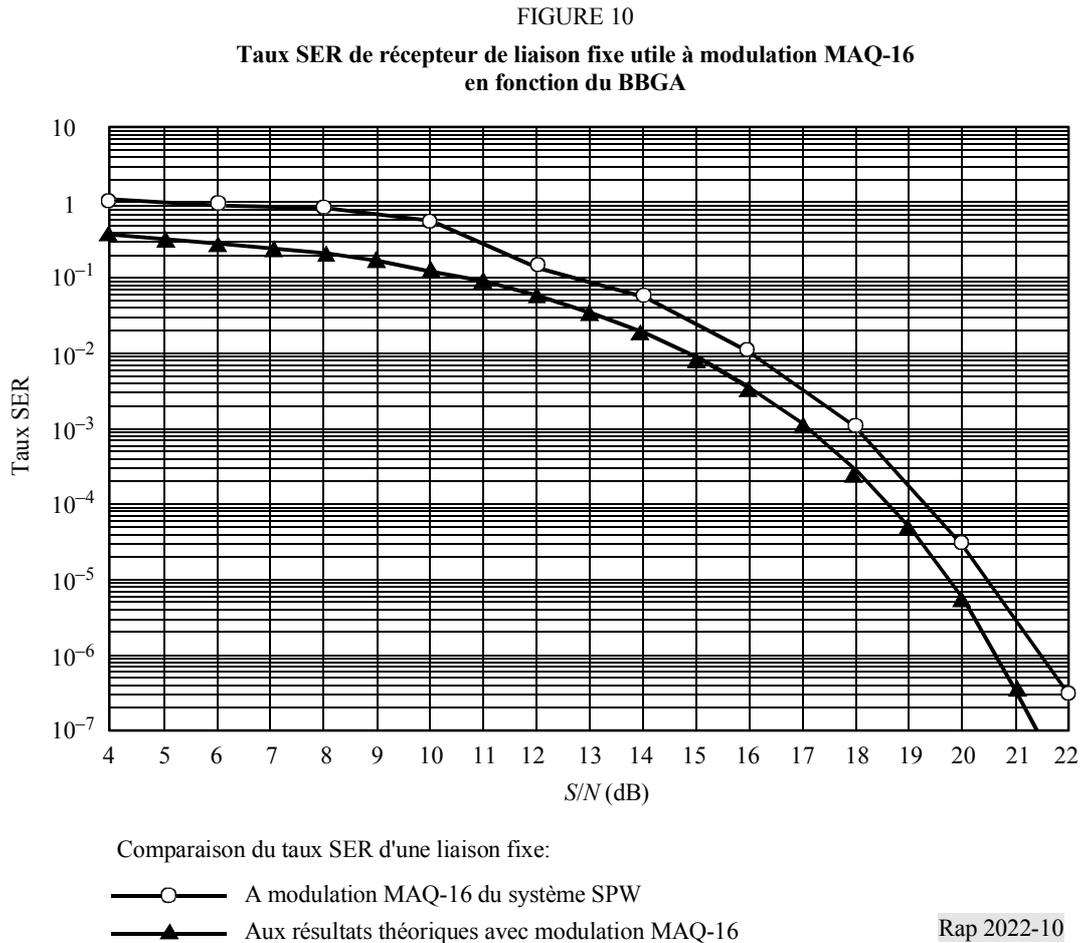
- a) *du récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4*



La Fig. 9 montre que le taux SER du récepteur à modulation MDP-4 en question est plus favorable d'environ 1 dB que les résultats de simulations précédentes et de 2 dB moins favorable que les résultats théoriques, dont on peut penser qu'ils ont été obtenus avec un filtre à bande étroite et un amplificateur produisant de la distorsion de phase et d'amplitude. L'utilisation d'une égalisation adaptative dans le récepteur améliorera éventuellement son niveau de qualité de 1 dB.

b) *du récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ-16*

La Fig. 10 fait apparaître que la qualité de la configuration du récepteur à modulation MAQ-16 est d'environ 1 dB moins favorable que les résultats théoriques, qui ne peuvent être obtenus qu'au moyen d'une égalisation adaptive.



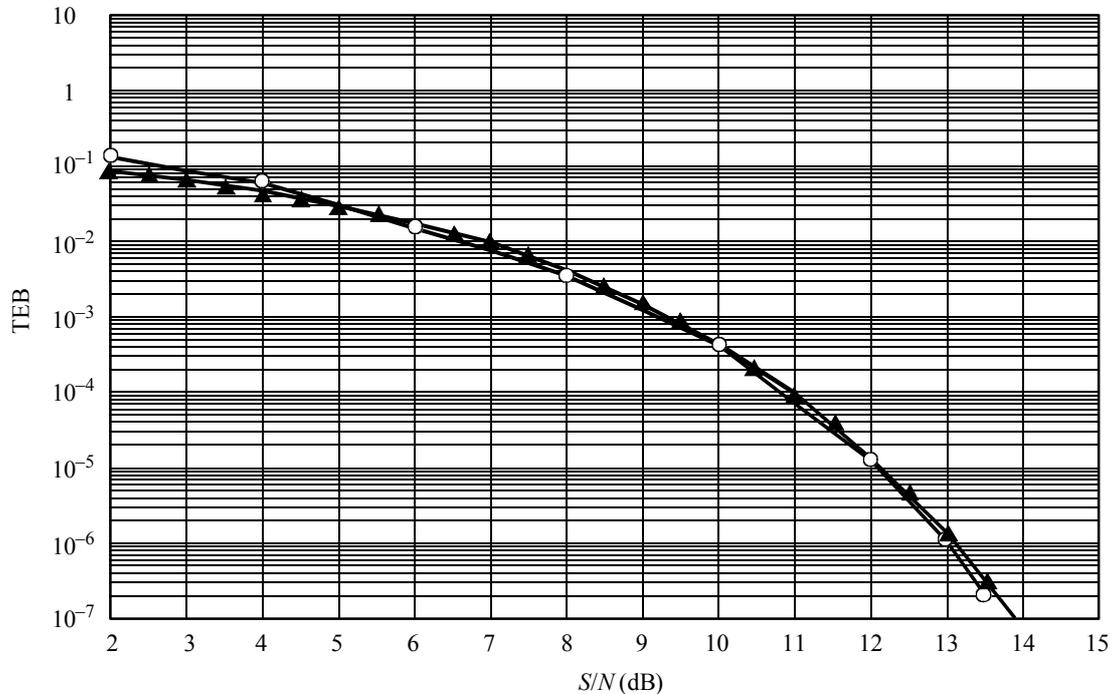
c) *du récepteur de liaison fixe à modulation MDF*

La Fig. 11 fait apparaître que le taux TEB du récepteur MDF considéré se confond pratiquement avec les valeurs théoriques. Ce résultat a été obtenu moyennant l'emploi d'un discriminateur MF et de filtres RF dont la bande passante était mise à :

$$BW = 2 (\text{débit}) \cdot (1 + \text{indice de modulation})$$

FIGURE 11

Taux TEB du récepteur de liaison fixe utile à modulation MDF
en fonction du BBGA



Comparaison du taux TEB d'une liaison fixe utile:

- A modulation MDF du système SPW
- ▲— Aux résultats théoriques à MDF cohérente

Rap 2022-11

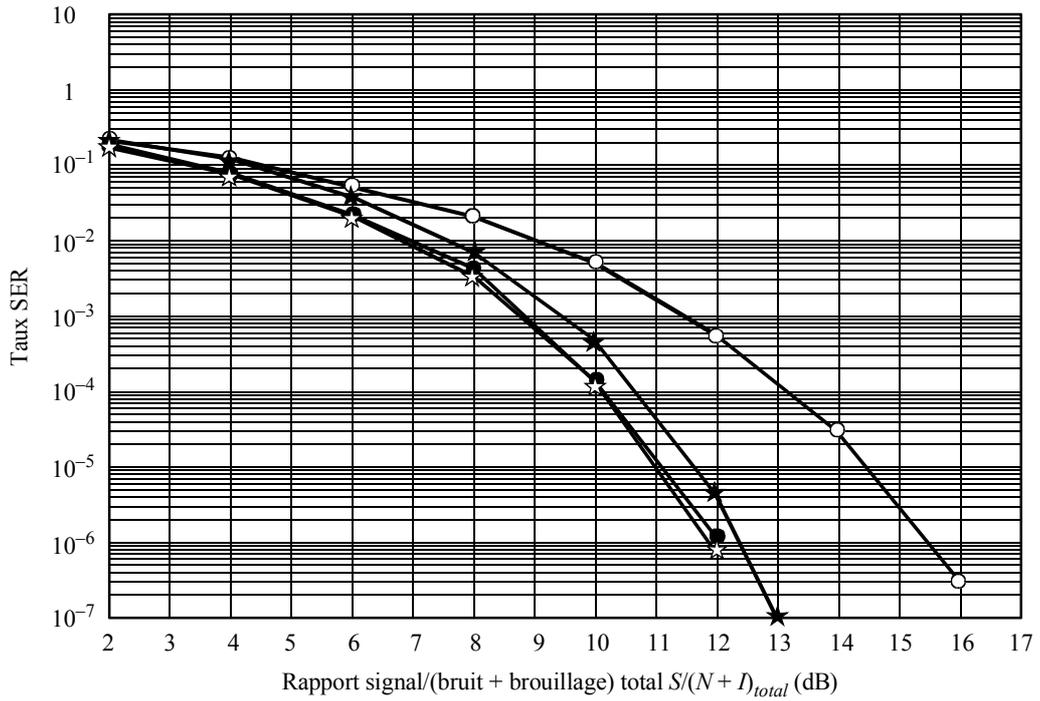
4 Résultats

4.1 Taux TEB/SER des liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MAQ-16 ou MDF

Les Fig. 12 à 17 contiennent les résultats des simulations. Chaque courbe a été tracée de manière à montrer l'effet sur le taux SER/TEB du bruit BBGA, à titre de référence, et des signaux brouilleurs provenant d'un système de modulation différent augmenté de bruit BBGA pour les diverses configurations d'essai spécifiées dans les Tableaux 1 et 2.

FIGURE 12

Taux SER de récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 brouillé par une liaison fixe à modulation différente et par du bruit BBGA dans une proportion donnée

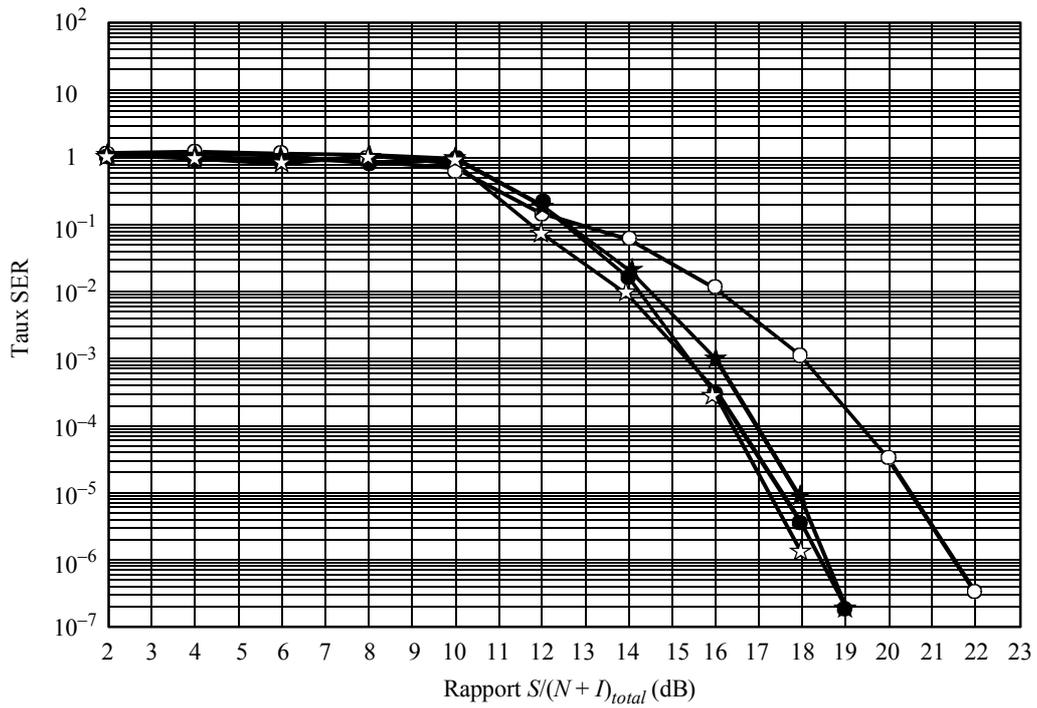


Liaison fixe utile à modulation MDP-4 affectée par une liaison fixe brouilleuse:

- Bruits/BBGA seulement
- ★ Brouillage MAQ-16 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- Brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- ☆ Brouillage MDP-4 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA

FIGURE 13

Taux SER de récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ-16 brouillé par une liaison fixe à modulation différente et par du bruit BBGA dans une proportion donnée

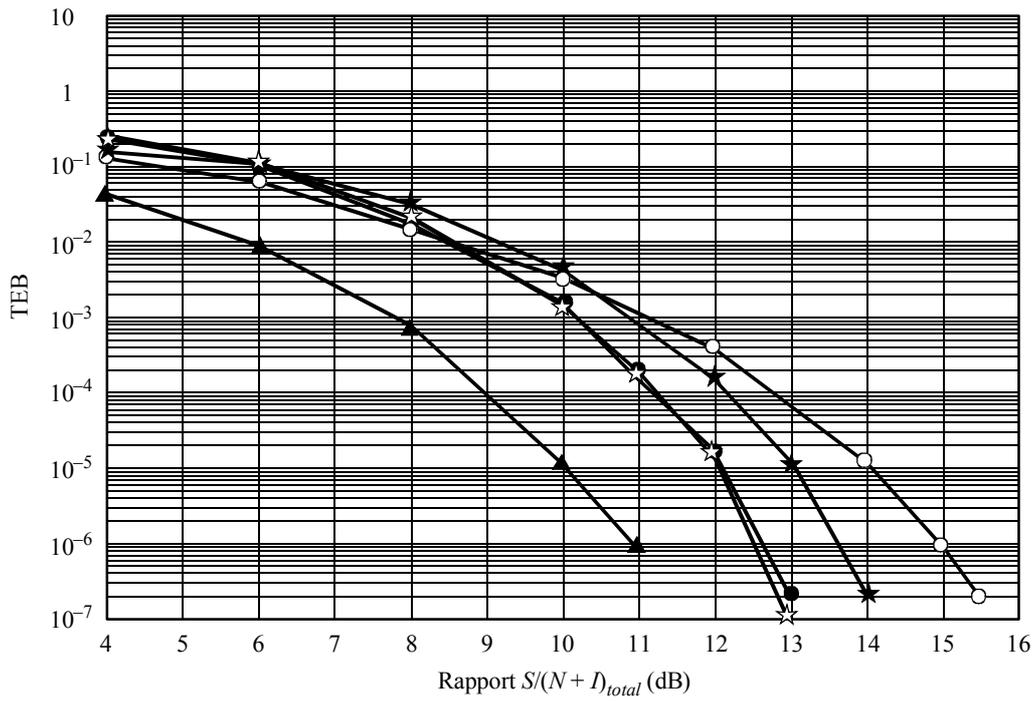


Liaison fixe utile à modulation MAQ-16 affectée par une liaison fixe brouilleuse:

- Bruit BBGA seulement
- ★ Brouillage MAQ-16 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- Brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- ☆ Brouillage MDP-4 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA

FIGURE 14

TEB de récepteur de liaison fixe utile à modulation MDF brouillé par une liaison fixe à modulation différente et par du bruit BBGA dans une proportion donnée

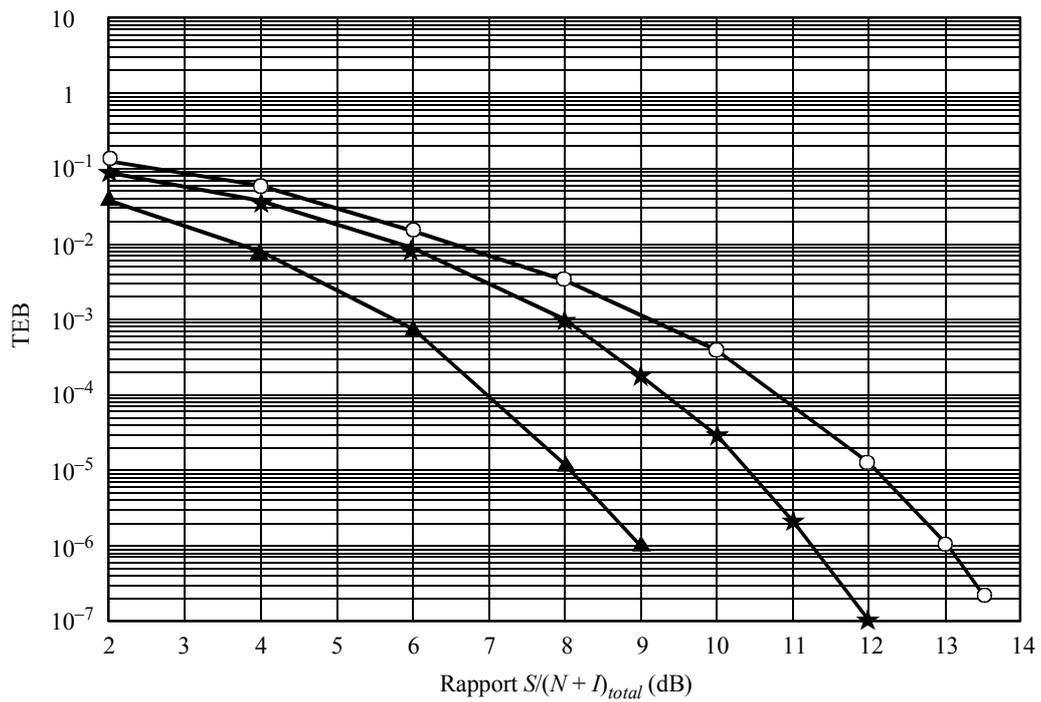


Liaison fixe utile à modulation MDF affectée par une liaison fixe brouilleuse:

- Bruit BBGA seulement
- ★— Brouillage MAQ-16 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- Brouillage MDP-8 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- ☆— Brouillage MDP-4 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA
- ▲— Brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA

FIGURE 15

TEB de récepteur de liaison fixe utile à modulation MDF brouillé par une liaison fixe à modulation différente et par du bruit BBGA dans une proportion donnée

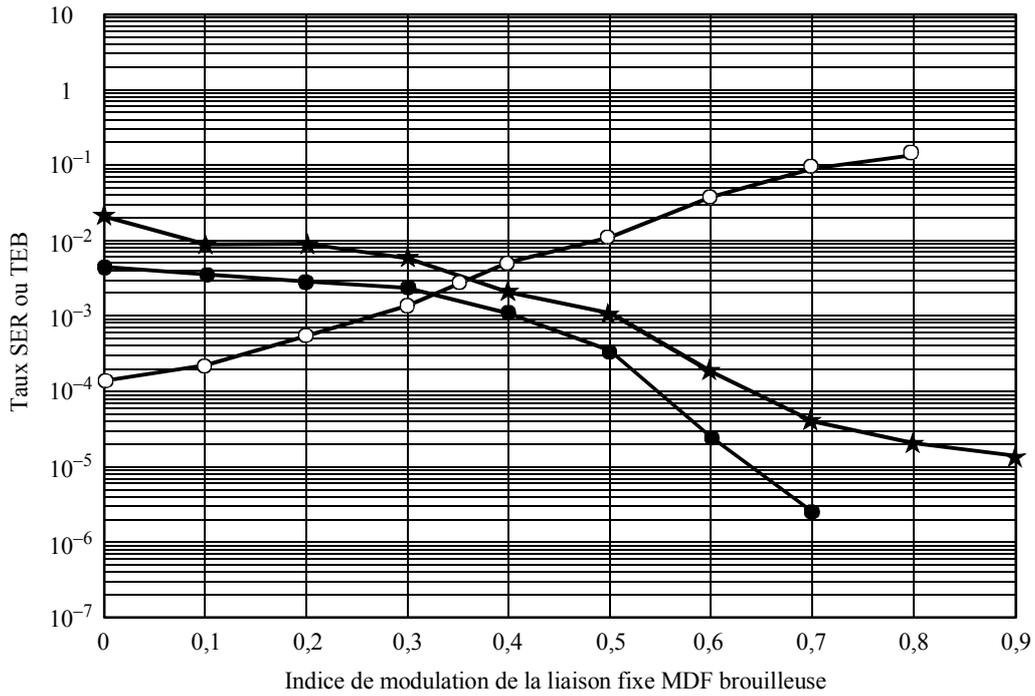


Liaison fixe à modulation MDP-4 affectée par une liaison fixe brouilleuse:

- Bruit BBGA seulement
- ★— Brouillage MDF de même niveau que celui du bruit BBGA
- ▲— Brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA

Rap 2022-15

FIGURE 16
TEB de récepteur de liaison fixe à modulation MDF, MDP-4 ou MAQ-16 brouillé par une liaison fixe à modulation MDF à indice de modulation variable

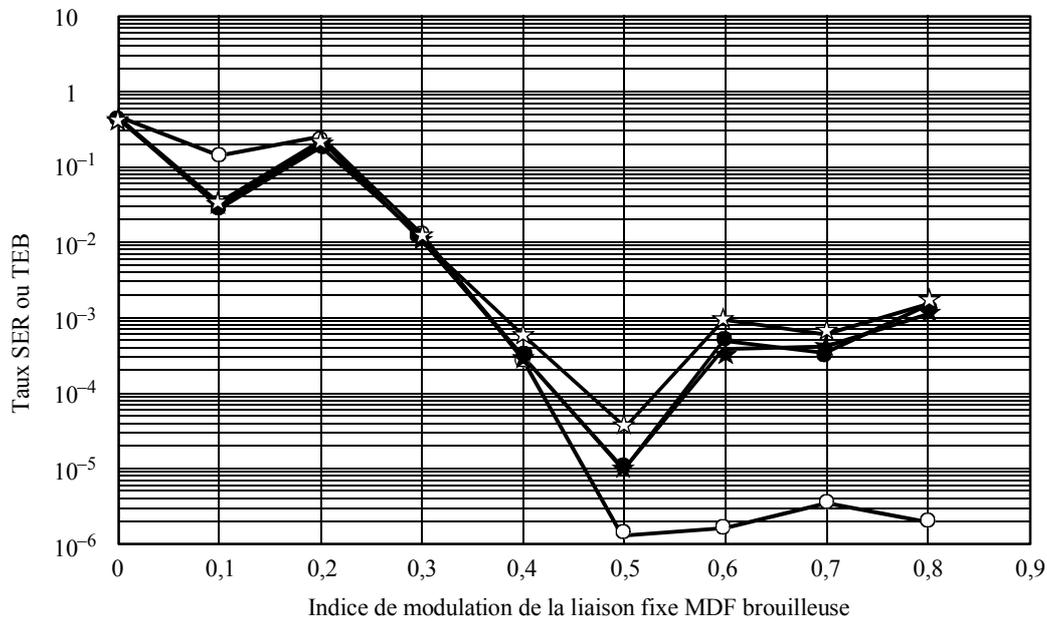


Liaison fixe utile ayant un système de modulation donné et liaison fixe brouilleuse à indice de modulation MDF variable:

- Liaison fixe utile à modulation MDF à indice de 0,45
- ★— Liaison fixe utile à modulation MDP-4
- Liaison fixe utile à modulation MAQ-16

FIGURE 17

TEB récepteur de liaison fixe utile à modulation MDF dont l'indice de modulation de l'émetteur varie et qui est brouillé par une liaison fixe à modulation MDF, MDP-4 ou MAQ-16



Liaison fixe utile ayant un système de modulation donné et liaison fixe brouilleuse à indice de modulation MDF variable:

- Modulation MDF (indice de modulation = 0,35)
- ★— Modulation MDP-4
- Modulation MDP-8
- ☆— Modulation MAQ-16

Rap 2022-17

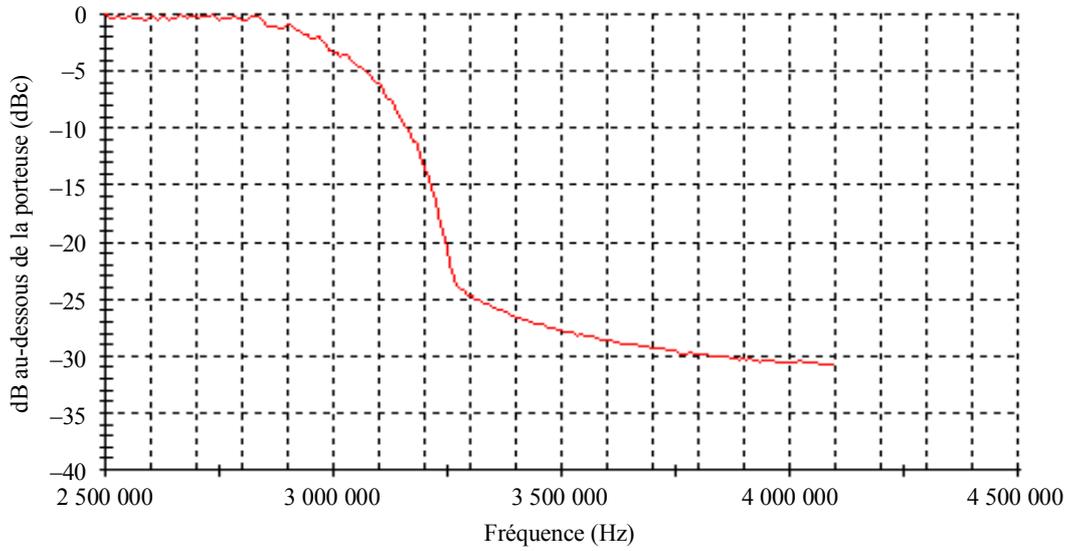
4.2 Courbes de densité spectrale de puissance des sources utile et brouilleuse

Les Fig. 18 à 21 représentent les courbes de densité spectrale de puissance des sources utile ou brouilleuse à modulation MDP-4, MAQ-16 et MDF.

Elles donnent une représentation visuelle du signal émis (bande de base) et des composantes hors bande.

FIGURE 18

Courbes de densité spectrale de puissance de liaisons fixes utiles ou brouilleuses à modulation MDP-4



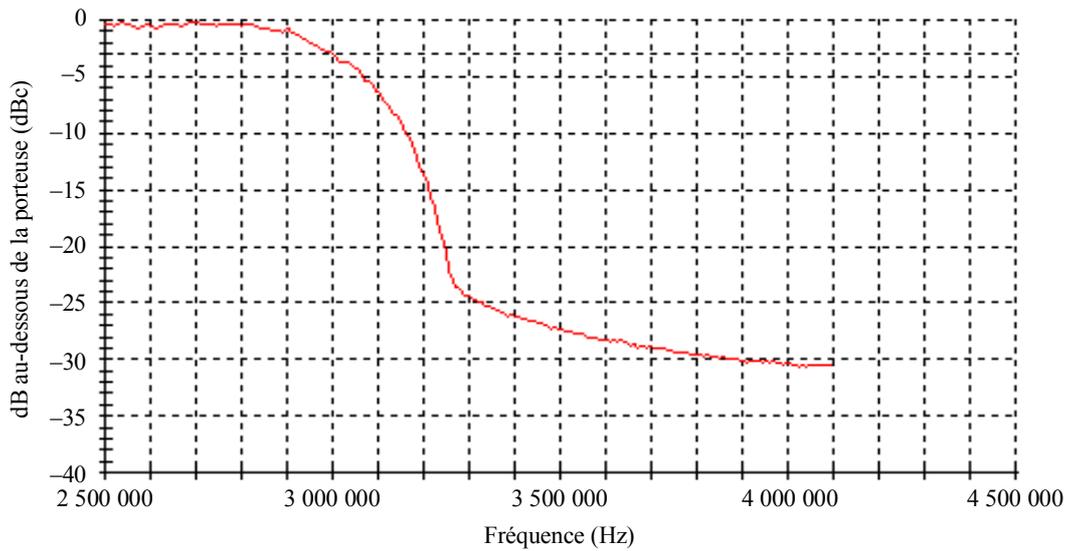
— Densité spectrale de puissance correspondant aux sources utile et brouilleuse à modulation MDP-4

Nombre de points: 1 025
 Fréquence: 2,992 MHz
 Numéro de casier: 374
 Magnitude: -3,12977

Rap 2022-18sc

FIGURE 19

Courbes de densité spectrale de puissance de liaisons fixes utiles ou brouilleuses à modulation MAQ-16



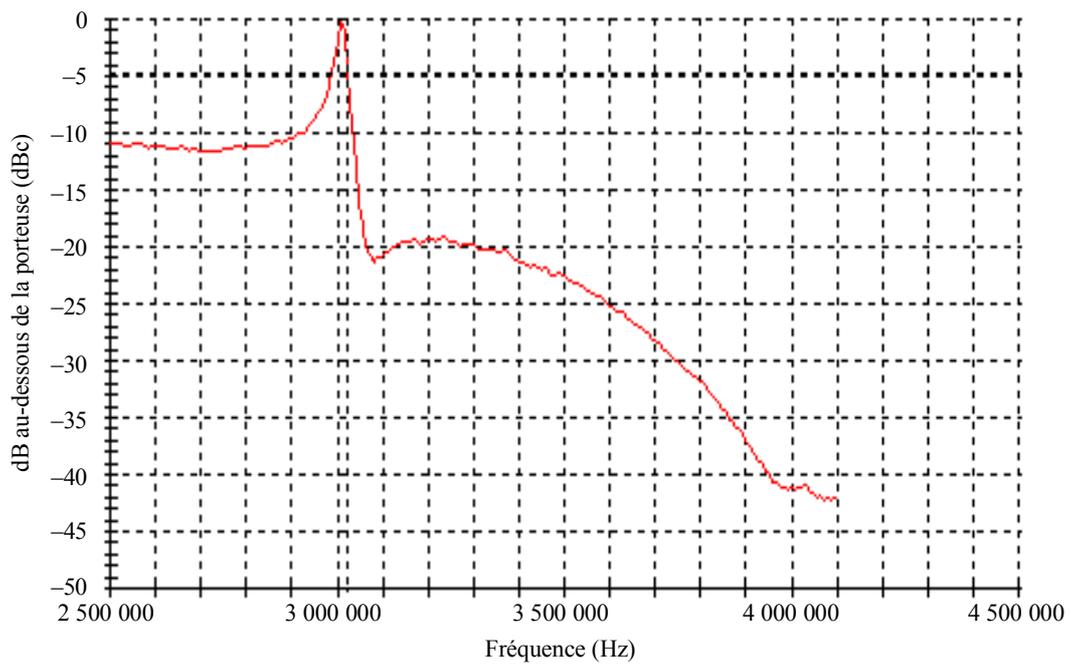
— Densité spectrale de puissance correspondant aux sources utile et brouilleuse à modulation MAQ-16

Nombre de points: 1 025
 Fréquence: 3 MHz
 Numéro de casier: 375
 Magnitude: -2,91409

Rap 2022-19sc

FIGURE 20

**Courbes de densité spectrale de puissance de liaisons utiles à modulation MDF
pour un indice à modulation de 0,45**

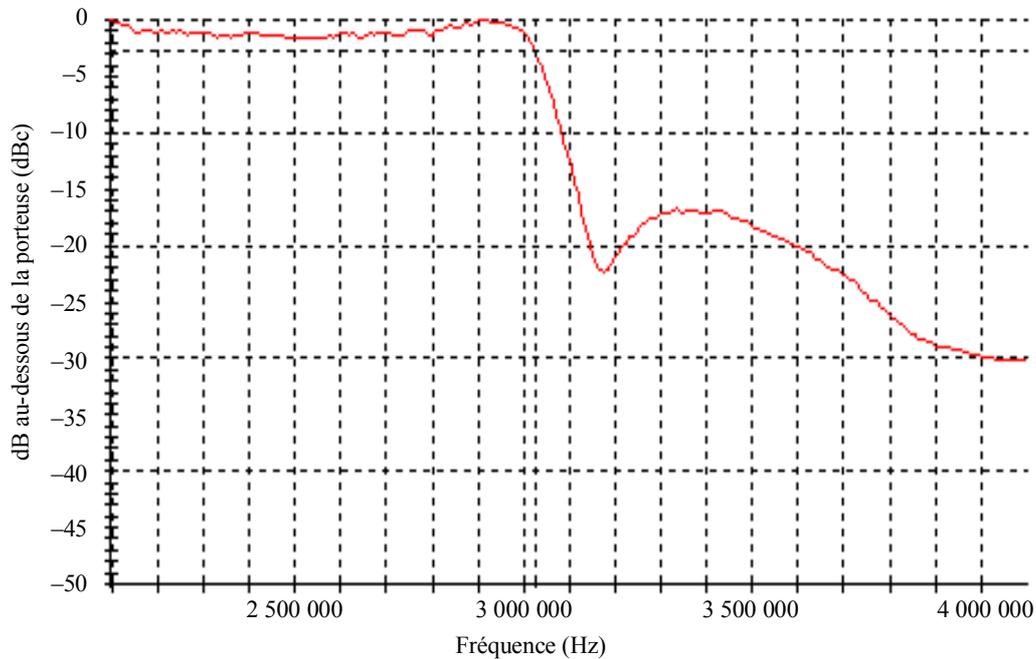


— Densité spectrale de puissance de source utile MDF (indice de modulation = 0,45)

Nombre de points: 1 025
Fréquence: 3,024 MHz
Numéro de casier: 378
Magnitude: -4,71589

FIGURE 21

**Courbes de densité spectrale de puissance de liaison utile à modulation MDF
pour un indice de modulation de 0,35**



— Densité spectrale de puissance de source utile MDF (indice de modulation = 0,35)

Nombre de points: 1 025
Fréquence: 3,024 MHz
Numéro de casier: 378
Magnitude: -2,75085

Rap 2022-21sc

4.3 Diagrammes en œil et diagramme de dispersion des liaisons fixes MDP-4 et MAQ-16 affectées par du brouillage et du bruit

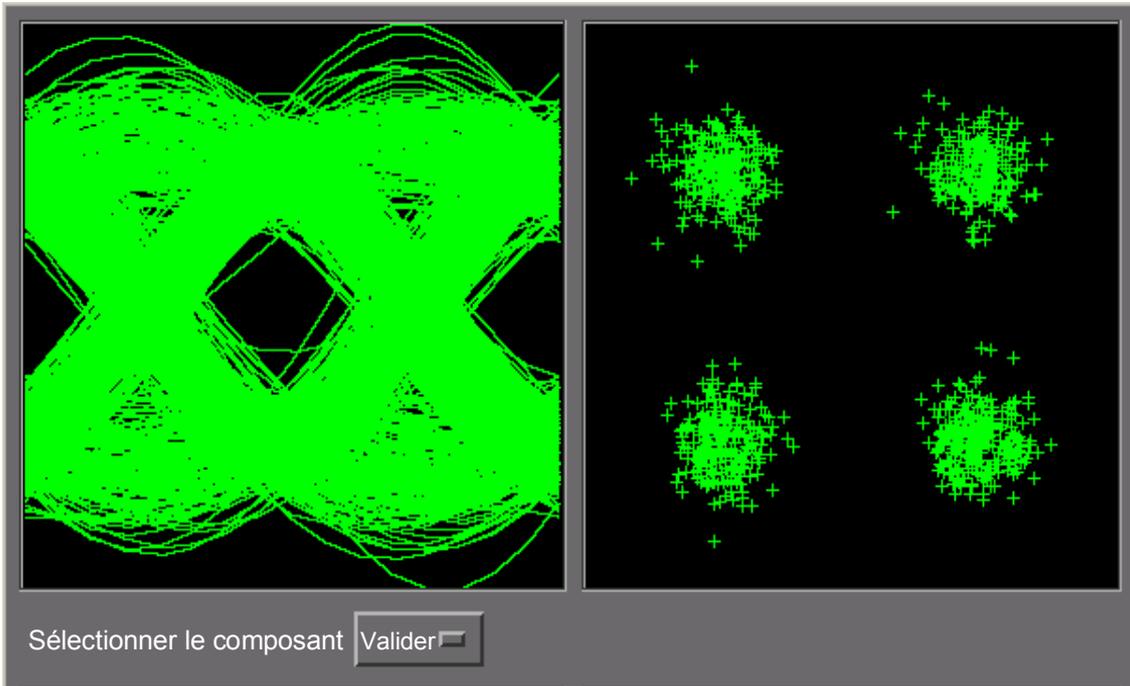
Les Fig. 22 à 35 permettent de voir comment le signal brouilleur modulé combiné à du bruit BBGA dans une proportion donnée influe sur le taux SER/TEB des liaisons fixes utiles à modulation MDP-4 ou MAQ-16.

Elles montrent la manière dont se présentent le diagramme en œil et le diagramme de dispersion ou de constellation compte tenu du rapport $S(N + I)$ approprié pour un taux SER d'environ 1×10^{-5} .

Le degré de fermeture de «l'œil» ou l'étendue de la diffusion autour de chaque point de la constellation représente visuellement l'effet du bruit et du brouillage. Un signal clair (à faible bruit) produit un «œil» large et clair ainsi qu'un minimum de diffusion des points de la constellation.

FIGURE 22

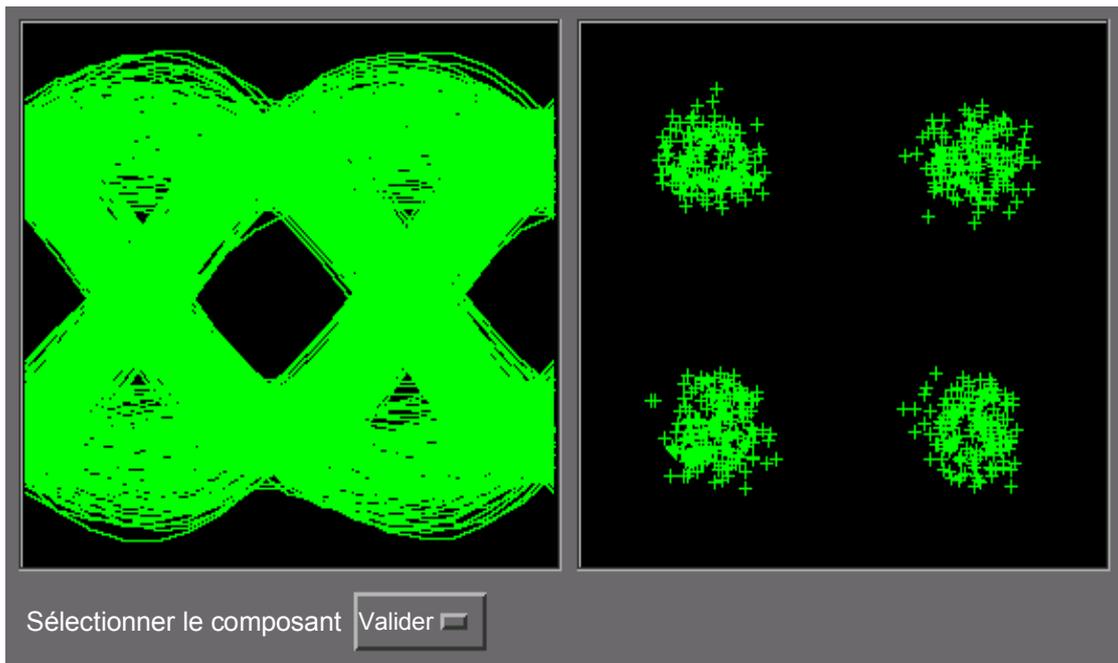
Diagramme et en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 affectée par du bruit BBGA, avec un rapport S/N de 14,5 dB (taux SER mesuré de 1×10^{-5})



Rap 2022-22sc

FIGURE 23

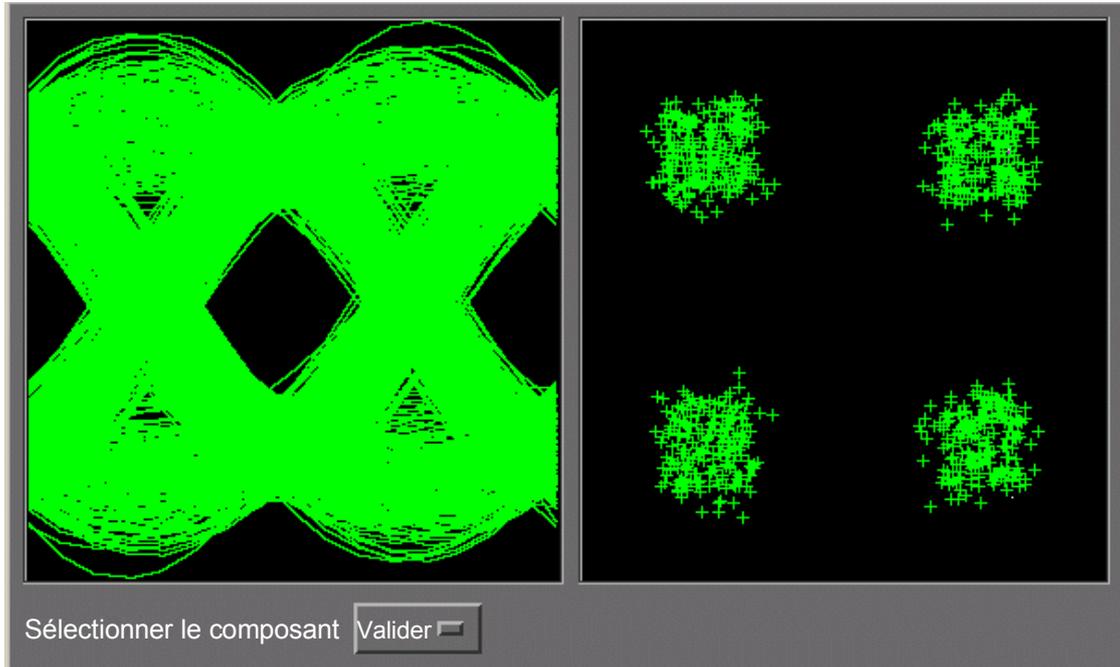
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 a brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N + I)$ total de 14,5 dB



Rap 2022-23sc

FIGURE 24

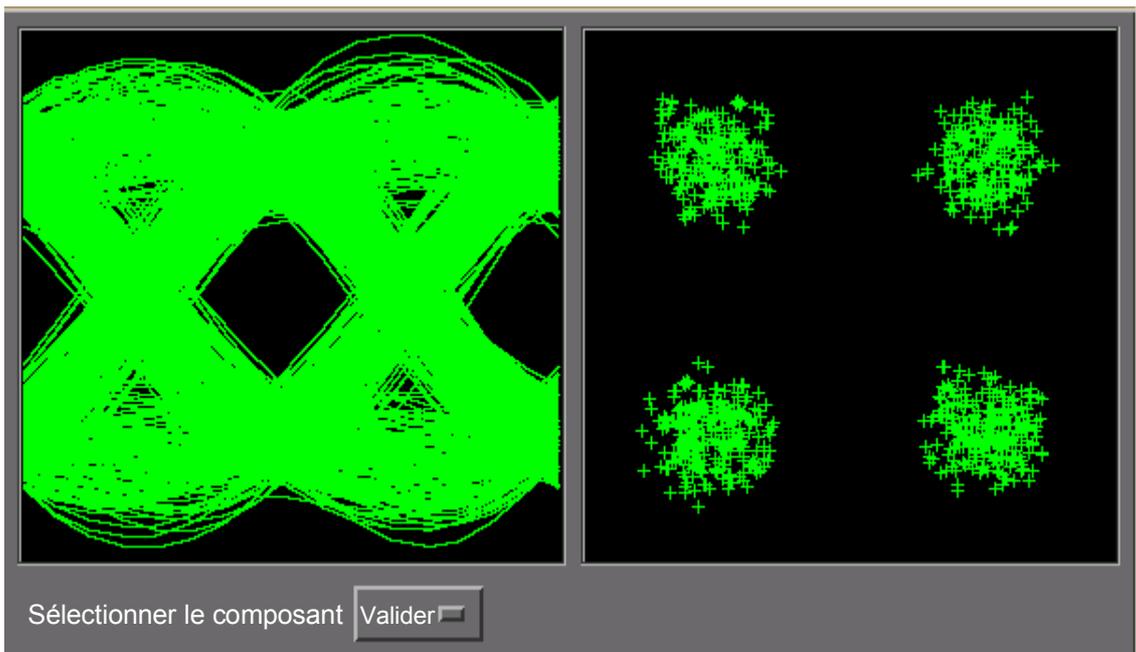
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 avec brouillage MDP-4 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N+I)$ total de 14,5 dB



Rap 2022-24sc

FIGURE 25

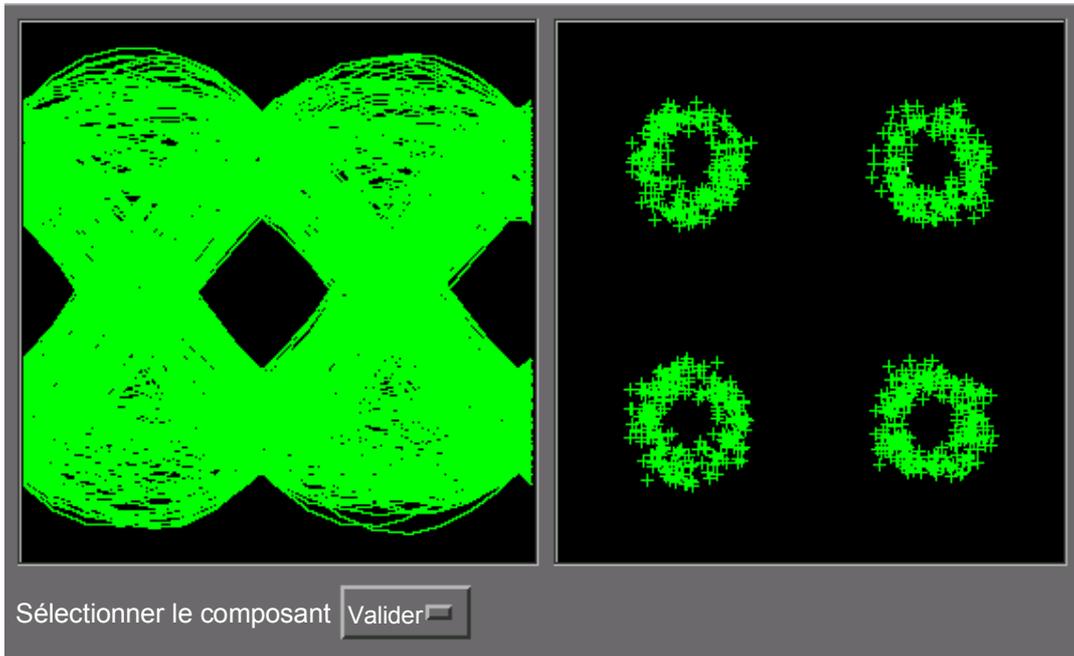
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 avec brouillage MAQ-16 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N+I)$ total de 14,5 dB



Rap 2022-25sc

FIGURE 26

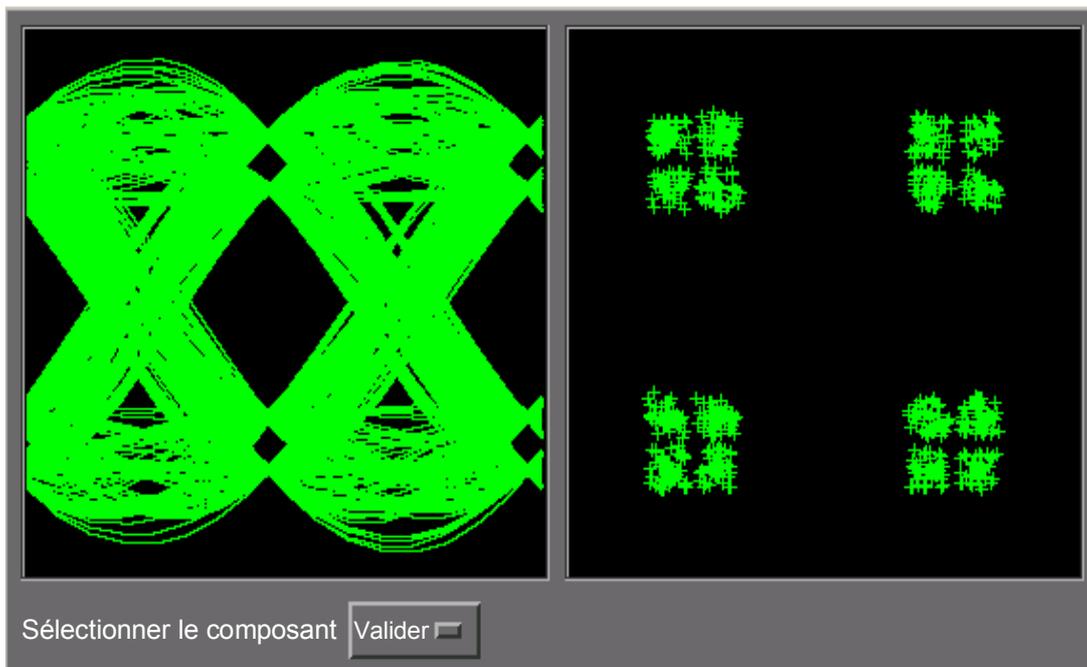
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 avec brouillage MDF à un rapport S/N de 14,5 dB



Rap 2022-26sc

FIGURE 27

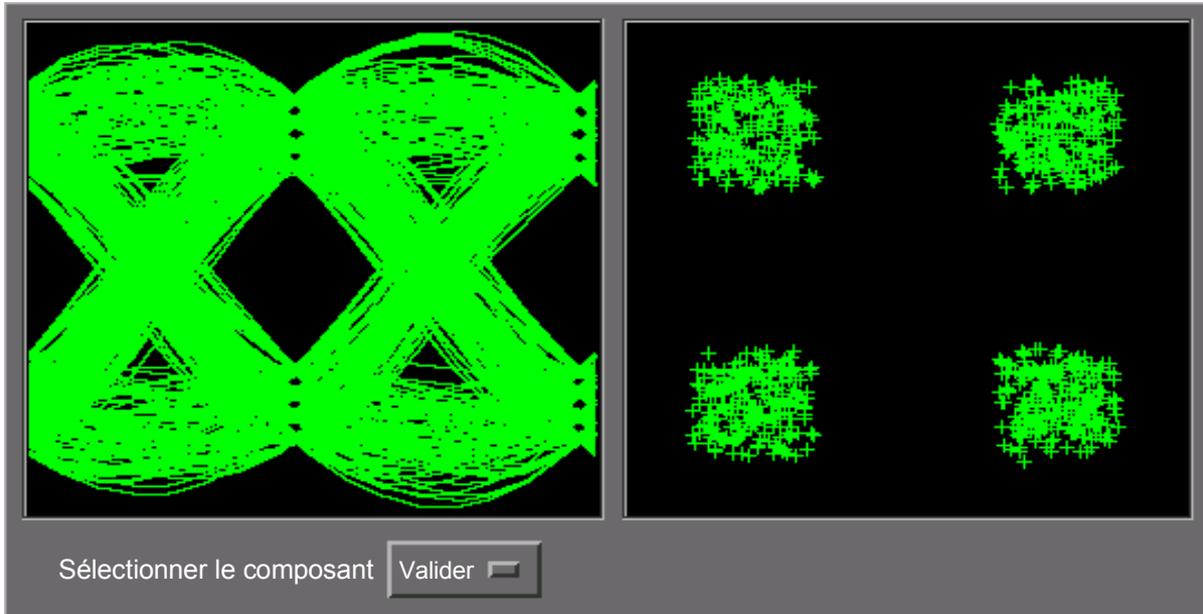
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 avec brouillage MDP-4 à un rapport S/N de 14,5 dB



Rap 2022-27sc

FIGURE 28

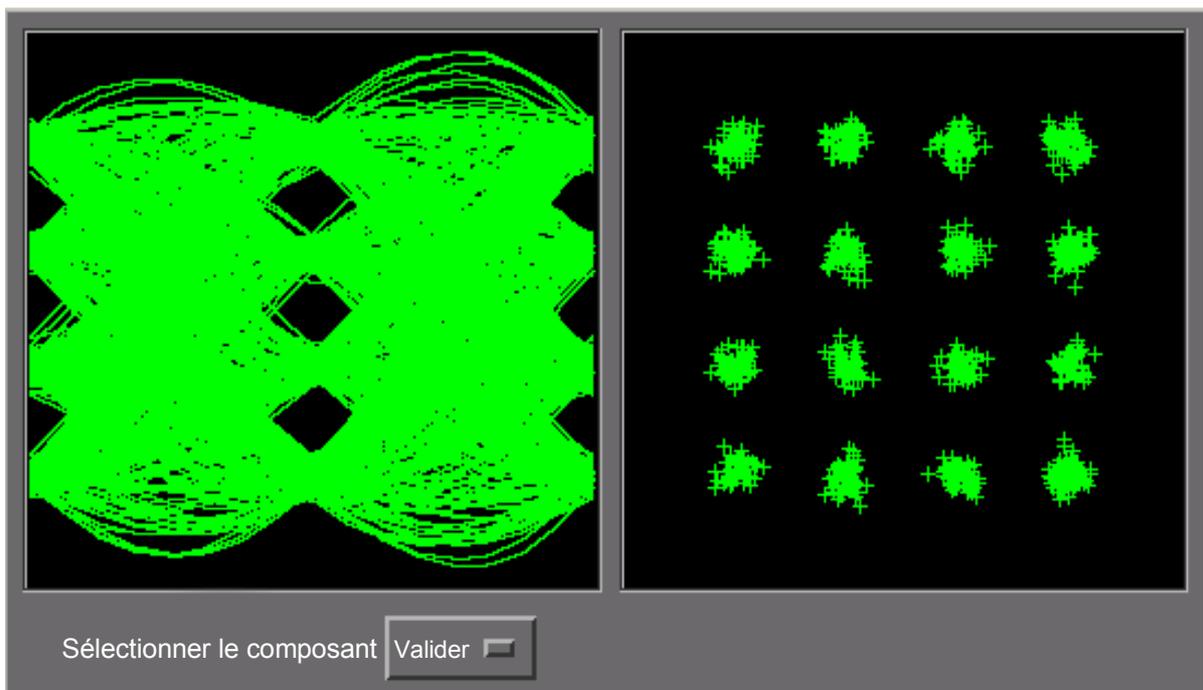
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MDP-4 avec brouillage MAQ-16 à un rapport S/N de 14,5 dB



Rap 2022-28sc

FIGURE 29

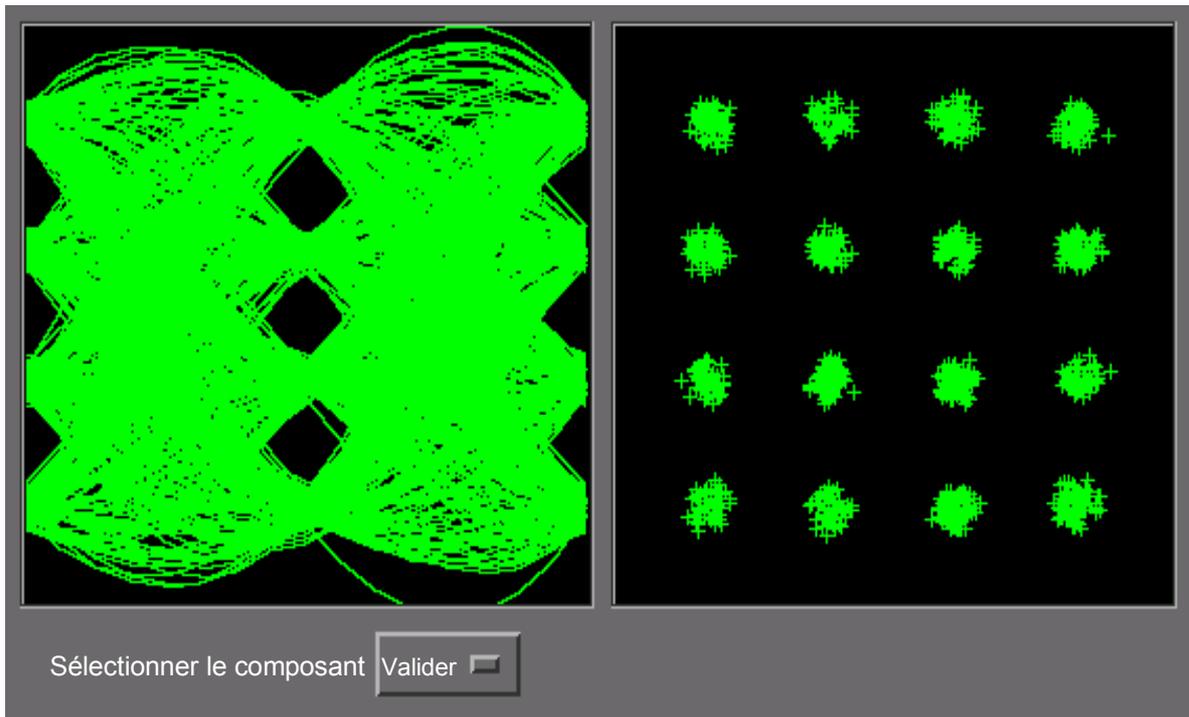
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec bruit BBGA seulement à un rapport S/N de 22,5 dB (taux SER de 1×10^{-5})



Rap 2022-29sc

FIGURE 30

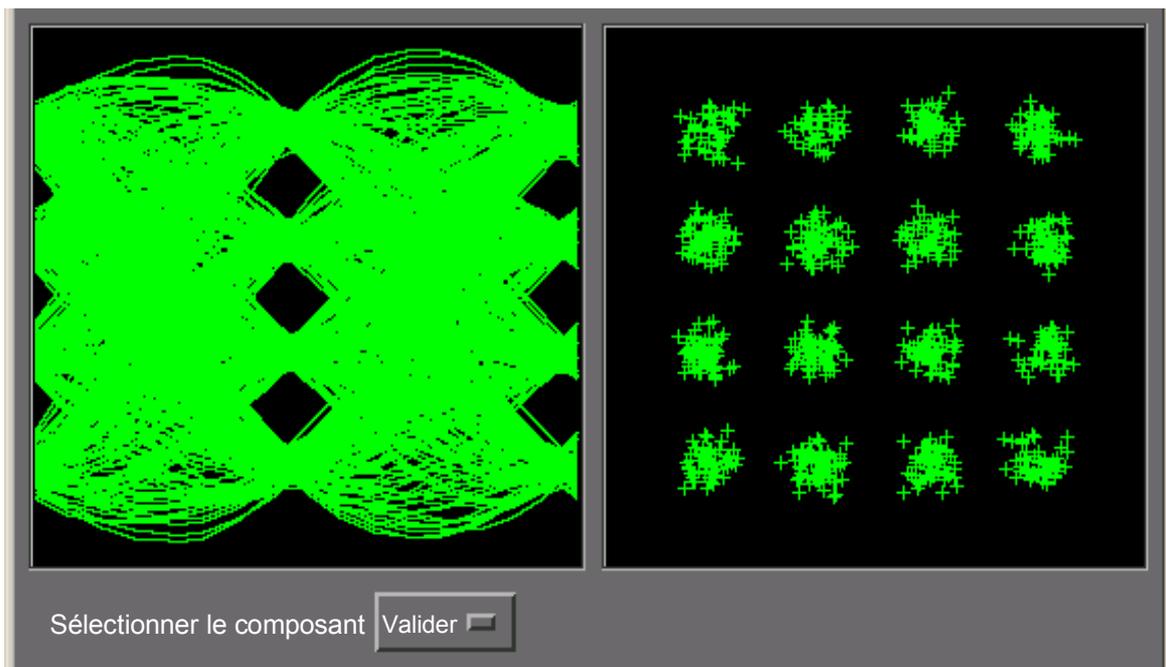
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MDF de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N+I)$ de 22,5 dB



Rap 2022-30sc

FIGURE 31

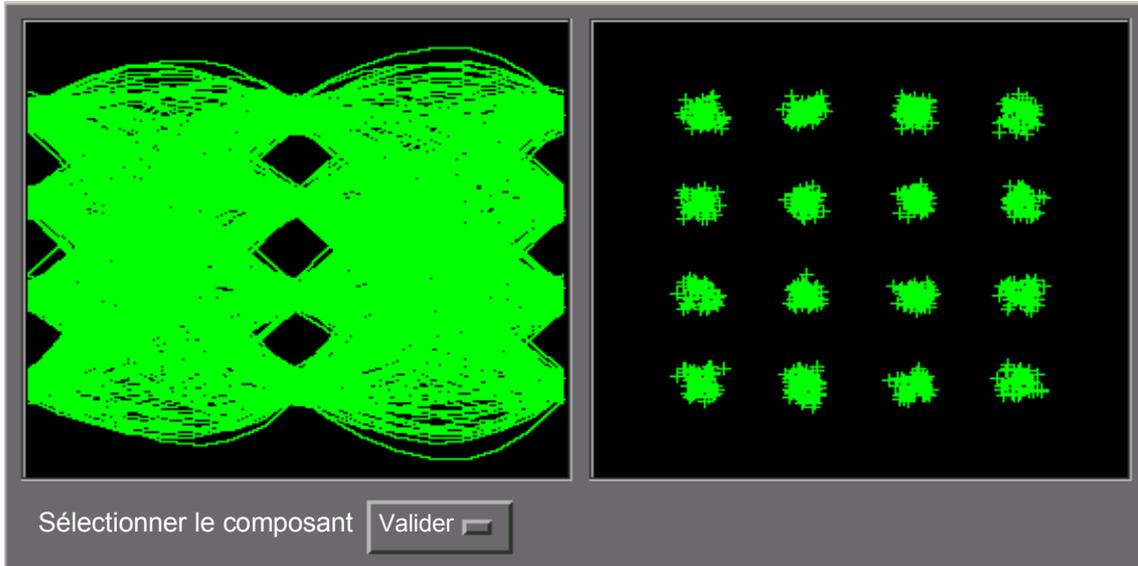
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MDP-4 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N+I)$ total de 22,5 dB



Rap 2022-31sc

FIGURE 32

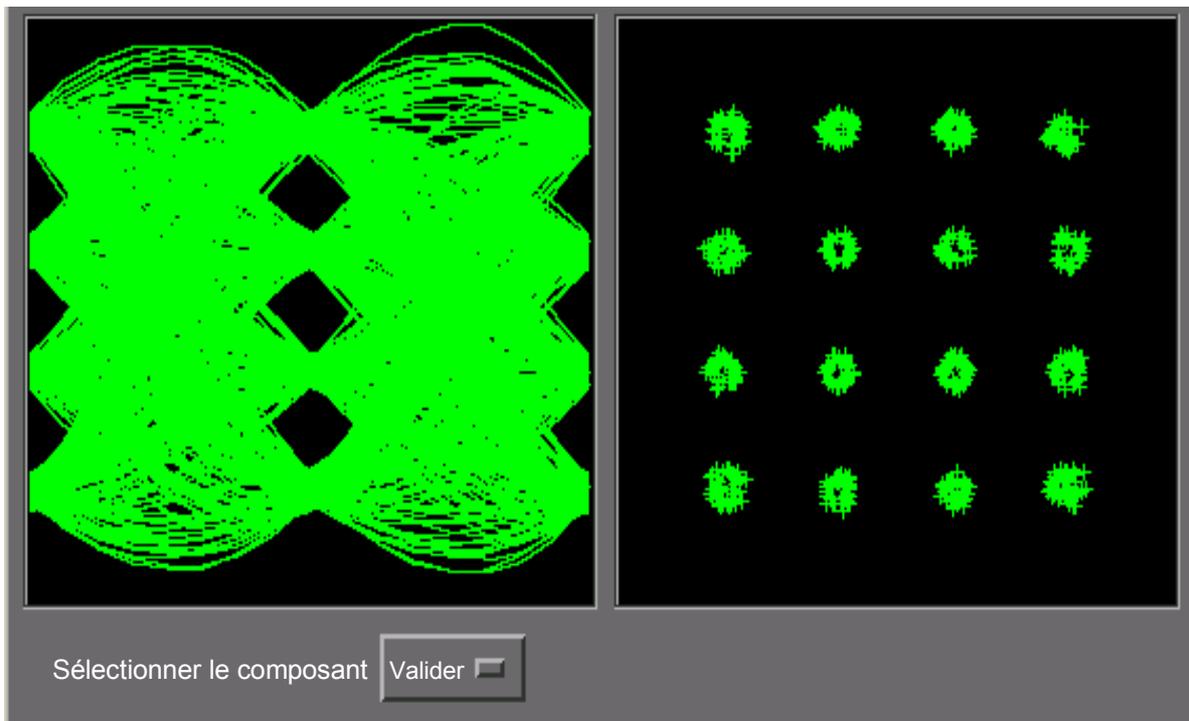
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MAQ-16 de 6 dB au-dessus du bruit BBGA à un rapport $S/(N + J)$ total de 22,5 dB



Rap 2022-32sc

FIGURE 33

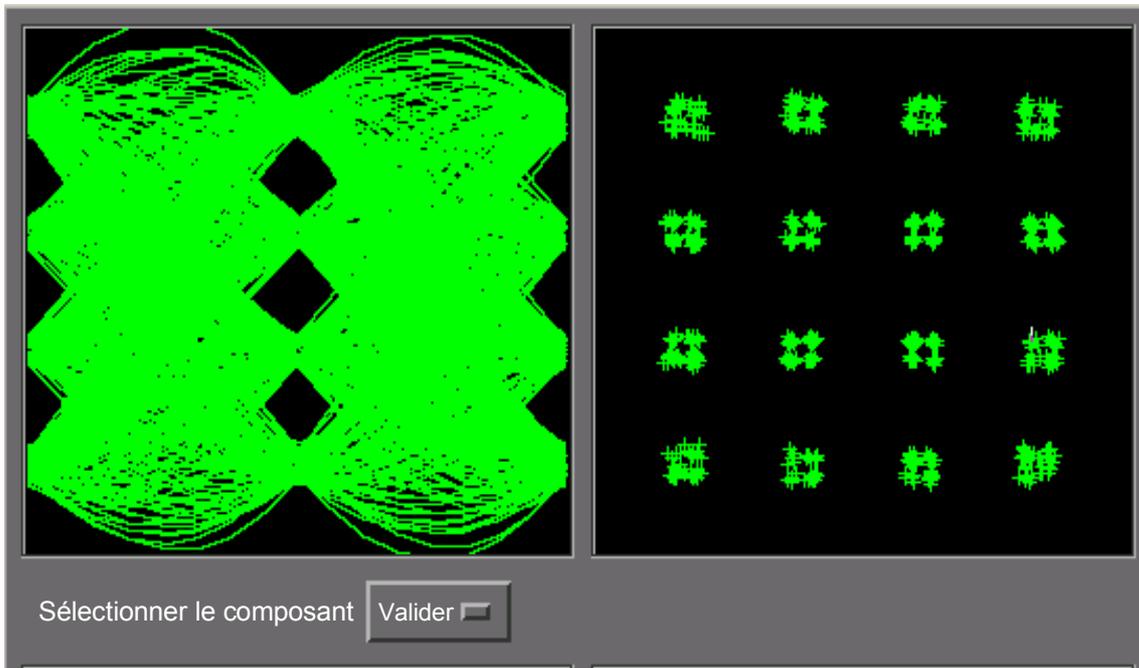
Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MDF à un rapport S/N de 22,5 dB



Rap 2022-33sc

FIGURE 34

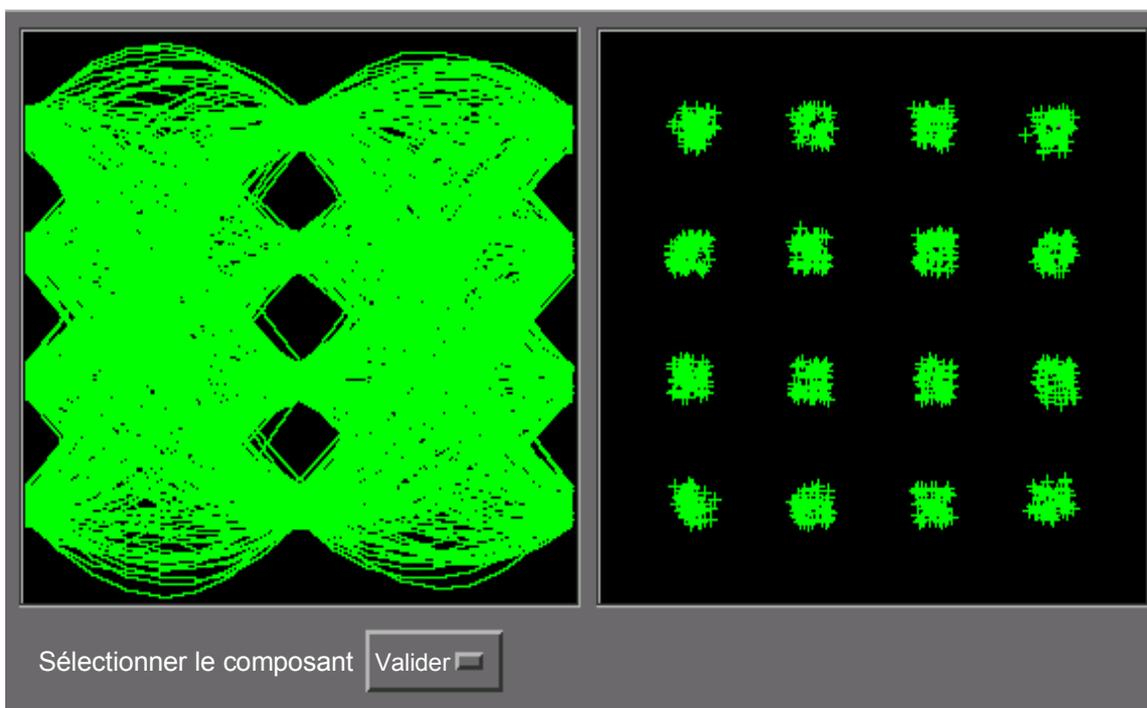
Diagramme en œil de diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MDP-4 à un rapport S/N de 22,5 dB



Rap 2022-34sc

FIGURE 35

Diagramme en œil et diagramme de dispersion d'une liaison fixe utile à modulation MAQ-16 avec brouillage MAQ-16 à un rapport S/N de 22,5 dB



Rap 2022-35sc

5 Résumé et conclusions

L'étude avait pour objet de simuler les effets, sur une liaison hertzienne typique, d'une énergie brouilleuse formée de bruit et de brouillage (provenant d'autres systèmes de modulation) dans une proportion donnée de leurs niveaux relatifs du signal.

L'efficacité spectrale potentielle et les stratégies d'assignation fondées sur les scénarios de brouillage limité susceptibles d'être les plus efficaces ont ensuite été examinées.

5.1 Amélioration obtenue en matière d'assignation et de planification des fréquences par un environnement à brouillage limité relativement à l'environnement à bruit limité

Les résultats donnés ci-après présentent l'amélioration obtenue par la planification d'un environnement à brouillage limité où le brouillage est de 6 dB au-dessus du bruit pour les liaisons fixes à modulation MDP-4, MAQ-16 ou MDF.

5.1.1 Liaison fixe utile à modulation MDP-4

Signal utile MDP-4 avec signal brouilleur de 6 dB au-dessus du bruit BBGA au taux SER de 1×10^{-5} (tiré de la Fig. 12):

Signal brouilleur	Bruit limité à (dB)	Brouillage limité à (dB)	Amélioration (dB)
MDP-4	14,5	11	3,5
MAQ-16	14,5	11,6	3
MDF	14,5	11	3,5

5.1.2 Liaison fixe utile à modulation MAQ-16

Signal utile MAQ-16 avec signal brouilleur de 6 dB au-dessus du bruit BBGA au taux SER de 1×10^{-5} (tiré de la Fig. 13):

Signal brouilleur	Bruit limité à (dB)	Brouillage limité à (dB)	Amélioration (dB)
MDP-4	20,6	17,2	3,4
MAQ-16	20,6	17,8	2,8
MDF	20,6	17,6	3

5.1.3 Liaison fixe utile à modulation MDF

Signal utile MDF avec signal brouilleur de 6 dB au-dessus de bruit BBGA à un TEB de 1×10^{-5} (tiré de la Fig. 14):

Signal brouilleur	Bruit limité à (dB)	Brouillage limité à (dB)	Amélioration (dB)
MDP-8	12,2	10,2	2
MDP-4	12,2	10,2	2
MAQ-16	12,2	11	1,2
MDF	12,2	8	4,2

5.2 L'effet sur les systèmes de réception MDP-4 et MAQ-16 s'est avéré de 2,8 à 3,5 dB plus tolérant du total de la puissance brouilleuse entrant dans le démodulateur lorsque cette puissance est formée de brouillage provenant de systèmes de modulation couramment utilisés à un niveau de 6 dB au-dessus du bruit BBGA.

5.3 L'effet sur les systèmes de réception MDF s'est avéré de 1,2 à 4,2 dB plus tolérant à la puissance brouilleuse totale entrant dans le démodulateur lorsque cette puissance est formée de brouillage émanant de systèmes de modulation couramment utilisés à un niveau de 6 dB au-dessus du bruit BBGA.

5.4 Ce qui précède permet de conclure que la planification dans un environnement à brouillage limité sera d'environ 2,8 à 3,5 dB plus avantageuse que la planification sur la base du bruit BBGA seulement dans le cas des systèmes de réception MDP-4 et MAQ-16.

En ce qui concerne les systèmes de réception MDF, la planification dans un environnement à brouillage limité sera d'environ 1,2 à 4,0 dB plus avantageuse que celle effectuée sur la base du bruit BBGA.

5.5 Les systèmes de réception MDP-4 et MAQ-16 ont un comportement satisfaisant en présence de brouillage provenant de systèmes ayant un indice de modulation élevé ($> 0,35$).

5.6 Le TEB des systèmes de réception MDF se dégrade en présence de brouillage MDF en fonction de l'accroissement de l'indice de modulation.

5.7 Le système de réception MDF à indice de modulation de 0,5 se comporte de manière satisfaisante en présence de signaux brouilleurs provenant de systèmes à modulation MDP-4, MAQ-16 et MDF (indice de modulation 0,35).

5.8 Un assouplissement de 3 dB du rapport du signal utile au signal brouilleur a pour effet de permettre un rapprochement physique plus grand des assignations aux liaisons fixes. Partant de l'hypothèse d'un terrain moyen et d'un affaiblissement sur le trajet de $35 \log$ (distance), l'assouplissement de 3 dB équivaut à réduire d'un facteur 1,218 la distance à l'émetteur cocanal brouilleur le plus proche. Ensuite, l'hypothèse d'un environnement homogène à grande échelle se traduit par une augmentation de la densité de remplissage de près de 50%, amélioration qui s'ajoute à celle de 130% [CISPR, 1993] pouvant être obtenue par le simple passage à la planification à brouillage limité, toujours dans l'hypothèse que l'énergie brouilleuse totale est de nature gaussienne.

PARTIE B

Mesures

1 Introduction

La Partie B traite de la situation dans laquelle la liaison fixe numérique est exposée à un brouillage de nature impulsionnelle (à large bande et à bande étroite) et non le brouillage classique du bruit BBGA et d'une onde sinusoïdale non modulée.

Pour mesurer le brouillage au niveau de ses effets sur les systèmes de télécommunication numériques, il convient de préciser l'effet de brouillage. Les effets sur les services de télécommunication dépendent du type de brouillage, à bande étroite ou à large bande, de la cadence des impulsions, etc. La Partie B commence par des explications relatives à la notion classique de pondération des impulsions vis-à-vis des systèmes radioélectriques, introduit ensuite la notion de pondération des brouillages imposés aux systèmes de télécommunication numériques et présente ensuite des résultats expérimentaux relatifs aux courbes de pondération.

2 Détecteurs existants – Présentation

2.1 Caractéristiques du détecteur de quasi-crête (QP) du Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR)

La définition du détecteur QP est fondée sur l'application des lois psychophysiques (psycho-acoustiques pour la radiodiffusion sonore et psycho-optiques pour la télévision). Il est en particulier nécessaire de pondérer le bruit impulsionnel provenant de moteurs électriques et de moteurs à allumage commandé, par exemple. L'effet d'un brouillage par impulsions est plus marqué si la fréquence de répétition est élevée que si elle est faible, ce qui explique les courbes de pondération de la Fig. 36.

Il convient d'ajouter que l'effet du brouillage à bande étroite est généralement de 10 dB plus élevé que celui du brouillage impulsionnel, élément dont on doit tenir compte dans des limites différentes pour les perturbations à bande étroite et à large bande (limites pour la moyenne et le détecteur QP).

La réalisation du détecteur QP est décrite dans la norme CISPR 16-1. Elle requiert différentes valeurs pour la largeur de bande de résolution, les moments auxquels le détecteur se charge et se décharge ainsi que la constante de temps de l'appareil indicateur.

2.2 Caractéristiques d'autres détecteurs

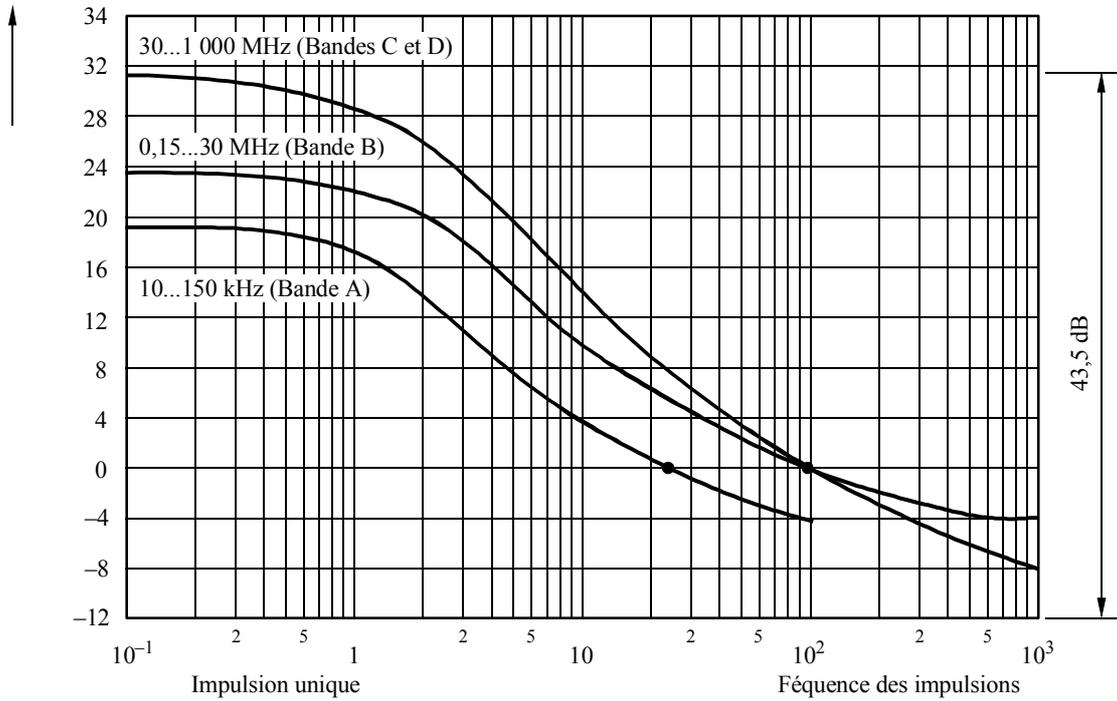
D'autres détecteurs sont décrits dans la publication CISPR 16-1: les détecteurs de crête, de moyenne et de valeur quadratique moyenne (voir la Fig. 37).

Le détecteur de crête suit le signal à la sortie du détecteur d'enveloppe IF et maintient la valeur crête jusqu'à ce que la décharge se produise. L'indication est indépendante de la fréquence de répétition des impulsions. Au moyen du détecteur de crête, on peut mesurer la valeur crête d'un signal au cours d'une période d'observation donnée. Cela est possible avec les composants modernes qui présentent l'avantage de temps de réaction courts. C'est la raison pour laquelle la méthode est très appréciée pour l'exploration des émissions avant d'appliquer le détecteur de pondération approprié à des émissions délicates.

FIGURE 36

Courbes de pondération des récepteurs de mesure de QP pour les différentes gammes de fréquences définies dans la norme CISPR 16-1

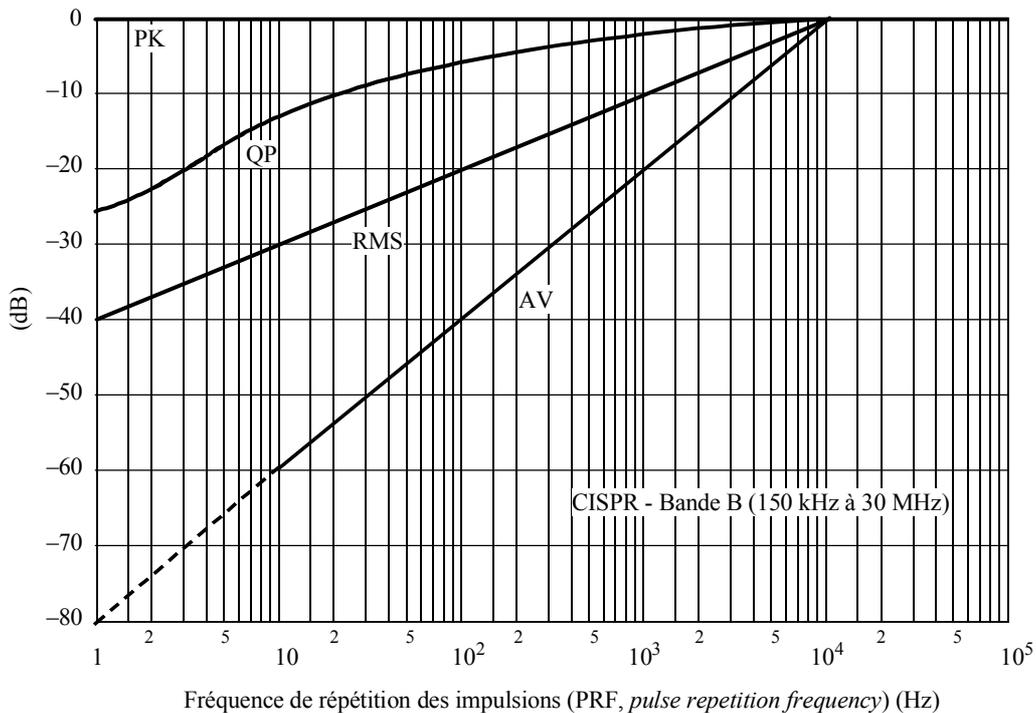
Niveau d'entrée relatif pour une indication constante (dB)



Rap 2022-36

FIGURE 37

Courbes de pondération des détecteurs de crête (PK), de QP, de valeur quadratique moyenne (RMS) et de moyenne (AV) dans la Bande B - CISPR



Rap 2022-37

Le détecteur de moyenne détermine la moyenne linéaire du signal à la sortie du détecteur d'enveloppe IF. Depuis 1985, le CISPR spécifie les limites des émissions au moyen du détecteur de moyenne en plus du détecteur de quasi-crête pour les rayonnements de conduction mesurés au moyen d'un réseau LISN et d'une pince absorbante. L'application des limites d'émission au détecteur de valeur moyenne, a conduit à l'omission de la procédure hasardeuse de la discrimination bande étroite/large bande. Une constante moyenne de temps du détecteur (100 ms) s'appliquant aux émissions à variation lente est en cours d'examen. Il s'agit d'empêcher les signaux bande étroite de brève durée d'être supprimés par le moyennage.

Le détecteur de mesure quadratique détermine la valeur RMS du signal à la sortie du détecteur d'enveloppe IF. Il est décrit dans la norme CISPR 16-1 mais n'a, jusqu'à présent, aucune application pratique dans la mesure des perturbations électromagnétiques. La 2ème édition (1972) de la norme CISPR 1 indique qu'en raison des premiers travaux du CISPR, le détecteur de QP a été retenu, mais des expériences ultérieures ont montré qu'un voltmètre efficace permettrait d'obtenir une évaluation plus précise (de l'effet brouilleur sur des liaisons radioélectriques analogiques).

2.3 Répartition de probabilité des amplitudes

La répartition des amplitudes APD est une base appropriée pour calculer l'effet du brouillage sur un canal radioélectrique. La technique APD [Uchino et autres, 1997] n'est pas une détection de pondération parce qu'elle ne donne pas un résultat de mesure par fréquence mais la probabilité d'apparition de certaines amplitudes en fonction de l'amplitude. Le CISPR a récemment proposé de normaliser la technique APD.

3 Services de radiocommunication numérique

3.1 Considérations générales

Tous les services radioélectriques modernes utilisent des systèmes de modulation numériques. Cela s'applique non seulement aux applications mobiles mais aussi aux futures émissions sonores et de télévision. Les systèmes utilisent des procédures de compression des données et de traitement des signaux analogiques (voix et image) en combinaison avec la redondance des données pour la correction des erreurs. Généralement, le système a la capacité de corriger les erreurs jusqu'à un niveau de TEB donné, ce qui permet une réception parfaite.

3.2 Caractéristiques du système

Alors que les systèmes radioélectriques analogiques nécessitent des rapports S/N de l'ordre de 40 dB pour que le fonctionnement soit satisfaisant, les systèmes de radiocommunication numériques permettent un fonctionnement exempt d'erreurs avec un rapport S/N d'à peine 10 dB, par exemple. Toutefois, la zone de transition entre le fonctionnement sans erreur et le mauvais fonctionnement est étroite. Pour cette raison, les directives de planification pour la radio numérique sont fondées sur une couverture de près de 100%. Lorsque le récepteur numérique fonctionne à faible niveau d'entrée, la sensibilité au brouillage radioélectrique est grande. En réception mobile, la sensibilité au brouillage radioélectrique est aggravée par le problème de la propagation par trajets multiples.

4 Pondération des perturbations des systèmes de télécommunication numérique

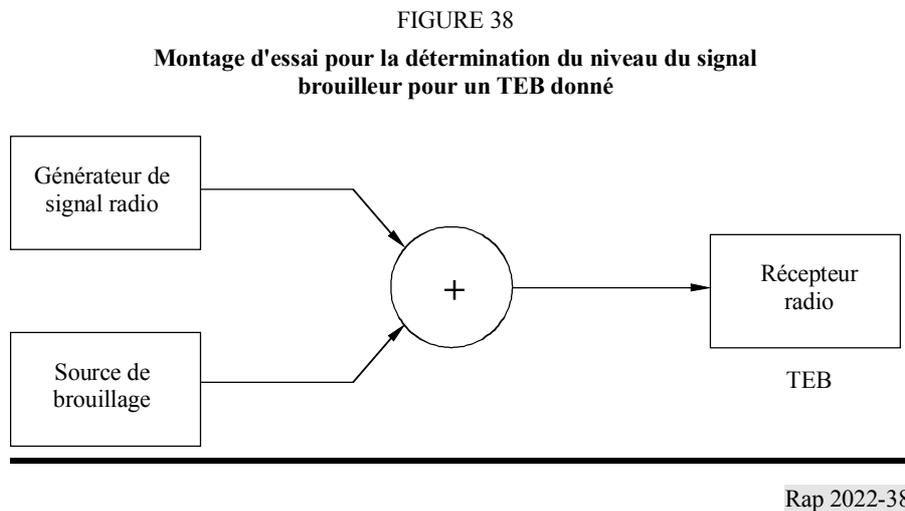
L'importance de ce sujet a été reconnue par le CISPR et par l'UIT-R. A l'UIT, les travaux viennent tout juste de commencer, et beaucoup reste à faire: déterminer l'effet de brouillage, trouver un compromis relatif à un détecteur de pondération, y compris la largeur de bande de mesure, définir les limites, etc.

4.1 Principe de mesure

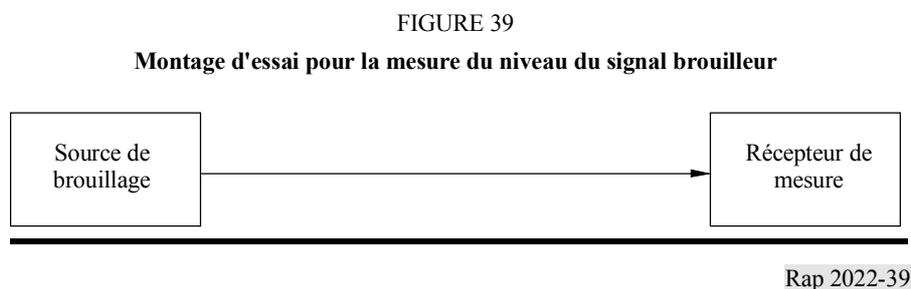
La signification de la courbe de pondération est montrée à la Fig. 36: l'effet d'une impulsion de 100 Hz sur un auditeur de programme audio équivaut à l'effet d'une impulsion de 10 Hz dont le niveau est augmenté de 10 dB. Par analogie avec ce qui précède, une source de brouillage ayant des caractéristiques données produirait un TEB donné, par exemple 1×10^{-3} , lorsque le signal brouilleur est ajouté, à la réception, au signal utile. Le TEB dépendra par exemple de la fréquence de répétition des impulsions et des caractéristiques analogues du signal brouilleur. Pour maintenir le TEB à un niveau constant, il faut faire varier le niveau du signal brouilleur. Ces variations du niveau par rapport à la fréquence de répétition des impulsions déterminent la fonction de pondération.

Celle-ci peut être mesurée en deux étapes:

Etape 1: Déterminer le niveau requis du signal brouilleur pour un TEB constant (Fig. 38).



Etape 2: Mesurer le niveau du signal brouilleur au moyen d'un récepteur de mesure utilisant une méthode de pondération spécifiée (Fig. 39).



Si l'indication de niveau du récepteur de mesure reste constant pour tous les niveaux de signal brouilleur qui produisent un TEB constant, la courbe de pondération idéale est trouvée.

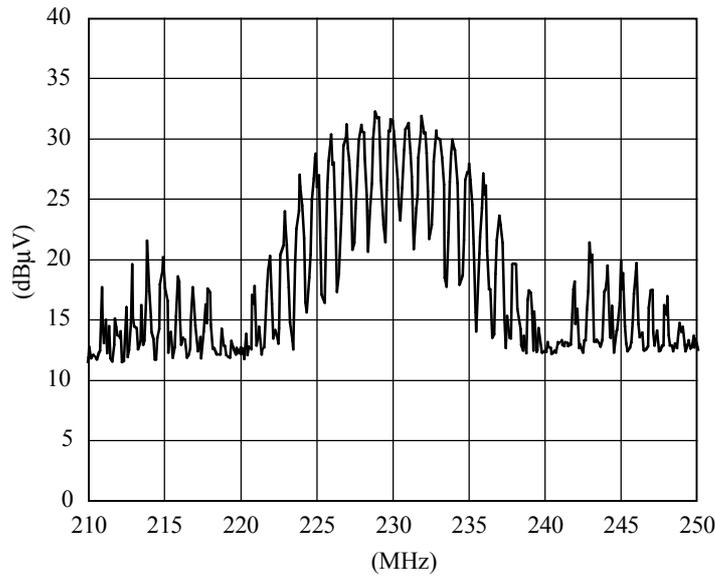
Les divers systèmes de télécommunication numériques ne répondent pas de manière identique à divers types de signal brouilleur. Pour cette raison, il convient de trouver un compromis s'appliquant aux systèmes de télécommunication numériques les plus importants.

4.2 Signaux brouilleurs

On peut utiliser un générateur de signal à capacité de modulation par impulsions pour produire le signal brouilleur. Pour que les mesures soient correctes, le modulateur d'impulsions doit présenter un rapport marche/arrêt élevé, supérieur à 60 dB. Au moyen de la largeur d'impulsion appropriée, le spectre de brouillage peut être à large bande ou à bande étroite, la définition des deux notions étant relative au canal de télécommunication. Les Fig. 40 et 41 donnent des exemples de spectre de brouillage utilisé pour déterminer les fonctions de pondération.

FIGURE 40

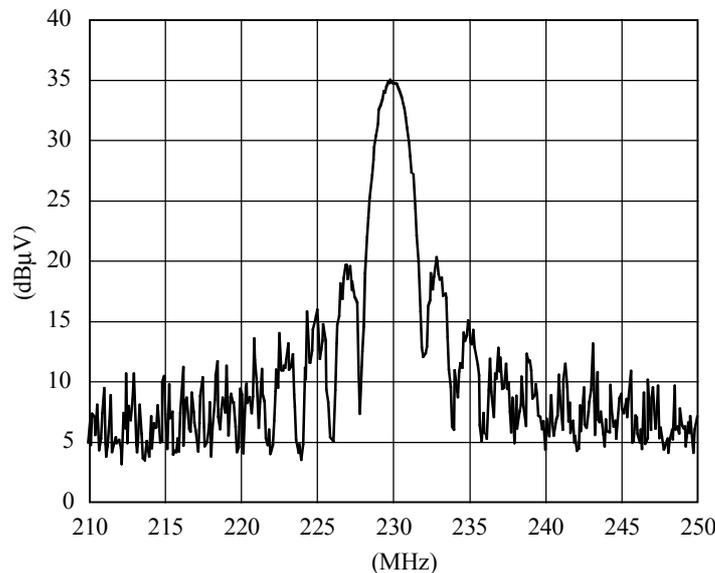
Signal brouilleur constitué d'une largeur d'impulsion de $0,1 \mu\text{s}$ avec une fréquence de répétition des impulsions de 1 MHz. Le niveau du générateur de signal est de $47 \text{ dB}\mu\text{V}$. Le spectre ci-dessus a été mesuré au moyen d'une largeur de bande d'impulsion de 1 MHz et du détecteur de crête



Rap 2022-40

FIGURE 41

Signal brouilleur constitué d'une largeur d'impulsion de $0,5 \mu\text{s}$ et d'une fréquence de répétition des impulsions de 0,5 MHz. Le niveau de générateur de signal est de $37 \text{ dB}\mu\text{V}$. Le spectre ci-dessus a été mesuré au moyen d'une largeur de bande d'impulsion de 1 MHz et du détecteur de crête



Rap 2022-41

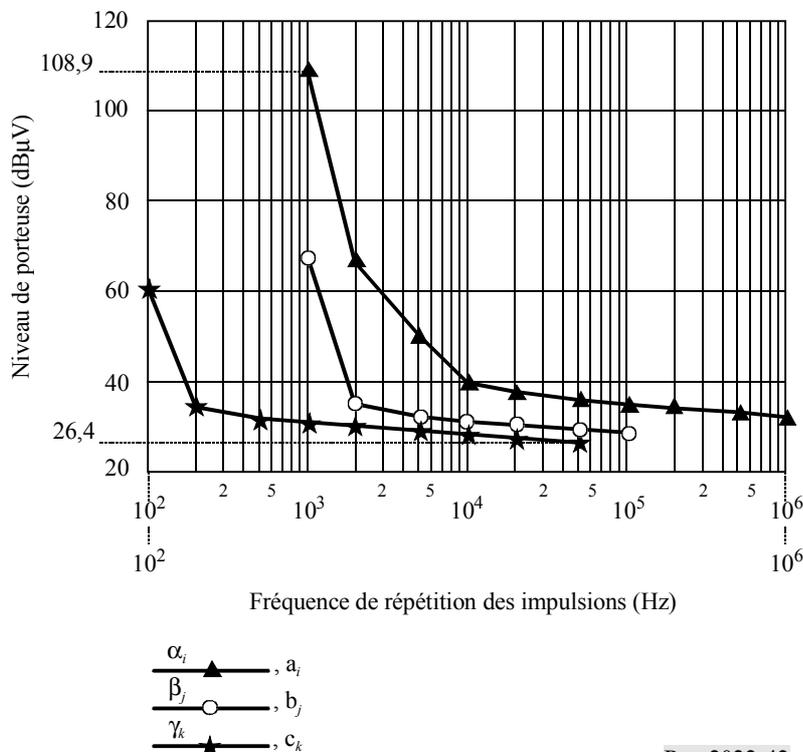
En plus des signaux à modulation par impulsions, des signaux MA et des signaux non modulés ont été utilisés pour déterminer la sensibilité des divers systèmes aux différents types d'impulsion électromagnétique.

4.3 Exemple expérimental 1: radiodiffusion vidéonumérique par câble

A titre de premier exemple, on a déterminé la sensibilité de la radiodiffusion vidéonumérique par câble (DVB-C) aux perturbations électromagnétiques. La version câble de la radiodiffusion DVB est constituée d'un signal MAQ-64 avec une rapidité de modulation de 6,9 Msymboles/s. Le spectre du signal s'étend sur une largeur de bande de 7 MHz. Le niveau du signal d'émission est réglé de telle manière que le TEB est inférieur à 1×10^{-8} (signal brouilleur éteint). Cela requiert un niveau de signal de 6 dB au-dessus du niveau du signal pour le TEB critique de 2×10^{-4} . Lorsque le signal d'émission a été réglé, on ajoute le signal brouilleur et pour chaque réglage de modulation par impulsions du générateur de signal brouilleur, le niveau est ajusté de telle manière que le TEB critique soit atteint. Les courbes de progression résultantes sont montrées à la Fig. 42.

FIGURE 42

Courbes de pondération du brouillage à modulation par impulsions de la radiodiffusion DVB-C. Les traits sont spécifiques pour certaines largeurs d'impulsion: \blacktriangle pour 0,1 μ s (c'est-à-dire large bande), \circ pour 1 μ s et \star pour 10 μ s de largeur d'impulsion. Une onde sinusoïde non modulée de 23,8 dB μ V produit également un TEB critique

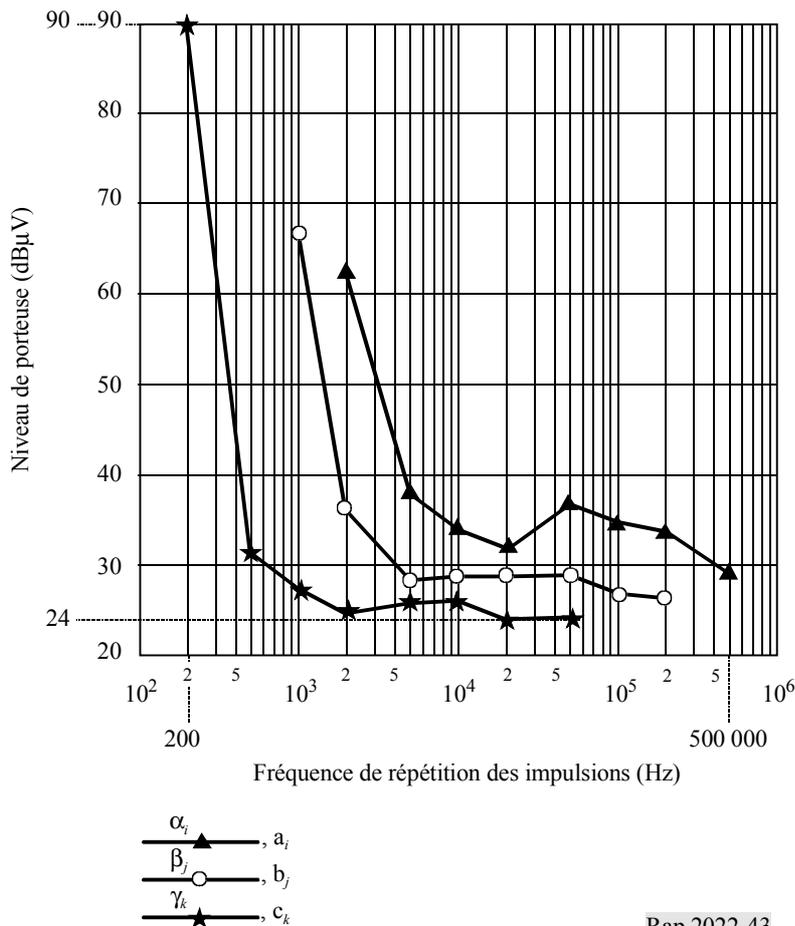


4.4 Exemple expérimental 2: radiodiffusion audionumérique

A titre de deuxième exemple, on a déterminé la sensibilité de la radiodiffusion audionumérique (DAB) aux perturbations électromagnétiques. La radiodiffusion DAB est constituée d'un signal multiplexage fréquentiel orthogonal codé (COFDM). Le spectre du signal couvre une largeur de bande de 1,5 MHz. Le niveau du signal d'émission est réglé de telle manière que le TEB se situe nettement au-dessous de 1×10^{-6} (signal brouilleur arrêté). Cela nécessite un niveau du signal de quelques dB au-dessus du niveau du signal correspondant au TEB critique de 1×10^{-4} . Lorsque le signal d'émission a été réglé, le signal brouilleur est ajouté et pour chaque réglage de modulation par impulsions du générateur de signal brouilleur, le niveau est réglé de manière à atteindre le TEB critique. Les courbes de pondération résultantes sont montrées à la Fig. 43.

FIGURE 43

Courbes de pondération pour le brouillage à modulation par impulsions de la radiodiffusion DAB. Les courbes sont spécifiques à certaines largeurs d'impulsion: ▲ pour 0,5 μs (c'est-à-dire à large bande), ○ pour 2 μs et ★ pour 10 μs de largeur d'impulsion. Une onde sinusoïdale non modulée de 29,2 dBμV produit également le TEB critique



Rap 2022-43

Les Fig. 42 et 43 représentent des fonctions de pondération différentes. Si toutes les courbes de la Fig. 42 montent lorsque la fréquence de répétition des impulsions baisse, la Fig. 43 contient une courbe montrant que la sensibilité aux perturbations électromagnétiques revient à une valeur plus

faible pour une fréquence relativement basse. Les autres courbes sont relativement plates. Au-dessous d'une fréquence de répétition des impulsions donnée, toutes les courbes montent rapidement. Cela résulte du mécanisme de correction des erreurs. Les impulsions de répétition lentes ne permettent pas d'atteindre le TEB critique.

Les expériences montrent par ailleurs que la radiodiffusion DVB-C est relativement sensible aux ondes sinusoïdales non modulées, alors que la radiodiffusion DAB présente une insensibilité voulue à ces ondes.

On peut escompter un résultat similaire à celui de la radiodiffusion DAB dans le cas de la radiodiffusion vidéo numérique par voie hertzienne de Terre (DVB-T) qui utilise également la modulation COFDM. Un récepteur DVB-T n'était cependant pas disponible pour les essais.

Pour faire une comparaison approximative avec la Partie A, on peut faire une section transversale dans les figures montrant le TEB en fonction du rapport S/N . Une telle section appliquée à un TEB/ S/N donné ferait alors apparaître la pondération de différentes considérations relatives au brouillage. Il convient de noter, en faisant ces comparaisons, que la Partie A a été tirée des simulations par ordinateur et que la Partie B est fondée sur des mesures réelles. Il faut pour cela escompter qu'il y aura des différences résiduelles dans les deux ensembles de résultats.

5 Conclusions

En tant que première étape de la pondération de brouillage des services de modulation numérique, une approche pour définir les courbes de pondération a été définie et les résultats expérimentaux correspondant à deux exemples ont été donnés. Il faudra poursuivre les recherches expérimentales et théoriques sur les radiocommunications mobiles numériques, etc., en vue d'obtenir suffisamment d'informations pour définir les méthodes de pondération. Il faudra, pour établir des limites d'émission, connaître les critères des planificateurs des radiocommunications et des considérations statistiques relatives aux probabilités de brouillage.

Références bibliographiques

- CISPR [1993] CEI CISPR 16-1/1993-08: Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques. Partie 1: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques. Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR).
- UCHINO, M., HAYASHI, Y., SHINOZUKA, T. et SATO, R [1997] Development of low-cost high-resolution APD measuring equipment. Proc. 1997 Int'l Symp. EMC. p. 253-256, Beijing, China.

Bibliographie

- STENUMGAARD, P. [septembre 1996] Impact of radiated emission standards on digital radio receiver performance. Proc. EMC'96, p. 445-449, Rome, Italie.

PARTIE C

Méthode de simulation pour l'identification des sources de brouillage**1 Introduction**

Pour comprendre et analyser le brouillage dans un environnement spécifique, on peut le définir comme la relation entre son amplitude et celle du signal de la porteuse (rapport porteuse/brouillage: C/I). En général, le rapport C/I correspond au rapport minimal (niveau du signal utile/niveau du signal brouilleur) nécessaire pour protéger un système radioélectrique contre le brouillage causé par un autre système radioélectrique.

La caractéristique C/I d'un récepteur dépend en général du degré de résistance de la modulation utilisée. Une source de brouillage donnée a un effet quantifié sur le TEB en raison du cumul du signal brouilleur et du signal de la porteuse. A partir des caractéristiques de TEB, pour un rapport C/I donné, on peut obtenir la fonction de densité de probabilité en fonction du rapport E_b/N_0 , par des méthodes statistiques. La distribution de cette fonction dépendant des systèmes de modulation brouilleuse, la source de brouillage peut être identifiée à l'aide de ces caractéristiques de distribution, au niveau d'un récepteur de liaison fixe utile à modulation numérique.

Dans cette étude, les recherches théoriques ont été effectuées à l'aide du système ADS. Pour comprendre les effets des brouillages associés à différents systèmes de modulation sur les systèmes de communication numérique, nous avons examiné trois types de systèmes de modulation de liaison fixe numérique, à savoir: la modulation MDP-4, la modulation par déplacement de phase quadrivalente double- $\pi/4$ (MDP-4 D- $\pi/4$) et la modulation MAQ-16, affectés par le bruit et le brouillage produit par une source utilisant un système de modulation différent (MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ-16).

En règle générale, le système de modulation MDP-4 est utilisé pour les systèmes AMRC, tels que les IMT-2000, et la technique de modulation MDP-4 D- $\pi/4$ pour le système TETRA (système de radiocommunication de Terre à ressources partagées, utilisé en Europe). La modulation MAQ-16 est généralement utilisée en radiocommunications numériques hyperfréquences, dans les modems, en radiodiffusion vidéo numérique par câble (DVB-C) ou en radiodiffusion vidéo numérique par voie hertzienne de Terre (DVB-T).

Pour la simulation, nous avons supposé que la puissance du signal brouilleur était supérieure à celle du bruit et que la fréquence du signal d'émission était la même que celle du signal de réception.

Enfin, une méthode d'identification des sources de brouillages affectant les systèmes de communication numériques est proposée.

2 Méthode de simulation

Le Tableau 3 présente les opérations de simulation effectuées dans le cadre de cette étude. Trois types de systèmes de modulation de liaison fixe utile ont été examinés, à savoir les systèmes MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ-16.

TABLEAU 3

Liste des opérations de simulation

Opération N°	Système de modulation de liaison fixe utile	Bruit et type de système de modulation de liaison fixe brouilleuse
1	MDP-4	Bruit + MDP-4
2	MDP-4	Bruit + MDP-4 D- $\pi/4$
3	MDP-4	Bruit + MAQ-16
4	MDP-4 D- $\pi/4$	Bruit + MDP-4
5	MDP-4 D- $\pi/4$	Bruit + MDP-4 D- $\pi/4$
6	MDP-4 D- $\pi/4$	Bruit + MAQ-16
7	MAQ-16	Bruit + MDP-4
8	MAQ-16	Bruit + MDP-4 D- $\pi/4$
9	MAQ-16	Bruit + MAQ-16

2.1 Configuration de simulation

La Fig. 44 représente une configuration de simulation permettant d'analyser le TEB en fonction de l'effet produit par un signal brouilleur de modulation appropriée sur un signal utile. Pour simuler une liaison fixe type, on utilise un signal utile et un signal brouilleur de modulation appropriée, que l'on applique à l'entrée d'un récepteur avec un dispositif permettant d'ajouter et d'ajuster le bruit gaussien pour obtenir le rapport $C/(N + I)$ voulu à l'entrée d'un démodulateur.

Pour chaque simulation de système ADS, on a utilisé les paramètres indiqués dans le Tableau 4.

FIGURE 44

Configuration de simulation pour liaison fixe utile en présence de bruit et de brouillage

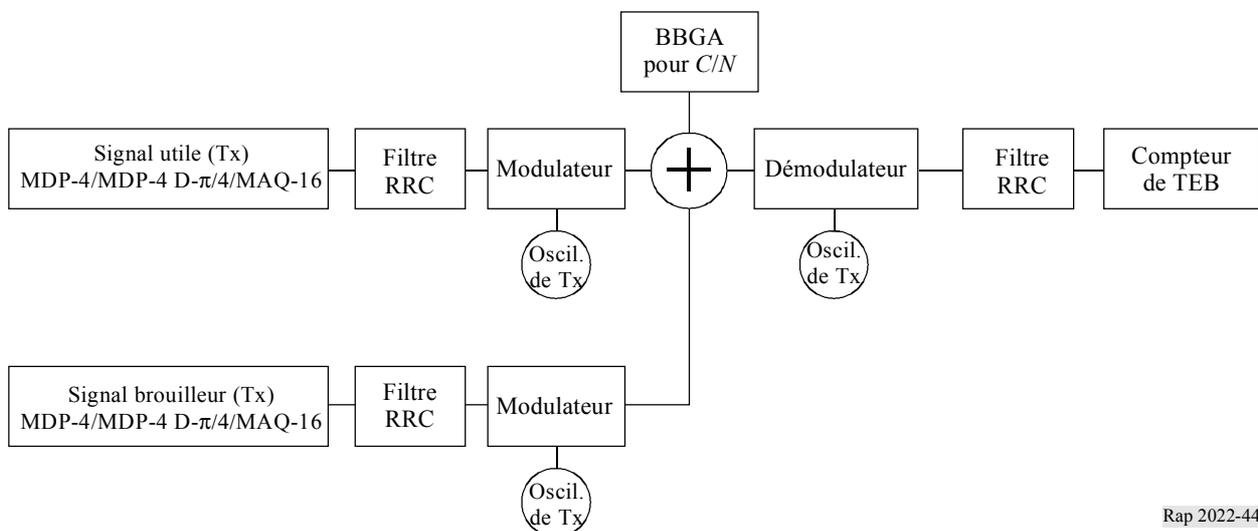


TABLEAU 4

Paramètre de simulation

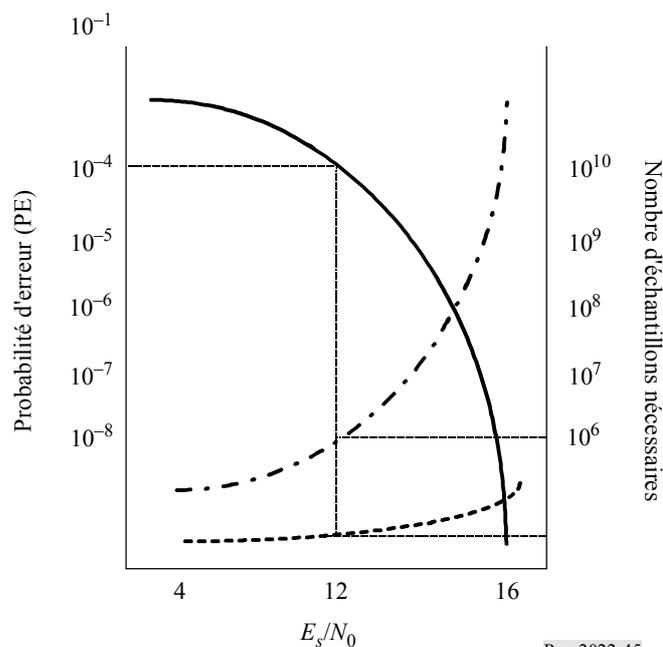
Débit binaire de la source	48,6 kbit/s
Facteur de coupure du filtre RRC	0,5
Fréquence de modulation	2,5 MHz

2.2 Calcul du TEB à l'aide de la méthode d'échantillonnage par importance amélioré (IIS, *improved importance sampling*)

Pour obtenir une évaluation numérique du TEB à partir de la simulation, on utilise habituellement la méthode de Monte Carlo, qui a l'avantage d'être très précise. Toutefois, cette méthode nécessite un grand nombre d'échantillons et les simulations durent longtemps. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode IIS, qui peut être appliquée aux systèmes de modulation d'amplitude tels que les systèmes MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ. Même si la méthode de Monte Carlo est extrêmement précise, il est préférable d'utiliser la méthode IIS pour réduire le nombre d'échantillons et le temps de simulation. Par exemple, la méthode MC exige 10^6 échantillons pour représenter l'erreur de probabilité de 10^{-4} alors que la méthode IIS n'exige que 10^3 échantillons pour le même résultat (voir la Fig. 45).

FIGURE 45

Comparaison du nombre d'échantillons entre la méthode Monte Carlo et la méthode IIS



3 Résultats de la simulation

3.1 TEB

Pour calculer le TEB dans le cas des configurations d'essai indiquées dans le Tableau 3, nous avons examiné les valeurs du rapport $C/(N+I)$ avec les différents niveaux de puissance associés à chaque système de modulation brouilleuse, et le niveau de bruit fixe indiqué dans le Tableau 5. Pour le récepteur, la valeur du TEB a été fixée à 1×10^{-3} . On fait varier le niveau de puissance de la liaison fixe utile pour chaque format de modulation de 10 à 30 dBm, et celui du signal brouilleur pour différents systèmes de modulation de 20 à -40 dBm, le niveau du bruit gaussien étant de -60 dBm.

TABLEAU 5

Niveaux de puissance du signal utile, du brouillage et du bruit choisis pour les simulations

$C/(N+I)$ (dB)	Niveau du signal utile (dBm)			Niveau de brouillage (dBm)			Niveau de bruit (dBm)
	MDP-4	MDP-4 D- $\pi/4$	MAQ-16	MDP-4	MDP-4 D- $\pi/4$	MAQ-16	
10	10			0			-60
	20			10			
	30			20			
20	10			-10			-60
	20			0			
	30			10			
30	10			-20			-60
	20			-10			
	30			0			
40	10			-30			-60
	20			-20			
	30			-10			
50	10			-40			-60
	20			-30			
	30			-20			

Chaque simulation ADS d'émetteur et de récepteur pour les liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ-16 est menée à bien et les courbes représentant le TEB pour chaque liaison fixe utile (voir les Fig. 46, 47 et 48) montrent l'incidence sur le TEB des différents systèmes de modulation brouilleuse dans le récepteur de liaison fixe utile.

a) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4

FIGURE 46

TEB d'un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 brouillé par une liaison fixe à modulation différente avec bruit gaussien

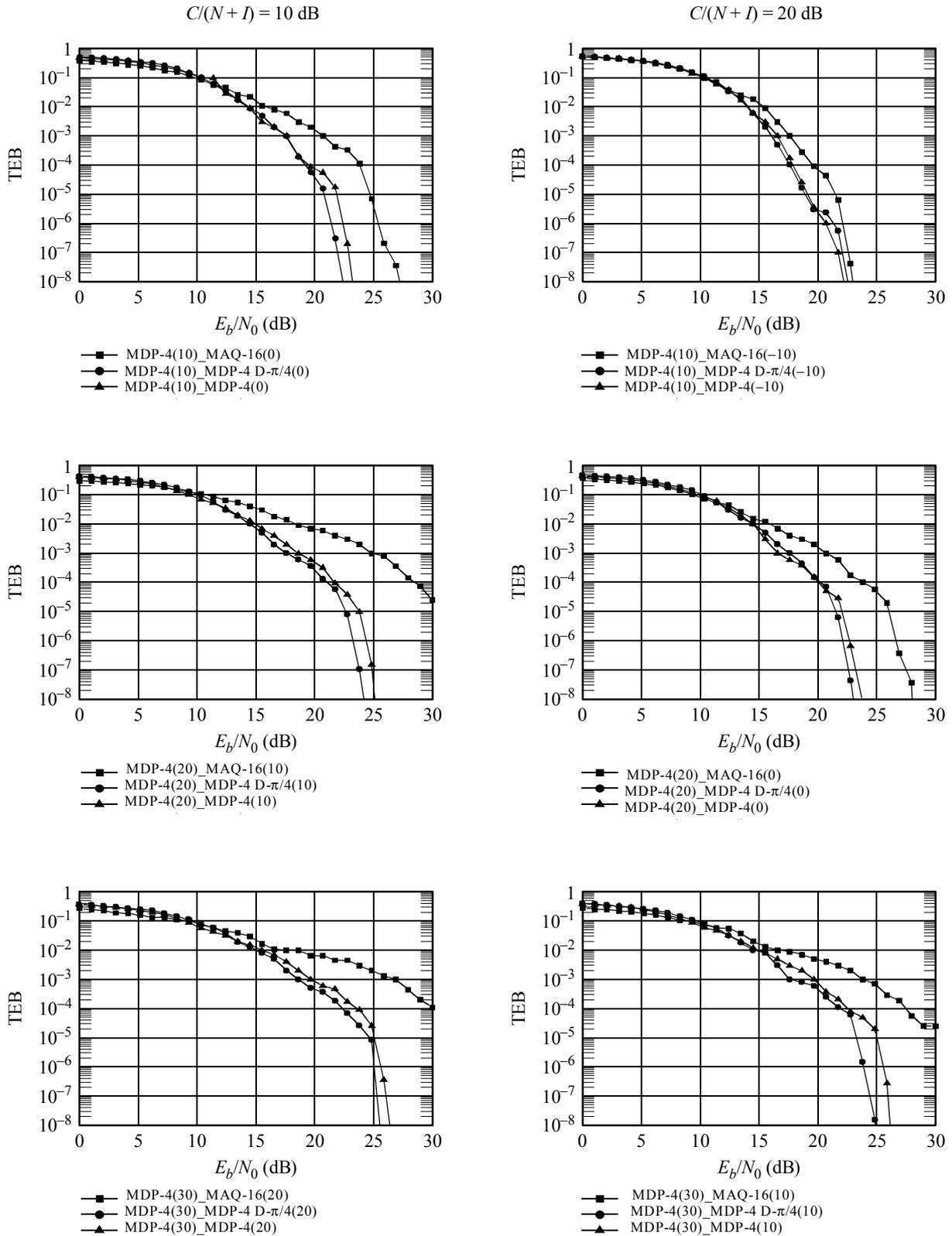
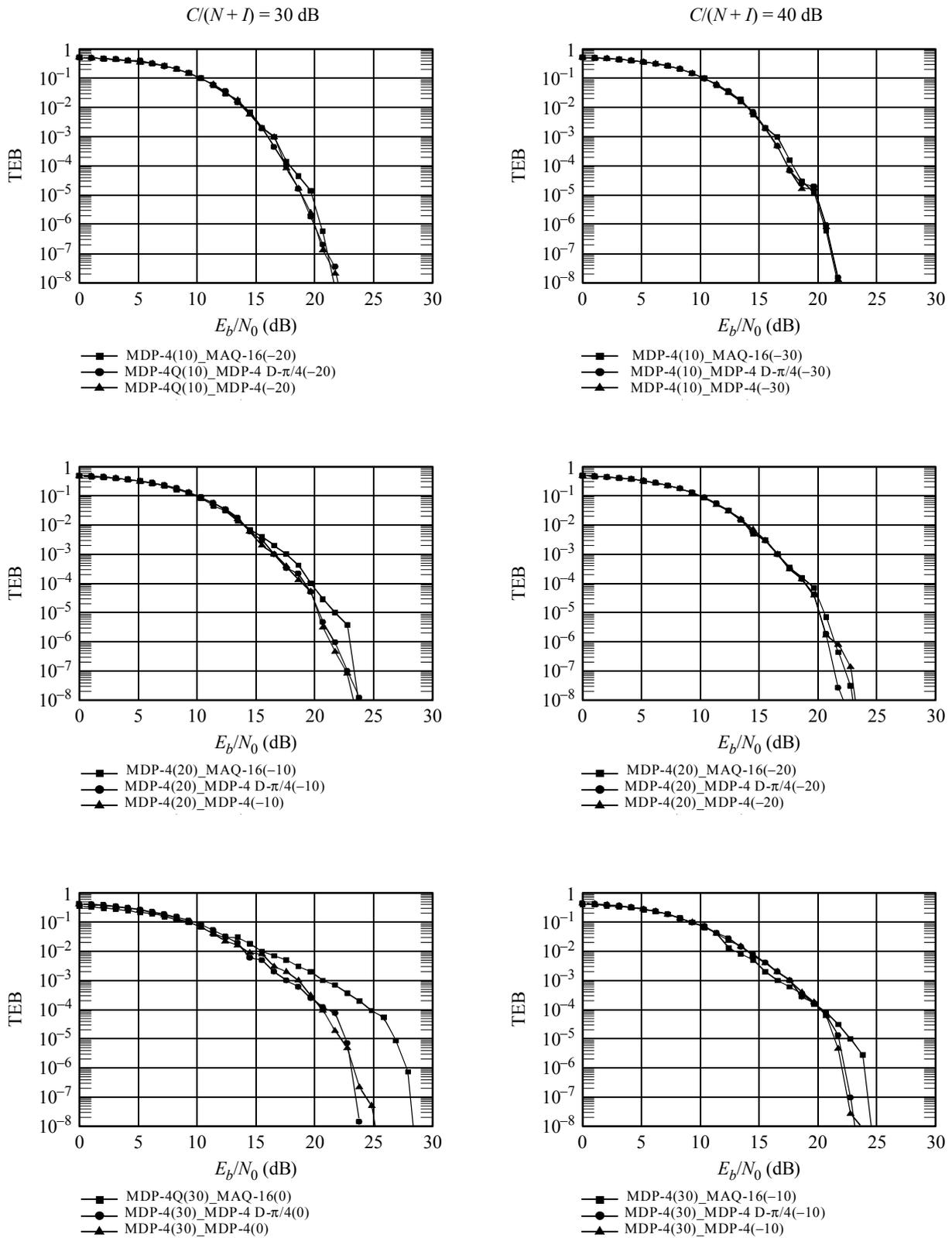


FIGURE 46 (*fin*)



b) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 D- $\pi/4$

FIGURE 47

TEB d'un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 D- $\pi/4$ brouillé par une liaison fixe à modulation différente avec bruit gaussien

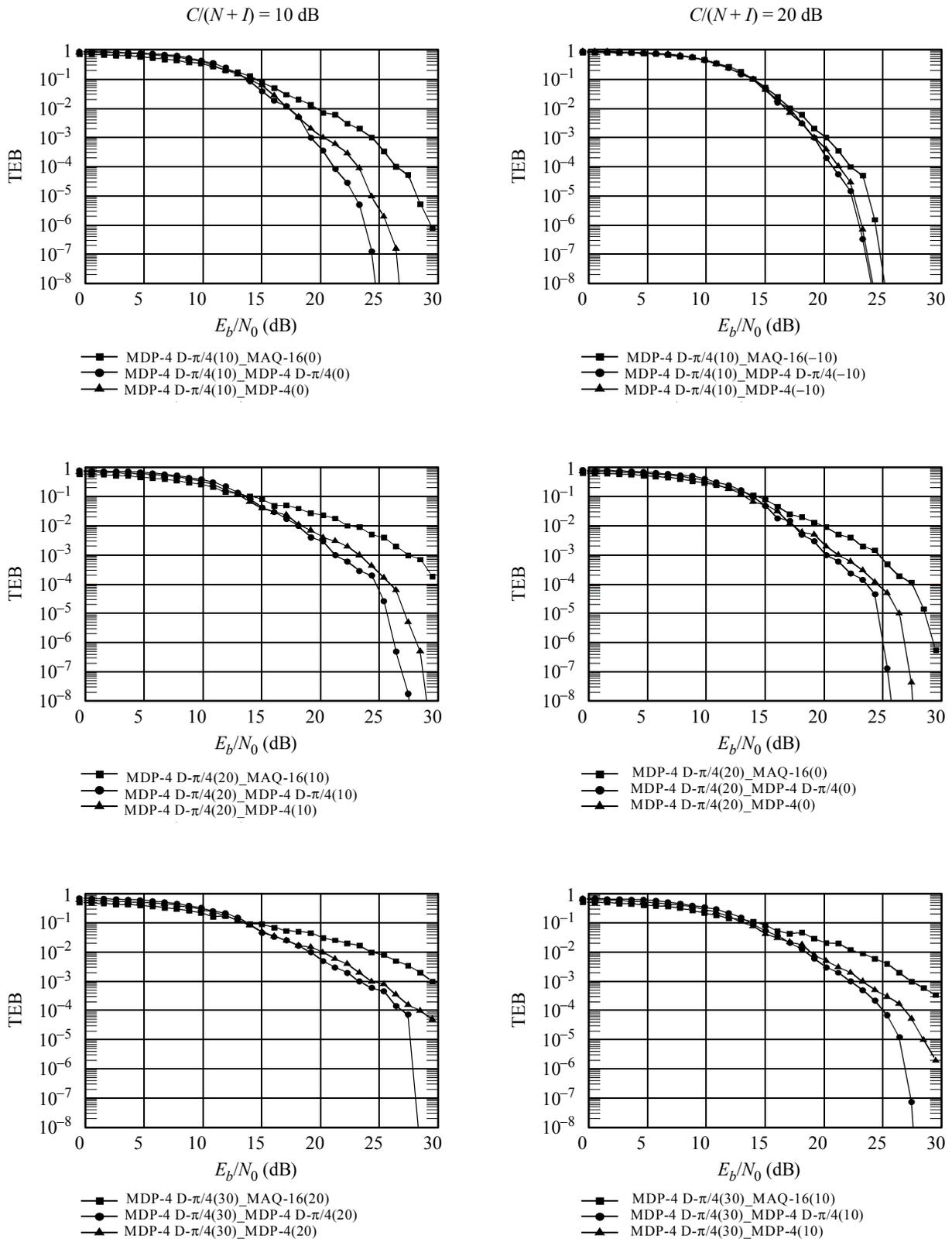
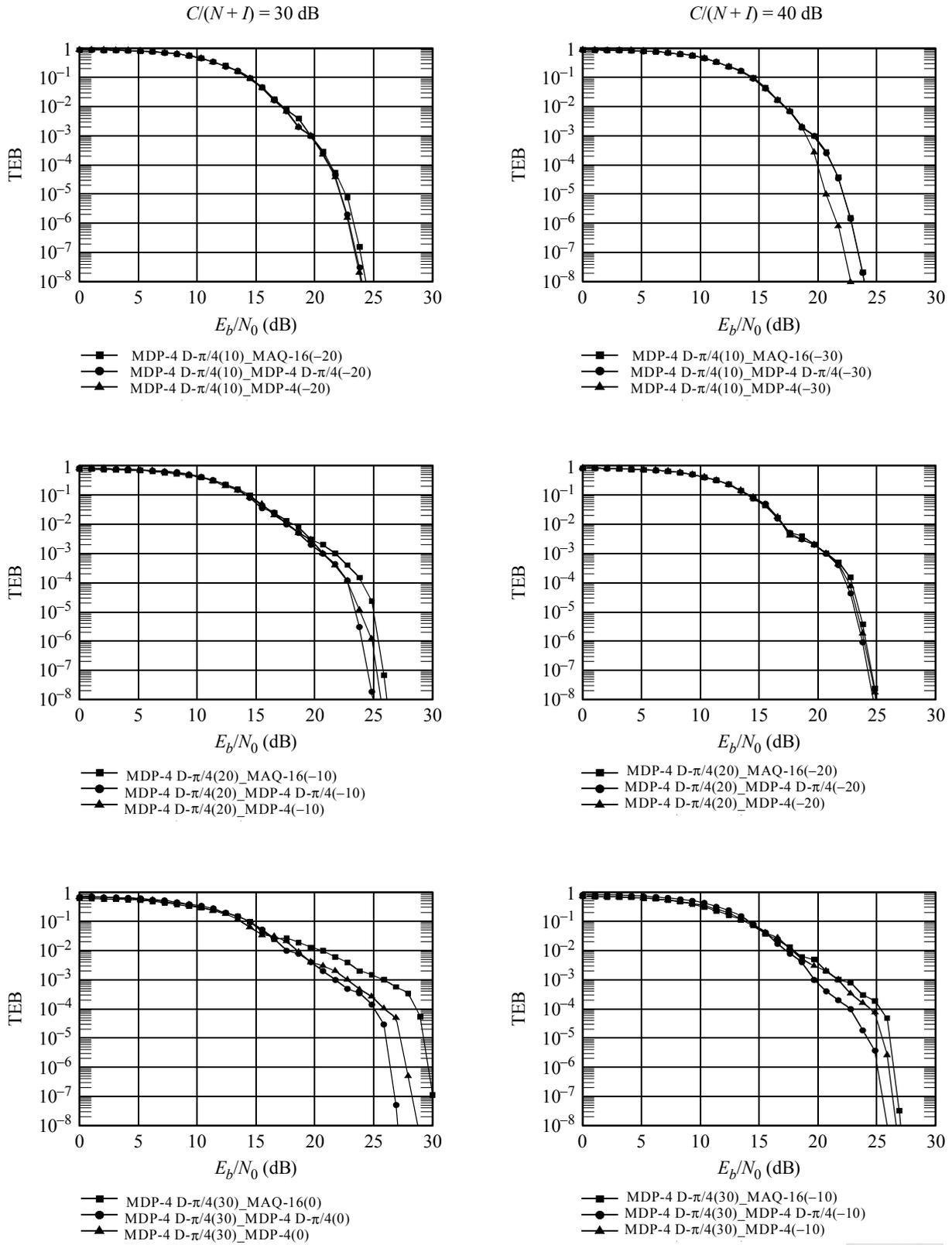


FIGURE 47 (*fin*)



c) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ

FIGURE 48

TEB d'un récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ-16-brouillé par une liaison fixe à modulation différente avec bruit gaussien

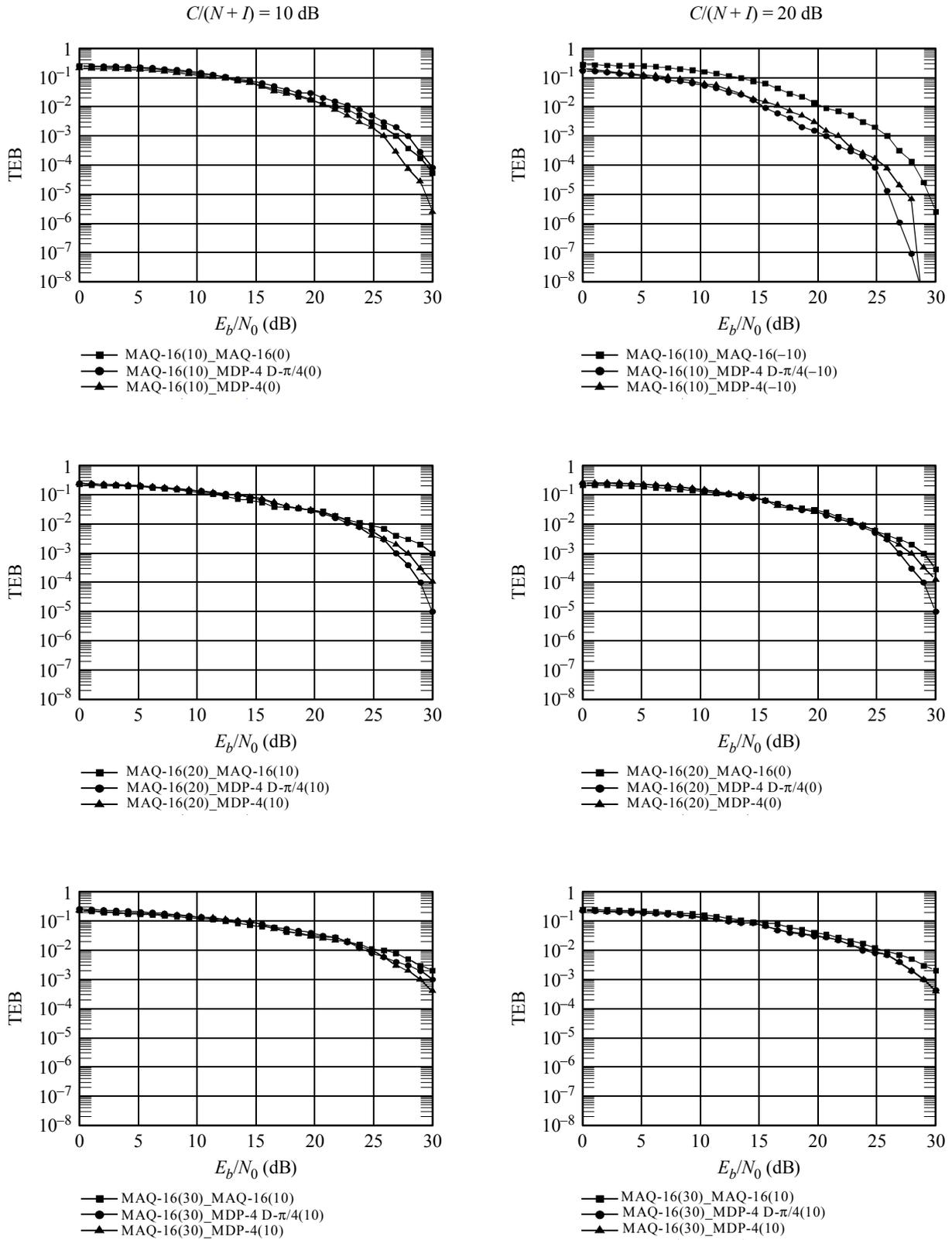
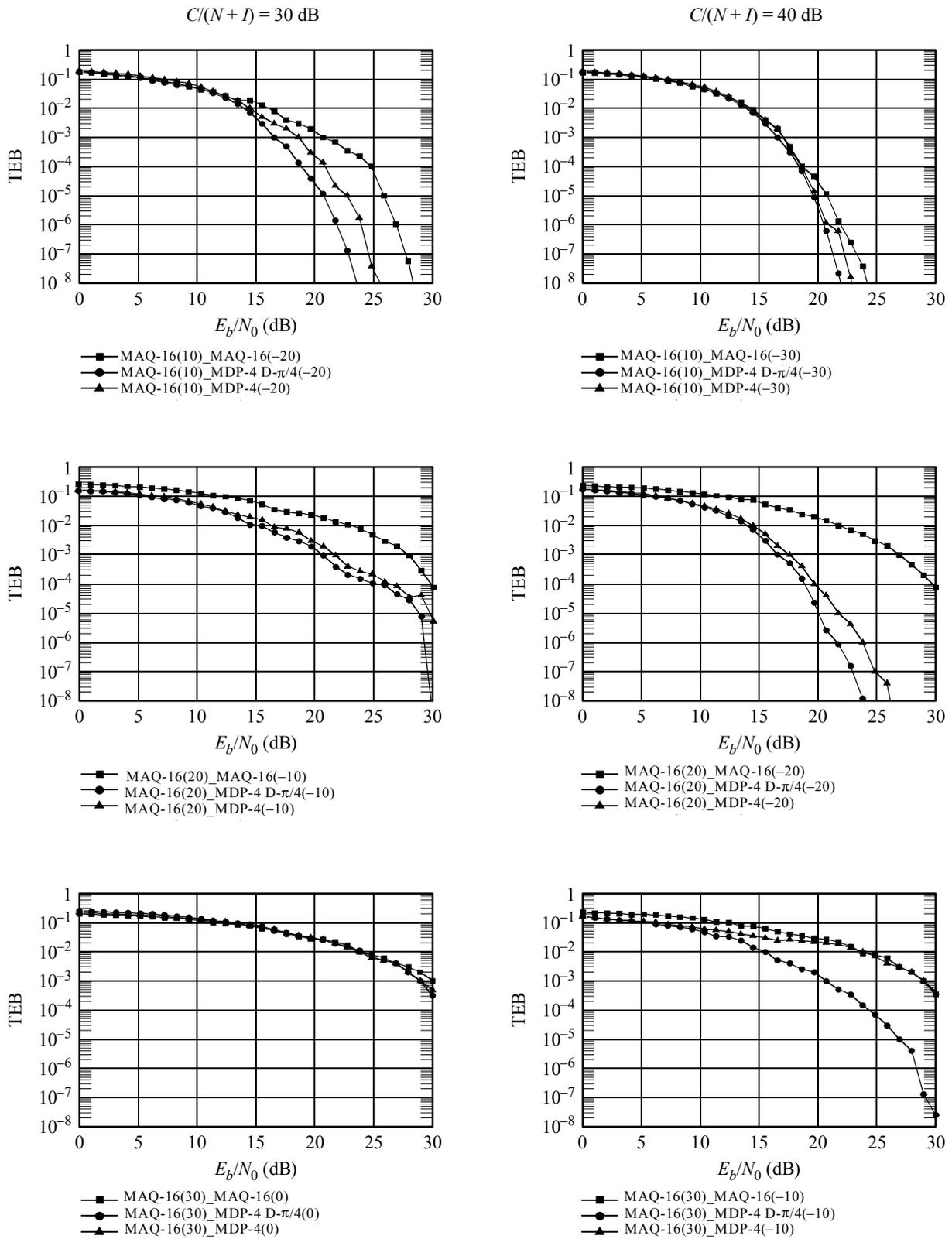


FIGURE 48 (fin)



3.2 Densité de probabilité du rapport E_b/N_0

Les valeurs du TEB montrent clairement que la liaison fixe utile affectée par un système de modulation brouilleuse présente, pour une valeur constante du rapport $C/(N+I)$ au niveau du récepteur, des rapports E_b/N_0 différents selon le système de modulation utilisé. Le rapport E_b/N_0 varie aussi en fonction de la porteuse et du niveau de brouillage pour une valeur constante du rapport $C/(N+I)$.

A partir des différents niveaux du signal utile et du brouillage, le rapport $C/(N+I)$ étant maintenu à une valeur constante, on calcule les paramètres statistiques (valeurs moyenne, maximale et minimale, etc.) ainsi que l'écart entre les valeurs maximale et minimale pour chaque système de modulation brouilleuse.

A l'aide d'une méthode statistique, on trace la courbe de la fonction de densité de probabilité de chaque système de modulation brouilleuse en fonction du rapport E_b/N_0 , pour un rapport $C/(N+I)$ donné.

Chaque système de modulation brouilleuse ayant sa distribution statistique propre, pour un rapport moyen E_b/N_0 donné, le système de modulation peut être identifié comme étant la source de brouillage si la densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation peut être nettement repérée dans les courbes.

Dans cette étude, on a fixé comme valeur limite, pour un récepteur, un TEB de 1×10^{-3} . Si la valeur du rapport $C/(N+I)$ augmente, le niveau du signal utile devient prédominant par rapport au niveau du signal brouilleur et le rapport E_b/N_0 requis au niveau du récepteur diminue. Par contre, si la valeur du rapport $C/(N+I)$ diminue, le caractère prédominant du signal utile diminue et on observe une légère différence entre les niveaux du rapport E_b/N_0 du signal utile pour chaque système de modulation.

Si les distributions de densité de probabilité associées à des systèmes de modulation brouilleuse sont très proches les unes des autres et qu'elles se chevauchent partiellement, l'identification de la source de brouillage n'est pas possible.

Par contre, le système de modulation affectant la liaison fixe utile peut être identifié, si les fonctions de densité de probabilité des systèmes de modulation brouilleuse sont distinctes et ne se chevauchent pas.

Le niveau du signal utile est d'autant plus prédominant par rapport au niveau du signal brouilleur et le rapport E_b/N_0 requis au niveau du récepteur est d'autant plus bas, que le rapport $C/(N+I)$ est plus élevé. En conséquence, les densités de probabilité pour les systèmes de modulation sont proches les unes des autres et il n'est pas facile de distinguer le système de modulation affectant le signal utile.

a) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4

Le Tableau 6 présente le calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour chaque modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4. Dans le cas où le rapport $C/(N+I) = 10$ dB, la densité de probabilité de la liaison fixe utile à modulation MDP-4 D- $\pi/4$ avec un brouillage à modulation MAQ-16 atteint son niveau le plus élevé pour un rapport E_b/N_0 de 23,1 dB, alors qu'avec une modulation MDP-4 D- $\pi/4$, elle atteint son niveau le plus élevé pour un rapport E_b/N_0 de 17,93 dB.

TABLEAU 6

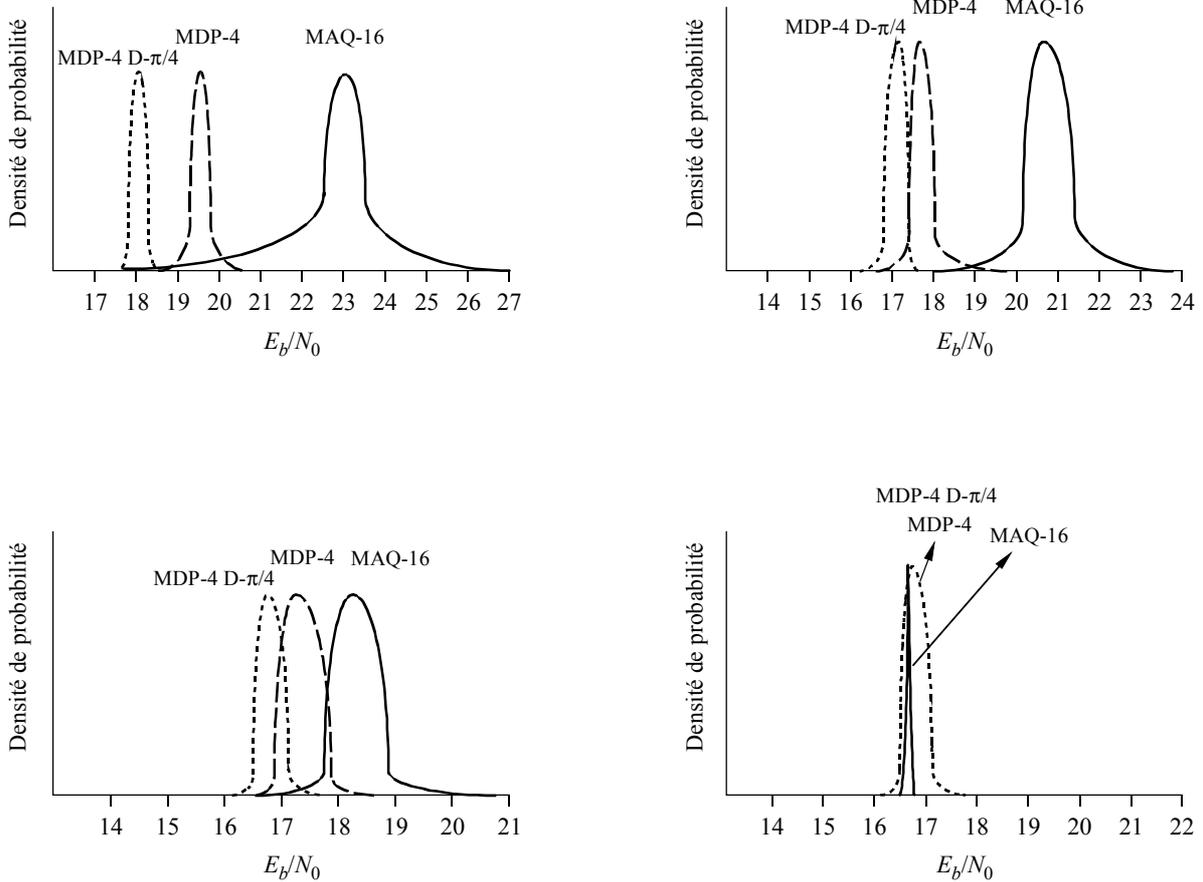
**Calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour chaque modulation brouilleuse
avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4**

$C/(N+I)$ (dB)	Valeurs statistiques (dB)	E_b/N_0 pour un système de modulation brouilleuse		
		MDP-4	MDP- 4 D- $\pi/4$	MAQ-16
10	Moyenne	19,66	17,93	23,1
	Maximale	20,7	18,6	26,9
	Minimale	18,6	17,6	17,6
	Ecart	2,1	1	9,3
20	Moyenne	17,63	17,13	20,83
	Maximale	19,7	17,6	23,8
	Minimale	16,6	16,2	18
	Ecart	3,1	1,4	5,8
30	Moyenne	17,26	16,8	18,3
	Maximale	18,6	17,6	20,7
	Minimale	16,6	16,2	16,6
	Ecart	2	1,4	4,1
40	Moyenne	16,8	16,8	16,6
	Maximale	17,6	17,6	16,6
	Minimale	16,2	16,2	16,6
	Ecart	1,4	1,4	0
50	Moyenne	16,66	16,8	16,8
	Maximale	17,6	17,6	17,6
	Minimale	16,2	16,2	16,2
	Ecart	1,4	1,4	1,4

La Fig. 49 présente les courbes de la densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation, le rapport $C/(N+I)$ ayant une valeur comprise entre 10 dB et 40 dB. Lorsque le rapport $C/(N+I) = 10$ dB, on peut repérer le système de modulation brouilleuse MAQ-16 et on peut distinguer la modulation MDP-4 D- $\pi/4$ de la modulation MDP-4 car les densités de probabilité du rapport E_b/N_0 sont presque identiques. Dans ces conditions, seul le type de système de modulation brouilleuse peut être identifié.

FIGURE 49

Densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4, la valeur du rapport $C/(N+I)$ étant comprise entre 10 dB et 40 dB



b) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4D- $\pi/4$

Le Tableau 7 présente le calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour une modulation MDP-4 D- $\pi/4$ et la Fig. 50 montre les courbes de la densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation, la valeur du rapport $C/(N+I)$ étant comprise entre 10 dB et 40 dB.

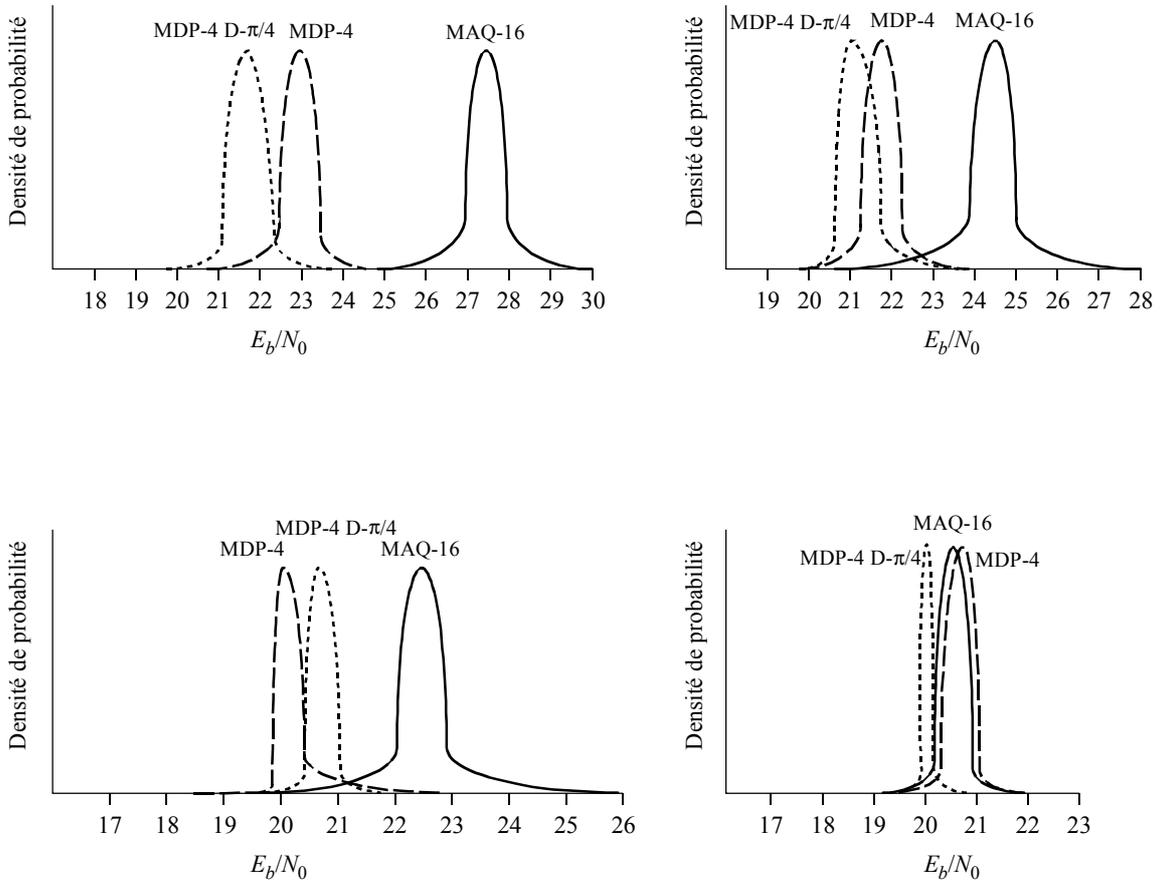
TABLEAU 7

Calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 D- $\pi/4$

$C/(N+I)$ (dB)	Valeurs statistiques (dB)	E_b/N_0 pour un système de modulation brouilleuse		
		MDP-4	MDP-4 D- $\pi/4$	MAQ-16
10	Moyenne	23,1	21,73	27,56
	Maximale	24,8	23,8	30
	Minimale	20,7	19,7	24,8
	Ecart	4,1	4,1	5,2
20	Moyenne	21,73	21,06	24,6
	Maximale	23,8	23,8	27,9
	Minimale	19,7	19,7	20,7
	Ecart	4,1	3,1	7,2
30	Moyenne	20,06	20,7	22,43
	Maximale	22,8	21,7	25,9
	Minimale	19,7	19,7	19,7
	Ecart	3,1	2	6,2
40	Moyenne	20,7	20,03	20,53
	Maximale	21,7	20,7	21,7
	Minimale	19,7	19,7	19,2
	Ecart	2	1	2,5
50	Moyenne	20,53	19,86	20,53
	Maximale	21,7	20,2	21,7
	Minimale	19,2	19,7	19,2
	Ecart	2,5	0,5	2,5

FIGURE 50

Densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MDP-4 D- $\pi/4$, la valeur du rapport $C/(N+I)$ étant comprise entre 10 dB et 40 dB



c) Récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ

Le Tableau 8 présente le calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour une modulation MAQ-16 et la Fig. 51 montre les courbes de la densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation, la valeur du rapport $C/(N+I)$ étant comprise entre 10 dB et 40 dB.

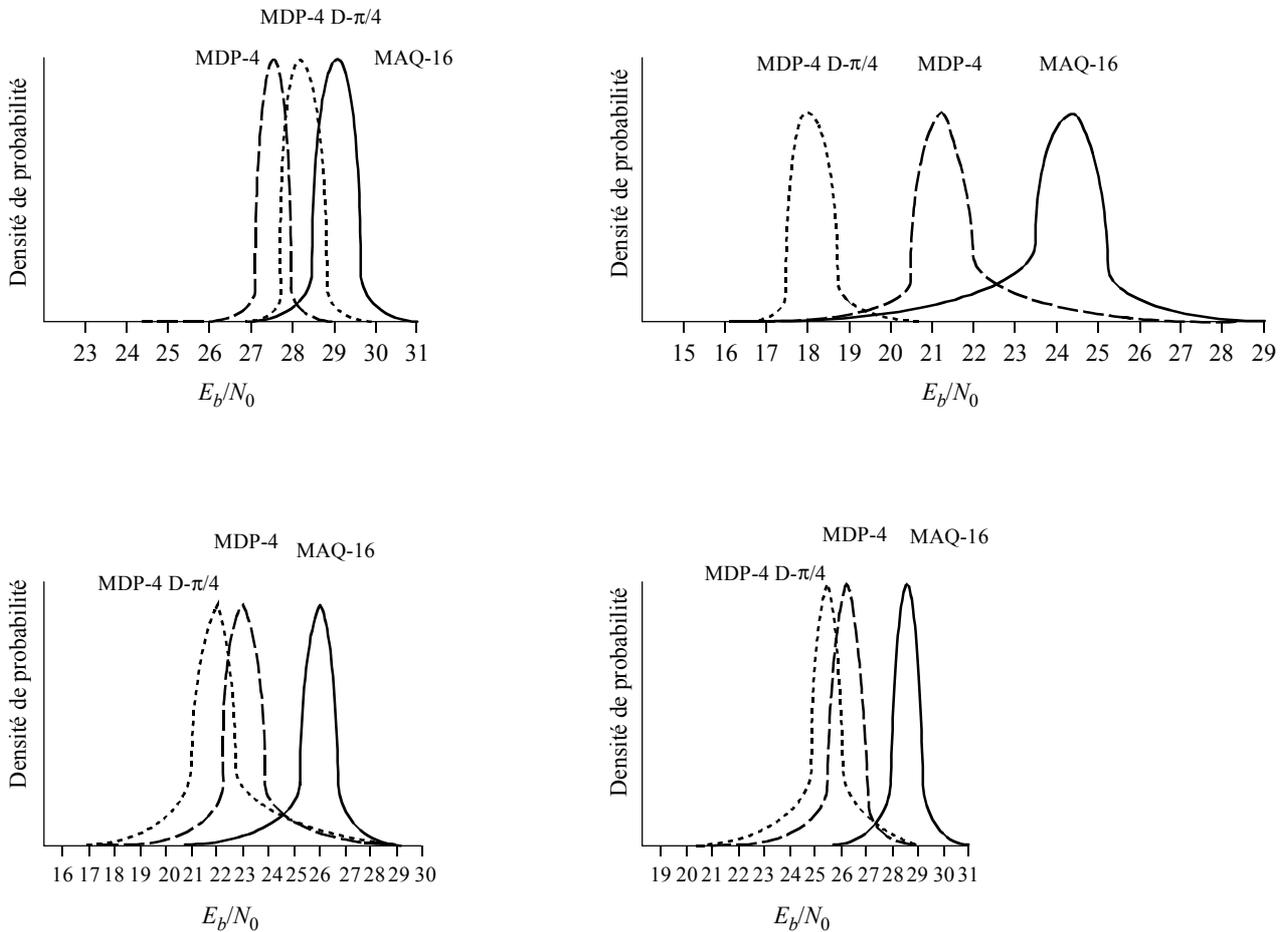
TABLEAU 8

Calcul statistique du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ-16

$C/(N+I)$ (dB)	Valeurs statistiques (dB)	E_b/N_0 pour un système de modulation brouilleuse		
		MDP-4	MDP-4 D- $\pi/4$	MAQ-16
10	Moyenne	27,6	28,26	29,3
	Maximale	29	30	31
	Minimale	25,9	26,9	26,9
	Ecart	3,1	3,1	4,1
20	Moyenne	26,3	25,53	28,63
	Maximale	29	29	31
	Minimale	22	20,07	25,9
	Ecart	7	8,3	5,1
30	Moyenne	23,1	22,1	26,2
	Maximale	29	29	30
	Minimale	18,6	16,6	20,7
	Ecart	10,4	12,4	9,3
40	Moyenne	21,26	17,96	24,36
	Maximale	29	20,7	29
	Minimale	17,2	16,6	17,2
	Ecart	11,8	4,1	11,8
50	Moyenne	17,7	17	18,26
	Maximale	17,8	17,3	21,7
	Minimale	17,6	16,5	16,5
	Ecart	0,2	0,8	5,2

FIGURE 51

Densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour chaque système de modulation brouilleuse avec un récepteur de liaison fixe utile à modulation MAQ-16, la valeur du rapport $C/(N+I)$ étant comprise entre 10 dB et 40 dB



Rap 2022-51

4 Conclusions

Cette modification décrit, pour chaque émetteur et chaque récepteur, une simulation ADS pour les liaisons fixes utiles à modulation MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ-16 brouillées par une liaison fixe à modulation MDP-4, MDP-4 D- $\pi/4$ et MAQ-16 avec du bruit.

Leurs TEB ont été calculés à l'aide de la méthode IIS et les courbes représentant leur densité de probabilité pour un rapport E_b/N_0 ont été tracées. Etant donné que, pour chaque système de modulation brouilleuse, la densité de probabilité du rapport E_b/N_0 pour une liaison fixe utile a une caractéristique de distribution statistique propre, il est possible de déterminer quel est le système de modulation brouilleuse qui affecte la liaison fixe utile.

Enfin, une procédure d'identification des systèmes de modulation brouilleuse dans les liaisons fixes utiles est proposée.

Initialisation d'un système de modulation brouilleuse sous forme de données de référence

Etape 1: Déterminer le rapport $C/(N + I)$ au niveau du récepteur

(Le système de modulation et le niveau du signal de la liaison fixe utile doivent être connus.)

Etape 2: Calculer le TEB pour la liaison fixe utile, pour chaque système de modulation brouilleuse

Etape 3: Déterminer le TEB requis pour le récepteur et déterminer le rapport E_b/N_0 pour le TEB

Etape 4: Répéter les Etapes 2 et 3 deux fois, puis calculer la densité de probabilité du rapport E_b/N_0

Etape 5: Enregistrer les données pour chaque système de modulation brouilleuse sous forme de données de référence

Prédiction du système de modulation brouilleuse

Etape 1: Mesurer le rapport $C/(N + I)$ au niveau du récepteur

(Le système de modulation et le niveau du signal de la liaison fixe utile doivent être connus.)

Etape 2: Calculer le TEB pour la liaison fixe utile en présence de brouillage

Etape 3: Calculer le rapport E_b/N_0 pour le TEB requis

Etape 4: Répéter les Etapes 2 et 3 deux fois, puis calculer la densité de probabilité du rapport E_b/N_0

Etape 5: Comparer la densité de probabilité avec les données de référence et déterminer le système de modulation de la source brouilleuse

Condition à respecter

Le niveau de la porteuse doit être réduit de façon à identifier correctement le système de modulation brouilleuse si le rapport $C/(N + I)$ est élevé.
