

RECOMMANDATION UIT-R S.446-4*

Dispersion de l'énergie de la porteuse pour des systèmes employant une modulation angulaire par des signaux analogiques ou une modulation numérique dans le service fixe par satellite

(1966-1974-1978-1992-1993)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'utilisation de techniques de dispersion de l'énergie des porteuses dans les systèmes du service fixe par satellite peut conduire à une réduction sensible des brouillages causés aux stations d'un service de radiocommunication de Terre qui fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences;
- b) que, dans de nombreux cas, l'utilisation de telles techniques peut conduire à une réduction, parfois modérée, parfois sensible, des brouillages entre systèmes du service fixe par satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences; par contre, dans d'autres cas, l'utilisation de ces techniques risque de ne pas conduire à la réduction des brouillages entre de tels systèmes;
- c) que ces techniques sont couramment utilisées avec succès dans les systèmes du service fixe par satellite, sans dégradation sensible de la qualité de fonctionnement;
- d) que la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales (Genève, 1979), a adopté la Recommandation N° 103 relative à la dispersion de l'énergie des porteuses dans les systèmes du service fixe par satellite;
- e) que l'évaluation de la qualité obtenue avec diverses techniques de dispersion du signal TV-MF est donnée dans l'Annexe 1 à la Recommandation UIT-R S.671,

recommande

- 1 que les systèmes du service fixe par satellite utilisent des techniques de dispersion de l'énergie de la porteuse, dans la mesure où cela est pratiquement possible et d'une manière compatible avec un fonctionnement satisfaisant des systèmes, afin d'obtenir un étalement de l'énergie tel que le brouillage causé aux stations d'un service de Terre fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences soit maintenu à tout moment dans les limites de tolérance spécifiées;
- 2 que tout système à satellite soit conçu de façon à permettre une dispersion de l'énergie de la porteuse jusqu'au maximum pratiquement possible, et qu'une telle dispersion soit applicable chaque fois qu'il est nécessaire de réduire les brouillages entre systèmes du service fixe par satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences;
- 3 que la Note suivante soit considérée comme faisant partie de la Recommandation:

NOTE 1 – L'Annexe 1 décrit les diverses techniques de dispersion à utiliser avec des signaux analogiques MF et des signaux numériques MDP dont l'utilisation pourrait être recommandée dans la pratique.

* La Commission d'études 4 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2001 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44 (AR-2000).

ANNEXE 1

Dispersion de l'énergie dans le service fixe par satellite**1 Introduction**

L'étude du partage des bandes de fréquences entre le service fixe par satellite et les systèmes de faisceaux hertziens et entre différents réseaux du service fixe par satellite montre clairement que, pour maintenir les brouillages mutuels entre les systèmes à un niveau tolérable, il sera indispensable, dans la plupart des cas, d'utiliser les techniques de dispersion d'énergie afin de réduire la densité d'énergie spectrale des émissions du service fixe par satellite pendant les périodes de faible charge. La réduction de la densité maximale d'énergie facilitera également:

- l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires en réduisant au minimum l'espacement orbital requis entre satellites utilisant la même bande de fréquences, et
- le fonctionnement à plusieurs porteuses des répondeurs à large bande.

L'importance de la dispersion d'énergie requise dépend évidemment, dans chaque cas particulier, des caractéristiques des systèmes. Il est évidemment souhaitable, toutefois, que la densité d'énergie maximale dans des conditions de charge faible soit maintenue aussi voisine que possible de la valeur correspondant à l'heure chargée.

Dans la présente Annexe, on rend compte des résultats d'études théoriques et expérimentales sur les techniques de dispersion d'énergie applicables aux systèmes de radiocommunication par satellite utilisant respectivement la modulation de fréquence du type analogique et la modulation numérique.

La conclusion est que, dans la plupart des cas, on peut obtenir une dispersion substantielle de l'énergie. Il se peut cependant que l'efficacité de la dispersion soit sujette à certaines limitations, lesquelles sont mentionnées dans la présente Annexe.

2 Dispersion de l'énergie dans les systèmes de téléphonie analogiques multivoie à modulation de fréquence

Lorsqu'on étudie les méthodes permettant d'obtenir un haut degré de dispersion de l'énergie porteuse, il est utile de savoir quel est l'effet de dispersion de la bande de base pleinement chargée, afin d'avoir une valeur de référence avec laquelle comparer ce qui peut être obtenu artificiellement. Pour la catégorie générale des systèmes à modulation de fréquence à grande excursion que nous considérons (c'est-à-dire ceux pour lesquels la valeur quadratique moyenne de l'excursion (δF) en multivoie dépasse la fréquence la plus élevée de la bande de base et aussi de beaucoup sa fréquence la plus basse), il est légitime d'admettre que le spectre à puissance moyenne, dans les conditions conventionnelles de charge à l'heure chargée, a une forme gaussienne. Donc, l'effet de dispersion obtenu dans ces conditions est:

$$10 \log \left(\frac{\text{énergie maximum par 4 kHz}}{\text{énergie totale}} \right) = 10 \log \frac{0,004}{\sqrt{2\pi} \delta F} = - (28 + 10 \log \delta F) \quad \text{dB}$$

(où δF est exprimée en MHz)

En utilisant les renseignements figurant dans l'Annexe 1 à la Recommandation UIT-R S.675, on peut calculer l'effet de dispersion dans le cas où δF est inférieure à la plus élevée des fréquences de la bande de base.

Il existe un certain nombre de méthodes destinées à maintenir un degré élevé de dispersion d'énergie de la porteuse dans les systèmes de téléphonie. La dispersion obtenue est fonction de la complexité des méthodes de dispersion, et de l'accroissement de la largeur de bande occupée résultant de la distorsion. Les méthodes se subdivisent en une ou plusieurs méthodes prises dans deux classes générales, l'une qui consiste à ajouter au signal d'entrée une onde de dispersion n'ayant pas nécessairement une amplitude constante; l'autre qui, en plus, commande efficacement la sensibilité de l'excursion de fréquence du modulateur de fréquence. Différentes combinaisons de ces deux méthodes sont illustrées par la Fig. 1.

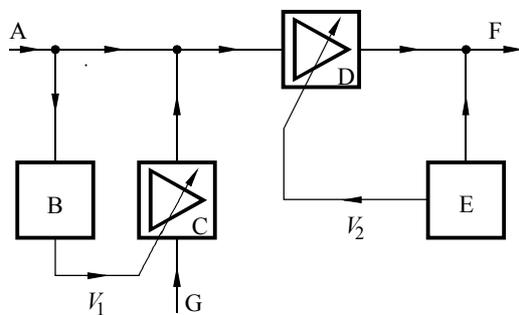
2.1 Dispersion par addition de signaux

2.1.1 Méthode 1a)

La méthode la plus simple pour introduire un certain degré de dispersion de l'énergie porteuse est d'ajouter au signal de bande de base une onde convenable de dispersion à basse fréquence, d'amplitude fixe, comme l'indique la méthode 1a) de la Fig. 1. Parmi les différentes ondes de dispersion qui ont été proposées, les suivantes font l'objet d'un examen dans la présente Annexe:

- un signal sinusoïdal (courbe A de la Fig. 2);
- un signal sinusoïdal auquel sont ajoutés, avec une phase convenable, 30% de l'harmonique 3 (courbe B de la Fig. 2);
- une bande de bruit à basse fréquence (courbe C de la Fig. 2);
- une onde triangulaire à basse fréquence (courbe D de la Fig. 2).

FIGURE 1
Schéma de principe



A: signal de bande de base
 B: détecteur quadratique
 C: amplificateur 1
 D: amplificateur 2
 E: détecteur quadratique
 F: sortie vers le modulateur de fréquence
 G: signal de dispersion

Méthode

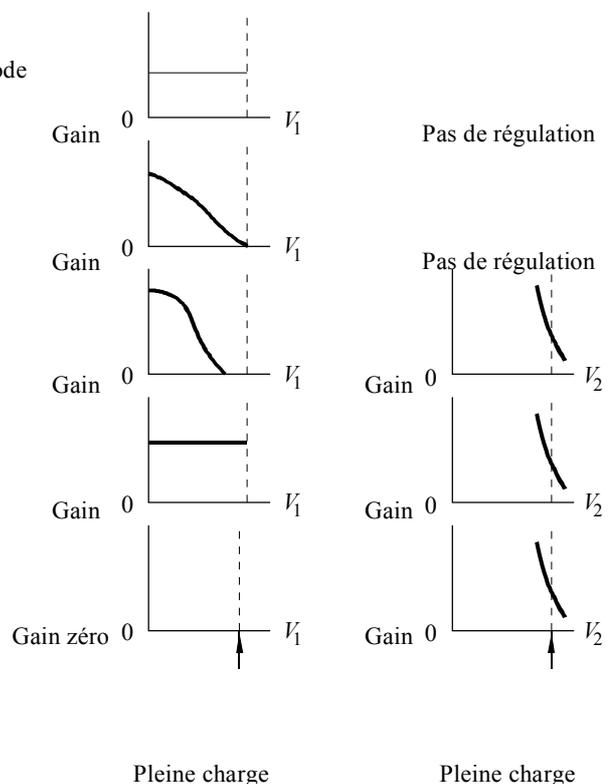
1a)

1b)

2a)

2b)

2c)



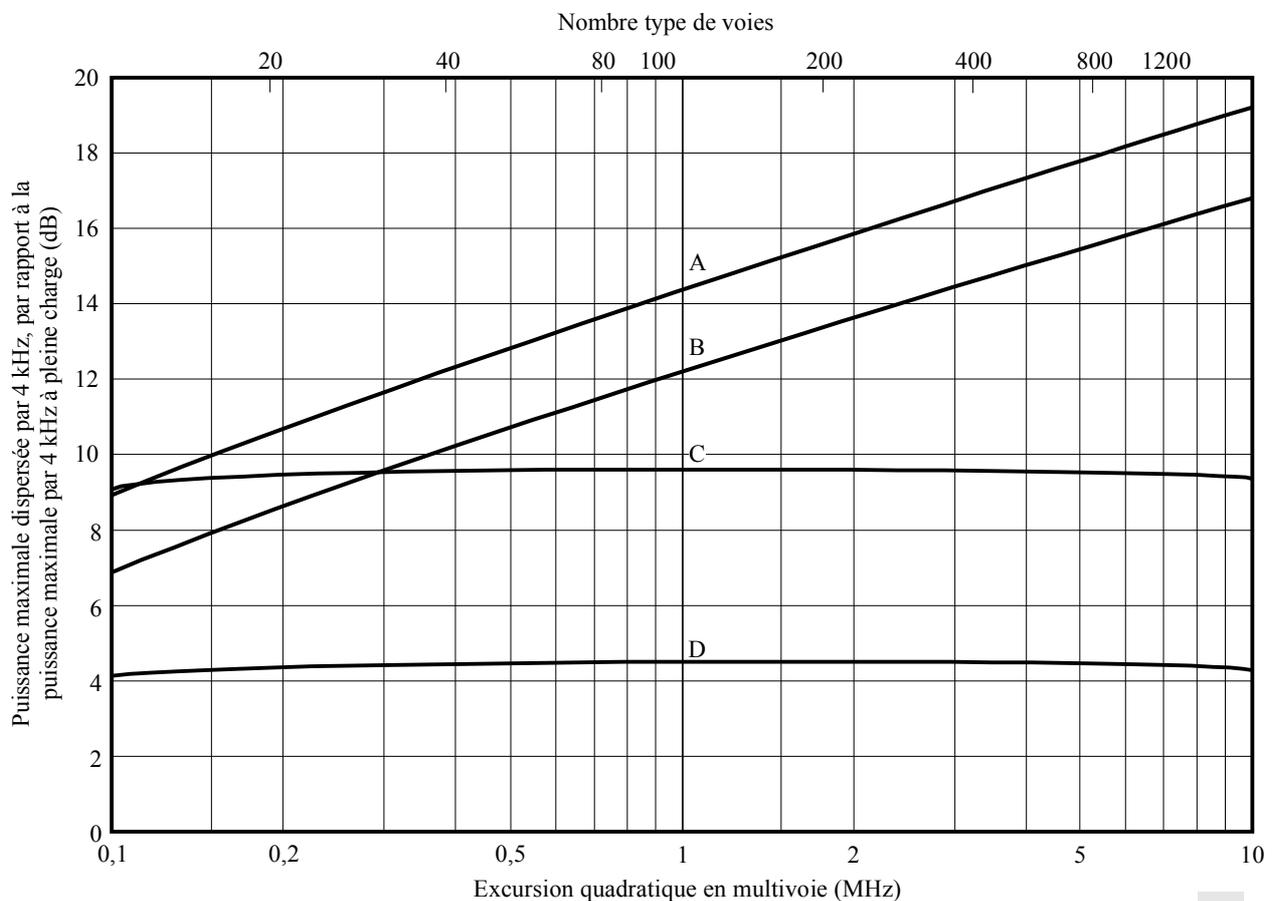
(On n'a pas représenté les amplificateurs, filtres séparateurs, ni les pilotes de régulation de gain)

Afin de fournir une base de comparaison entre les rendements de ces différentes ondes, on a calculé la densité spectrale d'énergie maximale qu'elles produisent lorsqu'elles sont appliquées à une porteuse non modulée, en admettant une augmentation de 10% de la largeur de bande occupée en haute fréquence. Les résultats sont portés sur la Fig. 2, qui montre ce qui se produirait dans les conditions de charge de l'heure chargée; les courbes de la Fig. 2 ont été désignées de A à D comme indiqué ci-dessus. Cependant, certaines approximations ont été faites car on a éliminé le problème que pose la relation entre la distorsion du signal et la limitation de la largeur de bande en haute fréquence en admettant:

- que, partout, l'occupation de la largeur de bande suit la loi de Carson (avec un rapport valeur de crête/valeur quadratique moyenne égal à 12 dB);
- que cette formule relative à la largeur de bande peut également être appliquée à la somme de la valeur du signal et de la valeur quadratique moyenne des excursions de fréquence due à la dispersion, lorsque celle-ci est assurée par une bande de bruit;
- dans les autres cas, que la largeur de bande occupée en haute fréquence est augmentée par l'excursion crête-à-crête de l'onde de dispersion.

On ne pense pas que les erreurs ainsi introduites soient importantes; en tout cas, elles doivent se produire dans le même sens pour les différents types d'ondes. Comme approximation complémentaire, chaque type d'onde de dispersion est représenté à la Fig. 2 par une seule courbe.

FIGURE 2
Dispersion d'énergie dans les systèmes de téléphonie multivoie



2.1.1.1 Dispersion sinusoïdale

Il est évident, d'après la courbe A de la Fig. 2, que la dispersion d'énergie porteuse produite par un signal sinusoïdal est assez inefficace, tandis que la courbe B montre qu'un signal sinusoïdal, auquel sont ajoutés 30% d'harmonique 3, ne procure qu'une amélioration de 2 dB. Pour la transmission de type classique de 20 voies, la densité maximale de puissance, dans les deux cas, dépasse d'environ 10 dB la valeur constatée dans des conditions de pleine charge. C'est là un trait caractéristique de ces deux types de dispersion que la quantité, dont la densité de puissance dispersée dépasse la densité à pleine charge, croît avec la valeur quadratique moyenne de l'excursion de fréquence en multivoie et, par conséquent, avec la capacité en voies. Par exemple, pour 1200 voies, le dépassement est d'environ 18 dB.

2.1.1.2 Dispersion triangulaire

Pour un accroissement donné de la largeur de bande occupée, la méthode la plus efficace pour assurer la dispersion de l'énergie d'une seule raie spectrale est, au moins théoriquement, d'appliquer un signal triangulaire. La densité de puissance dispersée est inversement proportionnelle au pourcentage d'accroissement admissible pour la largeur de bande haute fréquence; la courbe D de la Fig. 2 montre que, si l'on autorise un accroissement de 10% de la largeur de bande occupée, la puissance dispersée par 4 kHz dépasse d'environ 4,5 dB la puissance correspondant aux conditions de pleine charge, cela pour la plupart des voies.

Avec l'utilisation d'une onde de dispersion de forme triangulaire à basse fréquence (≤ 1 kHz) dans des systèmes multivoies, un signal utile d'un système à une seule voie par porteuse peut être brouillé pendant des périodes significatives par la quasi pleine puissance d'une porteuse brouilleuse.

Le signal triangulaire offre évidemment un moyen simple et efficace de dispersion de l'énergie présente dans les raies spectrales isolées des transmissions téléphoniques. On doit se rappeler, toutefois, que son efficacité dépend de la fidélité de conservation de la forme de l'onde jusqu'à ce qu'il apparaisse comme une modulation de fréquence, notamment si un degré élevé de dispersion est requis. Si 32 dB de dispersion étaient requis pour une transmission à 1200 voies par exemple, un aplatissement de 0,25% seulement des extrémités de l'onde pourrait conduire à doubler localement la densité de l'énergie spectrale.

Dans certains cas, il faut filtrer le signal triangulaire avant son application, pour éviter que les harmoniques du fondamental ne perturbent les voies basses du multiplex téléphonique. Pour des fréquences de l'onde triangulaire inférieures ou égales à 150 Hz, et pour une fréquence basse de la bande de base multivoie égale à 4 kHz, le filtrage entraîne une déformation des points anguleux du signal et, en conséquence, des pointes de densité d'énergie aux extrémités du spectre de modulation en cas de faible charge.

Le Tableau 1 ci-après donne des valeurs mesurées de l'augmentation de la densité d'énergie aux extrémités du spectre par rapport à la densité à la fréquence centrale du spectre pour un multiplex à 132 voies, en fonction de la fréquence de l'onde triangulaire. Ce système utilisait une régulation discontinue à un seul échelon.

TABLEAU 1

Fréquence de l'onde triangulaire (Hz)	Augmentation de la densité d'énergie (dB)
20	3
80	5
150	7

Le filtre passe-bas utilisé était un filtre du type Tchebychev à sept pôles, de fréquence de coupure 2,7 kHz et dont l'affaiblissement à 4 kHz était égal à 34 dB.

On peut par contre tenir compte de la présence, à l'entrée du modulateur, de l'onde pilote de continuité, à condition qu'elle soit produite indépendamment du multiplex téléphonique. Dans les mêmes conditions de mesure que celles indiquées plus haut, l'application d'un pilote au niveau de -20 dBm0 permet de ramener l'augmentation des crêtes de densité d'énergie aux extrémités de bande de 7 à 3 dB.

2.1.1.3 Dispersion par une bande de bruit à basse fréquence

Une forme de dispersion de l'énergie porteuse qui n'est pas critique dans ses applications et qui partage avec la dispersion triangulaire la propriété de produire une densité spectrale d'énergie maximale inversement proportionnelle à l'amplitude du signal consiste à ajouter à la bande de base multivoie une bande de bruit à basse fréquence. La courbe C de la Fig. 2 montre que, pour un accroissement de 10% de la largeur de bande occupée, la puissance maximale dispersée par 4 kHz dépasse la puissance, aux conditions de pleine charge, d'environ 9,5 dB, quel que soit le nombre des voies.

NOTE 1 – Lorsque le niveau du signal de dispersion n'est pas fixe, on peut obtenir le degré de dispersion requis en appliquant d'autres méthodes.

2.1.2 Méthode 1b)

Une variante évidente de la méthode 1a) consisterait à introduire un dispositif d'ajustement automatique du degré de dispersion artificielle d'énergie en fonction de la charge du système, comme le montre la méthode 1b) de la Fig. 1. Il serait, en fait, possible, de cette façon, en utilisant par exemple la dispersion par bande de bruit, de maintenir la densité spectrale énergétique maximale d'une transmission à une valeur extrêmement voisine de sa valeur à la pleine charge sans aucun accroissement de la largeur de bande occupée. Les caractéristiques qui pourraient être obtenues en pratique dépendraient de la distorsion produite par l'interaction (du fait de la limitation de la largeur de bande et du fait des autres caractéristiques de transmission) entre le signal de dispersion, les signaux basse fréquence isolés et les voies téléphoniques actives dans les conditions de charge faible. Il est probable que ceci ne peut être fixé qu'expérimentalement car, jusqu'ici, aucune méthode n'a été généralement acceptée pour calculer la distorsion subie par les signaux modulés en fréquence au cours de la transmission, même dans le cas simple d'une charge de bruit blanc.

Une méthode particulière pour introduire les différents degrés de dispersion qui font l'objet du présent paragraphe consiste à introduire de la parole artificielle (c'est-à-dire du bruit à largeur de bande limitée) dans une proportion convenable des voies téléphoniques inoccupées. Bien qu'une dispersion complète puisse de cette façon être maintenue sans accroissement de la largeur de bande, la complexité des appareils que doit vraisemblablement exiger cette méthode présente un inconvénient sérieux, ainsi que la nécessité probable de l'appliquer aux pupitres d'où provient la bande de base.

2.2 Dispersion par commande automatique de l'excursion de fréquence

2.2.1 Généralités

Il est clair qu'il serait possible de régler le niveau du signal qui entre dans le modulateur de fréquence de façon à maintenir la valeur quadratique moyenne (ou la crête) de l'excursion de fréquence à une certaine valeur constante. Quel que puisse être le contenu de la bande de base, on pourrait obtenir simplement le niveau désiré en amplifiant suffisamment ou en amplifiant après addition d'une quantité fixe ou variable de dispersion artificielle. L'affaiblissement global de transmission de la bande de base du système serait maintenu sensiblement constant par compensation du gain après démodulation, par l'intermédiaire d'une fréquence pure provenant d'un pilote. Les possibilités sont discutées dans les paragraphes suivants.

2.2.2 Méthode 2a)

La méthode la plus générale permettant d'obtenir une dispersion de l'énergie porteuse, et dont les autres méthodes ne sont en quelque sorte que des formes dérivées, est la méthode 2a) de la Fig. 1. Elle consiste à superposer à la bande de base, avant l'intervention de la commande automatique de l'excursion de fréquence, une source de dispersion artificielle de l'énergie dont l'amplitude est fonction des conditions de charge. L'utilisation de cette méthode ne modifie pas, ou augmente très peu, la largeur de bande occupée en haute fréquence. De plus, si l'introduction de la dispersion artificielle était retardée jusqu'à l'approche des conditions de charge faible, il pourrait en résulter une diminution appréciable de la sensibilité du système aux bruits thermiques, à la distorsion et aux brouillages. L'amplitude de cette diminution de sensibilité dépendrait du pourcentage de la puissance de bande de base à pleine charge, attribuée aux signaux de parole. Comme dans le cas de la méthode 1b), il est souhaitable de procéder à une certaine détermination de la distorsion de la bande de base résultant de l'application de cette méthode; cependant, toutes choses égales par ailleurs, cette distorsion serait plus faible que dans la première méthode, étant donné que l'accroissement de l'excursion de fréquence par voie à charge faible rendrait le système moins sensible aux composantes de distorsions produites en haute fréquence.

En ce qui concerne le choix d'un moyen de dispersion artificielle à ajouter à la bande de base, celui-ci pourrait consister en l'un des signaux de dispersion à basse fréquence considérés au § 2. Le signal à bande de bruit, ressemblant à une ou plusieurs voies téléphoniques en activité ininterrompue, est peut-être préférable car il est modérément efficace et produit le même effet de dispersion, pour une valeur donnée de l'excursion de fréquence efficace, que le signal de la bande de base; il permet aussi une commande exacte de l'excursion de fréquence par un simple détecteur quadratique et ne présente aucune difficulté d'application aux amplitudes élevées.

2.2.3 Méthode 2b)

On peut, à titre de simplification mineure de la méthode précédente, maintenir à une valeur fixe l'amplitude du signal de dispersion ajouté. Il en résulterait un accroissement de la largeur de bande occupée en haute fréquence, moins important toutefois que dans la méthode 1a), pour le même degré de dispersion.

2.2.4 Méthode 2c)

L'absence complète d'un signal de dispersion artificielle dans le signal modulant réduirait la dispersion par commande automatique de l'excursion de fréquence à sa forme la plus simple. L'efficacité de la méthode semblerait dépendre du degré modéré de complexité que comporte le spectre de la bande de base même à charge faible. Malheureusement, il n'est pas possible de compter sur cela: en l'absence complète de toute activité de la voie téléphonique, la charge du système dégénérerait en un certain nombre de fréquences pilotes, résidus de porteuses et autres éléments de cette nature. Il peut exister suffisamment de signaux comme ceux-ci dans un système à grande capacité pour produire dans la bande de base quelque semblant de puissance uniformément répartie, mais ceci ne semble plus devoir être vrai pour les systèmes à faible capacité. Dans de tels systèmes, notamment si beaucoup des résidus de porteuses se trouvent à un niveau exceptionnellement bas, les niveaux de charge les plus bas peuvent provenir d'un très petit nombre de pilotes prédominants.

On peut montrer que, si la charge d'un système ne résulte que d'une ou deux fréquences prédominantes dans la bande de base, les densités spectrales en haute fréquence peuvent dépasser d'un grand nombre de décibels celles obtenues à pleine charge. Il ne serait donc pas raisonnable de compter sur la présence de quelques fréquences pour obtenir, par le seul moyen de la commande automatique de l'excursion de fréquence, un degré de dispersion d'énergie analogue à celui qui résulte de la pleine charge.

2.3 Résumé

Si l'on en vient à considérer les méthodes d'application du signal de dispersion, on constate que l'utilisation de la méthode 1a) entraînerait un accroissement excessif de la largeur de bande occupée si l'on désirait se rapprocher des conditions de charge à l'heure de pointe. C'est pourquoi la méthode 1b), qui introduit en fonction de l'état de charge du système des moyens automatiques d'ajustement du degré de dispersion, offre une solution beaucoup plus intéressante.

La méthode 2 est plus compliquée que la méthode 1, mais elle permet de tirer profit de la nécessité de réaliser une dispersion d'énergie en améliorant les caractéristiques de bruit du système lorsque la sensibilité de l'excursion de fréquence est elle-même augmentée, dans des conditions de charge faible. L'inconvénient évident de cette méthode est la nécessité d'assurer une régulation globale du gain, alors que l'importance de l'avantage, procuré par des charges faibles, dépend de la charge en dehors des périodes chargées de la journée. Parmi les variantes de la méthode 2 étudiées dans le § 2.1, la méthode 2a) semble être la mieux adaptée à une application généralisée.

Pour toute méthode qui requiert un brusque changement de l'importance de la dispersion supplémentaire en fonction de la variation de la charge, il faut choisir soigneusement l'intervalle de temps entre la variation de la charge et le moment où l'on procède à la commutation de la dispersion.

En étudiant l'importance de la dispersion qui peut être obtenue en pratique, on doit avoir présent à l'esprit que les conditions de pleine charge ne fournissent pas nécessairement le degré de dispersion que suppose une distribution de Gauss. Il ne serait pas raisonnable de supposer qu'en pratique cette condition idéale est remplie tant qu'on ne possède pas d'argument convaincant en faveur d'une telle hypothèse. Des mesures pratiques effectuées avec une charge de bruit blanc ont montré que les systèmes utilisant un signal de dispersion triangulaire peuvent maintenir la dispersion de l'énergie porteuse dans les limites de 2 dB lorsqu'on simule les conditions de charge à l'heure de pointe. On ne sait pas encore dans quelle mesure on se rapprochera de ces conditions dans la pratique, mais il semble peu judicieux de supposer que l'énergie sera dispersée à moins de 3 dB de la valeur correspondant aux conditions de charge de l'heure de pointe, sans augmenter la largeur de bande en haute fréquence.

3 Méthodes de dispersion de l'énergie à utiliser avec des systèmes à modulation de fréquence par signaux de télévision analogiques

3.1 Introduction

Dans un système de transmission de télévision utilisant la modulation de fréquence, une proportion importante de la puissance rayonnée peut, dans certaines conditions de modulation, être concentrée sur, ou au voisinage de, la fréquence porteuse: par exemple, lorsqu'on transmet une image de télévision comportant de grandes surfaces de même brillance. On peut obtenir une dispersion de l'énergie en ajoutant au signal vidéo, avant modulation, un signal convenable à basse fréquence.

Pour obtenir des renseignements sur la dégradation qui résulterait de l'utilisation de cette technique de dispersion de l'énergie, on a procédé à une étude expérimentale ayant pour but de déterminer les effets subjectifs que l'on obtient, avec des signaux de télévision monochrome à 625 lignes, lorsque l'on ajoute et que l'on supprime, par diverses méthodes, un certain nombre de signaux basse fréquence différents, utilisables aux fins de dispersion de l'énergie.

Pour déterminer l'effet de dispersion produit par cette méthode, on supposera, à titre d'exemple, que les caractéristiques d'ensemble du système réduisent l'amplitude crête-à-crête permise de l'onde de dispersion à 30% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo. S'agissant d'un système à 625 lignes utilisant le réseau normal de préaccentuation (Recommandation UIT-R F.405), l'excursion de

fréquence crête-à-crête de l'onde de dispersion sera égale à 9,4% de l'excursion de fréquence crête-à-crête du signal vidéo sans préaccentuation. Appelant ΔF en MHz l'excursion crête-à-crête du signal vidéo, la dispersion obtenue est environ:

$$10 \log \left(\frac{\text{énergie maximale par 4 kHz}}{\text{énergie totale}} \right) = 10 \log \frac{0,004}{0,094 \Delta F} = - (14 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

A titre de comparaison, la dispersion théorique obtenue dans le cas de la téléphonie est donnée par l'expression ci-après, en supposant que la distribution spectrale est gaussienne et que le rapport de la valeur de crête à la valeur quadratique moyenne est égal à 12 dB (voir le § 2.2.1):

$$- \left(28 + 10 \log \frac{\Delta F}{8} \right) = - (19 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

ce qui signifie que le cas de la télévision ne se trouve vraisemblablement qu'à quelque 5 dB au-dessous de l'optimum, pour une augmentation de quelque 10% de la largeur de bande haute fréquence.

En vue de réduire la largeur de bande, il serait souhaitable de pouvoir commander l'excursion de fréquence suivant la méthode 1b) du § 2.1. Il n'est pas évident qu'il soit possible d'employer une méthode simple, car il serait probablement nécessaire de contrôler la concentration de l'énergie dans le spectre haute fréquence.

En plus des méthodes de dispersion d'énergie spécifiées plus haut, deux autres systèmes sont décrits aux § 3.5 et 3.6. Le premier est un système de dispersion par transformation vidéo; le second met en œuvre des techniques de dispersion utilisées pour améliorer la protection fournie aux transmissions téléphoniques SCPC, pour lesquelles la fréquence du signal dispersé est égale à la fréquence de ligne de la télévision. Le § 3.6 décrit également une technique composite de dispersion d'énergie par laquelle le signal de dispersion consiste en une onde triangulaire à la fréquence de trame et une onde soit triangulaire, soit sinusoïdale à la fréquence moitié de ligne. Cette technique peut être utilisée pour réduire les effets du brouillage causé à la fois aux systèmes téléphoniques MRF et aux porteuses SCPC.

3.2 Signal de dispersion

L'amplitude et la forme du signal de dispersion qui est ajouté au signal vidéo avant modulation doivent produire le degré requis de dispersion de la puissance porteuse, sans apporter de dégradation appréciable aux caractéristiques de transmission du système. Cette dernière condition dépend également, d'une part de l'efficacité de la méthode utilisée pour supprimer le signal ajouté, d'autre part de la linéarité globale du système de transmission. Afin de déterminer le signal préféré, on a étudié de façon assez détaillée deux types de signaux triangulaires (le signal triangulaire «symétrique» et le signal «en dents de scie») ayant des fréquences de récurrence centrées au voisinage de 50, 25 et 12,5 Hz.

On a pensé obtenir le résultat optimal en synchronisant le signal de dispersion sur la fréquence de trame du signal de télévision; on a également pensé que la mise en phase relative des signaux synchronisés pourrait, dans certains cas, introduire des variations dans la dégradation de l'image. On a examiné ces influences en utilisant à la fois des signaux de dispersion synchronisés et non synchronisés et, en ce qui concerne la dégradation de l'image reçue, les essais ont montré qu'il y a un avantage considérable à utiliser des signaux de dispersion synchronisés plutôt que des signaux non synchronisés. Comme la production de signaux synchronisés sur la fréquence de trame de télévision ne présente pas de problèmes pratiques, les autres essais furent limités à des signaux synchronisés.

Le procédé de synchronisation doit normalement assurer une mise en phase correcte du signal avec le signal de trame de télévision. Avec les signaux en dents de scie à 50, 25 et 12,5 Hz et les signaux symétriques à 25 et 12,5 Hz, tous les points d'inflexion se présentent pendant l'intervalle de

suppression trame, et les discontinuités dans la pente du signal ne se traduisent pas par une dégradation de l'image. Avec le signal symétrique à 50 Hz, seuls les points d'inflexion alternés peuvent coïncider avec l'intervalle de suppression trame, et les autres points se présentent au point milieu de chaque trame (c'est-à-dire au milieu de l'image).

Il est apparu vraisemblable que le niveau crête-à-crête du signal de dispersion requis pour la dispersion de l'énergie était situé entre 10 et 50% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo avant préaccentuation, et les essais ont été limités à cette gamme de niveaux.

Il a été proposé une méthode qui permet d'élever le niveau de dispersion sans augmenter en même temps l'excursion de fréquence de crête. Dans cette méthode, les crêtes qui se forment sur les flancs de l'impulsion vidéo sous l'effet du réseau de préaccentuation normal sont soumises à un processus non linéaire avant la modulation. Ce processus a pour effet de réduire l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo, ce qui permet d'accroître la dispersion à l'intérieur de la largeur de bande nominale du système.

Un autre facteur dont il faut tenir compte dans la réalisation des systèmes de dispersion d'énergie est la présence probable d'une dispersion «naturelle» due à des imperfections des éléments du système. Par exemple, les systèmes avec élévateurs de fréquence peuvent introduire un niveau non négligeable de dispersion en raison de la «gigue» qui se produit dans les oscillateurs. Il faut poursuivre l'étude pour déterminer de quelle manière la dispersion «naturelle» pourrait contribuer à la coordination, sans provoquer, en même temps, une diminution inacceptable de la qualité de fonctionnement du système subissant la dispersion.

3.3 Linéarité de la voie de transmission

Lorsque la voie de transmission présente des non-linéarités, il peut se produire des phénomènes d'intermodulation entre le signal de dispersion et le signal vidéo. Dans ce cas, des défauts gênants peuvent apparaître dans l'image de télévision et particulièrement dans l'image en couleur. A titre d'exemple, des essais, effectués avec le système PAL et un signal de dispersion triangulaire symétrique à 50 Hz (synchronisé sur le balayage de trame) et d'environ 0,5 V crête-à-crête, mesuré avant préaccentuation en un point où le signal vidéo est au niveau nominal de référence (voir la Recommandation UIT-R F.270), ont montré que l'image possédait un indice de qualité subjective égal à 3 dans l'échelle de dégradation à six notes dans les conditions suivantes:

- phase différentielle 8°
- gain différentiel 10%
- non-linéarité à court terme 10%.

Il paraît souhaitable de poursuivre les études à ce sujet afin de déterminer la limite acceptable des non-linéarités pour les divers systèmes de télévision, dans une liaison de télévision par satellite utilisant la dispersion d'énergie.

3.4 Suppression du signal de dispersion

A la station de réception terrienne, le signal de dispersion doit être éliminé du signal de bande de base; les deux méthodes ci-après ont été proposées.

3.4.1 Annulation du signal de dispersion

Le signal de dispersion peut être éliminé du signal de bande de base par «annulation» à l'aide d'un signal de dispersion en opposition de phase produit localement. Il peut être utile de transmettre le signal de dispersion dans une voie subsidiaire et d'avoir ainsi un autre moyen pour reproduire le signal localement.

Deux méthodes d'annulation sont possibles. Dans la première, le signal de dispersion peut être ajouté en opposition de phase, après démodulation. Dans la seconde, l'oscillateur local du récepteur de la station terrienne est modulé en fréquence par le signal de dispersion en opposition de phase. L'avantage de cette méthode est le suivant: étant donné que la dispersion d'énergie est annulée avant la démodulation du signal MF, il n'est pas nécessaire d'augmenter la largeur de bande en fréquence intermédiaire du discriminateur. Des expériences effectuées récemment ont montré que l'annulation du signal suivie d'une «fixation» (comme il est décrit dans le § 3.4.2) constitue une méthode efficace, qui supprime le signal de dispersion plus complètement qu'une ou deux «fixations» seulement.

3.4.2 Fixation du niveau du noir

Les effets du signal de dispersion sur le signal de bande de base peuvent être supprimés par l'utilisation d'une technique bien connue en télévision sous le nom de «fixation du niveau du noir». Le dispositif mis en œuvre à cette fin est normalement utilisé pour supprimer la distorsion basse fréquence d'un signal de télévision, par échantillonnage et correction d'erreur.

La quantité dont peut être réduit un signal d'erreur à basse fréquence au moyen de la «fixation du niveau du noir» est fonction de la fréquence du signal d'erreur et du niveau du bruit aléatoire présent dans le signal vidéo. Comme les premiers systèmes à satellites pourront être amenés à transmettre des signaux vidéo ayant un rapport signal/bruit médiocre, les caractéristiques des dispositifs de «fixation du niveau du noir» utilisés dans ces essais ont été ajustées de façon à être cohérentes avec les caractéristiques optimales que l'on peut obtenir avec des systèmes à 625 lignes fonctionnant dans des conditions de rapport signal/bruit médiocre. Le Tableau 2 donne des caractéristiques typiques pour les signaux d'erreur sinusoïdaux.

TABLEAU 2

Fréquence du signal d'erreur (Hz) (onde sinusoïdale)	50	25	12,5
$\frac{\text{Niveau de sortie crête - à - crête du signal d'erreur}}{\text{Niveau d'entrée crête - à - crête du signal d'erreur}}$ (dB)	-15	-21	-27

(On doit noter que, lorsque la fréquence du signal d'erreur décroît, l'efficacité de la fixation du niveau du noir et la visibilité du scintillement sur l'image croissent toutes deux; du point de vue de la dégradation subjective, ces deux effets ont donc tendance à s'annuler.)

L'application de la «fixation du niveau du noir» à un signal d'erreur ayant une forme triangulaire produit un résultat analogue à celui qu'on obtiendrait si le signal d'erreur était différencié et, avec les niveaux qui peuvent être nécessaires dans un système réel de dispersion d'énergie, un seul dispositif de «fixation du niveau du noir», du type décrit, ne suffit pas pour réduire à un niveau acceptable des défauts introduits par l'un quelconque des signaux considérés.

A ce stade, il faut mentionner une différence capitale entre les signaux «en dents de scie» et les signaux «symétriques». Étant donné que la pente du signal «en dents de scie» est constante durant la partie «active» de chaque trame, le seul défaut qui puisse être observé sur un récepteur de contrôle, après que le signal vidéo a subi la fixation du niveau du noir, est une ombre légère et probablement insignifiante à travers l'image. Cependant, la pente très grande du signal de dispersion durant l'intervalle de suppression trame produit, pendant cette période, une distorsion sérieuse du signal de dispersion, dont l'amplitude dépend du niveau du signal de dispersion utilisé. En pratique, cette distorsion est des plus indésirables car elle peut interférer à la fois avec les signaux de synchronisation et les signaux d'essai d'intervalle vertical qui se produisent pendant l'intervalle de suppression trame. Il est également très difficile de supprimer ce type de distorsion lorsqu'il a été introduit dans le signal vidéo.

Avec le signal «symétrique», le défaut résiduel qui reste après une seule «fixation du niveau du noir» peut être observé comme un défaut d'image. Avec un signal à 50 Hz, le défaut apparaît comme une perturbation au milieu de l'image. Pour les signaux à 25 et 12,5 Hz, on observe un scintillement. Cet effet dépend également du niveau du signal de dispersion utilisé, mais, si l'on répète une nouvelle fois l'opération de «fixation du niveau du noir», on réduit le scintillement à un niveau imperceptible, même avec un signal de dispersion ayant une amplitude égale à 50% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo.

Bien que les caractéristiques de la distorsion du signal après deux «fixations» soient quelque peu différentes, l'amplitude de la distorsion résiduelle, lorsqu'on utilise un signal de dispersion symétrique, est d'environ 10 à 20 dB inférieure à ce qu'elle est lorsqu'on utilise un signal «en dents de scie».

3.4.3 Contre-réaction de fréquence

Il est possible de supprimer le signal de dispersion en appliquant une contre-réaction de fréquence à bande étroite, dans l'étage FI du récepteur. L'avantage de cette méthode est de permettre une diminution de la largeur de bande effective du récepteur, ce qui améliore le seuil de bruit de cet appareil.

Dans une application particulière de ce principe, on a choisi un signal de dispersion de 2,5 Hz. Dans le récepteur, le signal de dispersion est supprimé par un circuit de contre-réaction négative qui contient un filtre basse fréquence dont la fréquence de coupure est inférieure à la fréquence la plus basse du signal vidéo. De ce fait, l'excursion de fréquence provoquée par le signal de dispersion diminue d'une valeur qui dépend du degré de contre-réaction appliqué; il est facile d'obtenir une réduction de 15 dB. L'amplitude du signal vidéo n'est pas affectée.

3.5 Dispersion par transformation du signal vidéo

Avec une modulation angulaire du signal de télévision, la dispersion de l'énergie porteuse peut être effectuée en inversant la polarité du signal vidéo ligne par ligne et en remplaçant les impulsions de synchronisation de ligne et de trame par des paquets d'oscillations sinusoïdales. La période de chaque paquet est égale à celle de l'impulsion de synchronisation correspondante et l'amplitude crête-à-crête des oscillations sinusoïdales est égale à celle du signal vidéo.

3.6 Signal de dispersion d'énergie à la fréquence de ligne

Avant de lire le texte qui suit, il convient de noter que l'utilisation d'un signal de dispersion d'énergie à la fréquence de ligne exige une étude plus approfondie de la qualité générale de fonctionnement de la chaîne de réception TV pour des signaux analogiques composites classiques et des répercussions sur les formats de signaux codés ou de composantes analogiques.

Le signal classique de dispersion d'énergie en télévision est un signal triangulaire dont la fréquence est égale à la moitié de la fréquence de trame; il ne procure aucune protection aux émissions comportant une seule voie par porteuse (SCPC). La raison en est que, avec le taux de balayage de fréquence qui en résulte, soit environ 1 MHz par 1/50 s, le temps passé par la porteuse de télévision à l'intérieur de la bande passante de réception SCPC est beaucoup plus long que le temps de réponse du filtre FI du récepteur. En conséquence, le démodulateur du récepteur SCPC est périodiquement brouillé par la puissance totale de la porteuse de télévision.

Selon des études faites aux Etats-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie et en France, il est possible d'utiliser la dispersion d'énergie à la fréquence de ligne de télévision pour réduire de 9 à 10 dB la marge de protection nécessaire des émissions MIC-MDP-SCPC contre les porteuses TV-MF en comparaison avec la dispersion d'énergie à la moitié de la fréquence de trame.

Si on utilise un signal de dispersion à la fréquence de ligne, le niveau du brouillage causé à des circuits par satellite et à des circuits de faisceaux hertziens de Terre de porteuses MRF-MF à faible indice de modulation est supérieur au brouillage qui serait causé par un signal de dispersion basse fréquence (fréquence de trame ou fréquence plus basse). Les effets de cette dégradation supplémentaire dépendent des caractéristiques des systèmes en cause et des dégradations de plus de 7 dB ont été observées.

Etant donné la possibilité de brouillage causé par les signaux TV-MF aux systèmes SCPC et aux faisceaux hertziens de Terre, il peut être avantageux d'utiliser un signal de dispersion composite avec des composantes lentes (par exemple, fréquence de trame) et rapides (par exemple, fréquence de ligne).

Des études analytiques ainsi que des mesures récentes ont démontré en réalité qu'un signal d'étalement composite pouvait même donner lieu à un rapport C/I plus faible que celui qu'on obtient en utilisant uniquement la dispersion à la fréquence de ligne.

D'après les mesures effectuées à la fois avec une onde triangulaire et une onde sinusoïdale représentant la composante d'étalement rapide, il a été possible de conclure qu'un système d'étalement composite utilisant l'une ou l'autre de ces deux ondes offrirait une qualité de fonctionnement analogue.

L'utilisation d'un signal sinusoïdal présente toutefois des avantages par rapport au signal triangulaire en ce sens que le premier type de signal est beaucoup plus facile à supprimer que le second. On peut donc s'attendre à de faibles valeurs de la puissance résiduelle correspondant au signal de dispersion d'énergie, même avec les circuits simples qu'utilisent les récepteurs domestiques, circuits qui sont disponibles à un prix modéré sur le marché; de plus la dégradation de la qualité du signal de télévision devrait être insignifiante.

Une solution viable consiste à adopter un schéma de modulation de dispersion d'énergie mixte à partir d'une composante triangulaire dont le rapport Δf (demi-fréquence de ligne)/ Δf (totale) soit compris entre 0,75 et 1. Des mesures ont démontré que la densité spectrale de crête du signal TV-MF n'est pas majorée si ce système est utilisé à la place d'autres systèmes de dispersion d'énergie, de telle sorte que les porteuses TV-MF modulées peuvent satisfaire aux limites de puissance surfacique prescrites dans le Règlement des radiocommunications. Il faut néanmoins poursuivre les études pour pouvoir établir une évaluation quantitative de la complexité accrue qui serait introduite dans les récepteurs, ainsi qu'une évaluation subjective de la qualité du signal de télévision après suppression du signal de dispersion d'énergie composite.

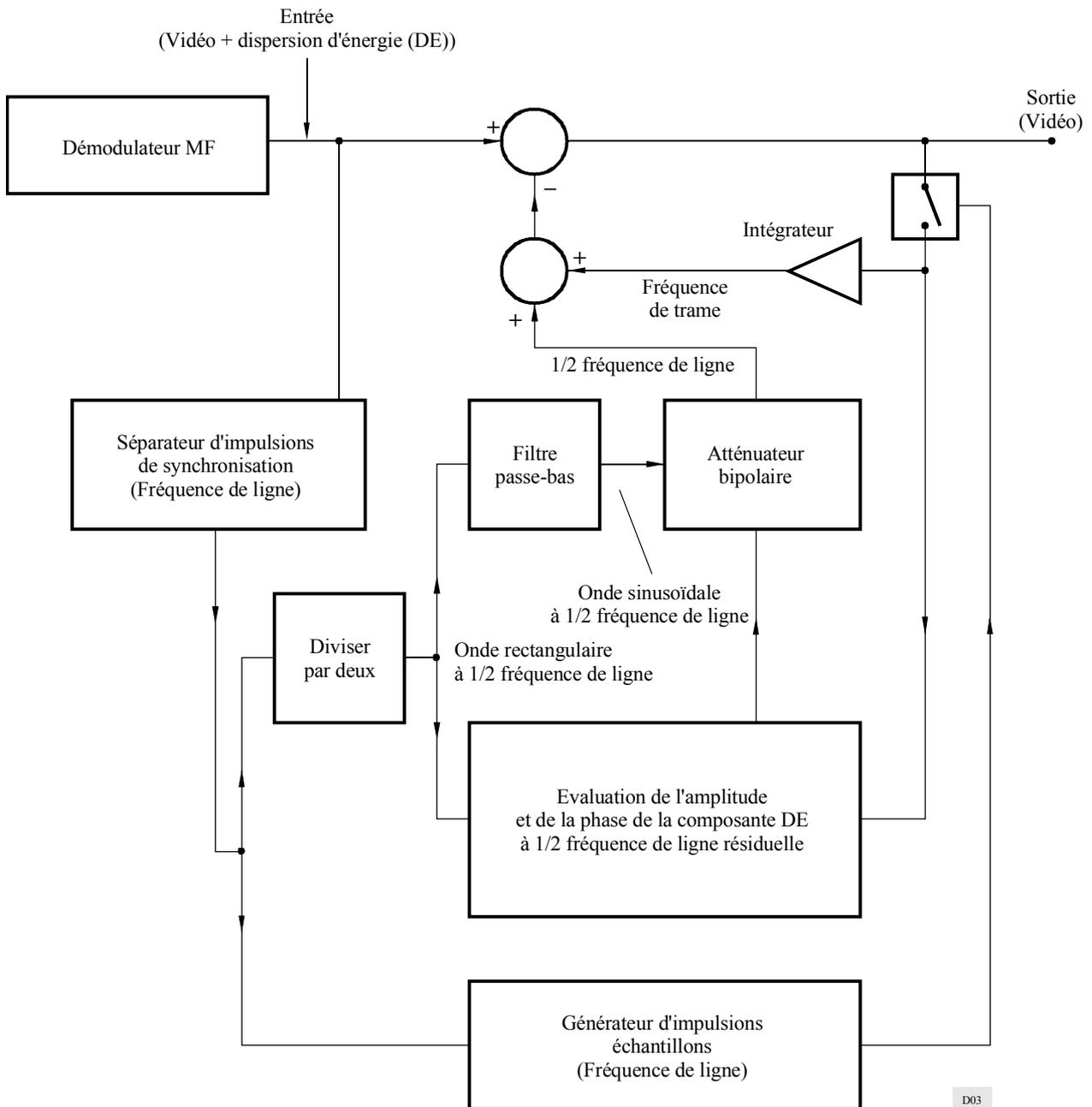
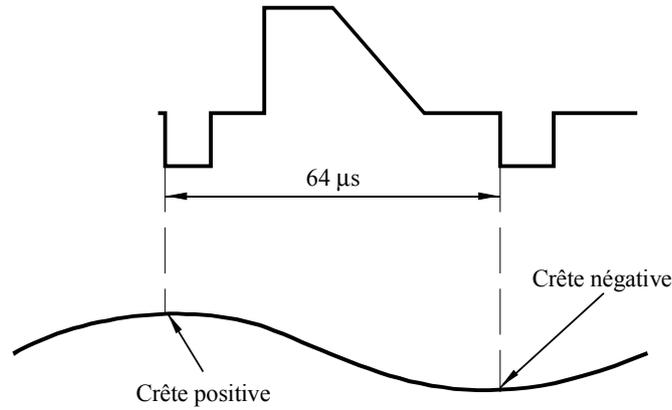
A titre d'exemple, la Fig. 3 indique une méthode de suppression du signal composite de dispersion d'énergie utilisant un échantillonneur-bloqueur intégrateur qui s'aligne sur le niveau du noir et supprime la dispersion d'énergie à la fréquence de trame, complété par un circuit de suppression de la dispersion d'énergie sinusoïdale à demi-fréquence.

Les crêtes de la composante à la demi-fréquence de ligne sont agencées pour correspondre aux points d'impulsion de la synchronisation de ligne. On utilise l'échantillonnage à ces points pour contrôler les deux composantes de la dispersion d'énergie.

Le circuit de suppression de la composante à la demi-fréquence de ligne génère une onde sinusoïdale à la demi-fréquence de ligne à partir des impulsions de synchronisation. Son amplitude est contrôlée en boucle fermée par traitement des échantillons du signal vidéo de sortie afin de ramener à zéro les composantes résiduelles à la demi-fréquence de ligne. L'atténuateur bipolaire supprime l'ambiguïté de phase de 180° causée par l'opération de division par deux.

FIGURE 3

Exemple d'une méthode de suppression d'une onde de dispersion d'énergie composite, à fréquence de trame/demi-fréquence de ligne



4 Méthodes de dispersion de l'énergie à utiliser avec des signaux numériques

4.1 Généralités

Lorsque le train d'impulsions d'information présente une structure aléatoire, l'énergie de la porteuse radioélectrique est suffisamment dispersée pour qu'il y ait affaiblissement des crêtes de la puissance surfacique produite à la surface de la Terre par les émissions de la station spatiale. En revanche, si ce train d'impulsions comprend une structure fixe avec répétition périodique, il apparaît des composantes de raies dans le spectre de la porteuse radioélectrique, la conséquence étant que certaines crêtes de la puissance surfacique produite à la surface de la Terre peuvent dépasser le niveau recommandé par l'UIT.

Les méthodes de dispersion d'énergie décrites ici ont pour but de réduire les crêtes du spectre, en produisant un train d'impulsions de transmission semblable à une structure aléatoire, quelles que soient les structures contenues dans ce train d'impulsions. On trouvera au § 4.3 la description de deux méthodes de dispersion de l'énergie.

4.2 Spectre des signaux numériques à modulation par déplacement de phase

Le spectre d'une porteuse modulée par des inversions de phase idéales se compose de «raies»; pour une séquence pseudo-aléatoire comprenant N symboles ayant chacun une durée de t secondes, les raies sont espacées de $1/Nt$ (Hz). Le spectre de puissance de ces raies est donné, en première approximation, par l'expression suivante:

$$W(f) \approx \frac{1}{N} \left\{ \frac{\sin \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \delta \left(f - f_c - \frac{n}{Nt} \right) \quad (1)$$

où:

N : longueur de la séquence pseudo-aléatoire (symboles)

t : durée du symbole (s)

n : nombre entier

f_c : fréquence de la porteuse radioélectrique (Hz)

δ : fonction delta.

La raie ayant l'amplitude maximale correspond à $n = 1$.

Lorsque la longueur de la séquence tend vers l'infini ($N \rightarrow \infty$), on a $Nt \rightarrow \infty$ et l'espacement des raies tend vers zéro. On obtient alors un spectre continu:

$$W(f) = t \left\{ \frac{\sin \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \text{ par Hz} \quad (2)$$

On voit que, dans ce cas, la densité spectrale maximale correspond à la fréquence de la porteuse.

La formule (2) donne la valeur moyenne du spectre de puissance dans le cas idéal d'un train d'impulsions aléatoires. En fait, le signal modulant peut s'écarter considérablement de la forme aléatoire. Par exemple, dans le cas de la téléphonie MIC utilisant 8 bits par échantillon, il est probable qu'il y aura une périodicité bien marquée ($1/8$ du débit binaire) et, pendant les périodes où le volume de trafic sera peu important, il pourrait se faire que le signal émis soit constitué presque entièrement de zéros. Dans ces conditions, le spectre de la modulation par déplacement de phase aura une grande partie de sa puissance concentrée dans une seule raie spectrale, ou dans un petit nombre de raies, et le facteur de dispersion pourra être voisin de 0 dB.

S'ajoutant au caractère non aléatoire de la partie «information» du signal, il y aura aussi des structures répétitives dans les préambules des transmissions à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT).

D'autre part, dans un système réel le spectre subit des modifications du fait de la mise en forme des impulsions et/ou du filtrage après modulation. A noter cependant que ces effets sont les plus sensibles aux limites du spectre et que la densité spectrale maximale ne s'en trouve guère affectée.

Pour obtenir le degré de dispersion voulu, on peut faire l'addition modulo 2 d'une séquence pseudo-aléatoire de durée Nt et du train de bits ou de symboles d'information, comme le montre la Fig. 4.

Pour une largeur de bande de référence de 4 kHz, on peut définir comme suit un facteur de dispersion d'énergie (D):

$$D = 10 \log \frac{\text{puissance totale}}{\text{puissance maximale par bande de 4 kHz}} \quad (3)$$

Lorsqu'on utilise une séquence pseudo-aléatoire pour effectuer la dispersion d'énergie, le degré de dispersion peut être évalué à l'aide des formules (1) et (3) pour $1/Nt \geq 4$ kHz, et à l'aide des formules (2) et (3) pour $1/Nt < 4$ kHz.

Les expressions ci-dessus montrent que le degré de dispersion est proportionnel à N tant que la durée de la séquence demeure inférieure à l'inverse de la largeur de bande de référence. On gagne peu en dispersion dès que la durée de la séquence atteint 250 μ s (largeur de bande de référence de 4 kHz).

4.3 Méthodes de dispersion de l'énergie

4.3.1 Méthode 1: «Embrouilleur» pseudo-aléatoire

Cette méthode consiste à maintenir le train d'impulsions de transmission dans un état similaire à celui qu'il aurait dans le cas d'une structure aléatoire, quel que soit le degré d'occupation des voies. Pour ce faire, on réalise la synthèse d'une séquence pseudo-aléatoire provenant du train d'impulsions de transmission produit dans un générateur de code pseudo-aléatoire utilisant un circuit OU exclusif (additionneur modulo 2). La Fig. 4a) représente le schéma de l'équipement de ce système de dispersion de l'énergie à l'émission. Un équipement récepteur qui comporte un générateur de code pseudo-aléatoire produisant la même structure de code que dans l'équipement émetteur restitue l'information initiale: cette opération s'effectue par synthèse de la séquence de code pseudo-aléatoire produite par le générateur de code pseudo-aléatoire et du train d'impulsions de transmission, dans un circuit OU exclusif. La Fig. 4b) représente schématiquement un tel équipement en réception.

Un des avantages de cette méthode réside dans le fait que la dispersion n'entraîne aucune diminution de la qualité du train d'impulsions d'information. Son inconvénient est d'exiger la synchronisation du générateur de code pseudo-aléatoire de l'équipement de réception avec le générateur de l'équipement d'émission. Il faut signaler cependant que, dans le cas des systèmes AMRT, cette synchronisation peut être obtenue grâce au signal de synchronisation des paquets qui est fourni par l'équipement récepteur; dans ces conditions, on n'aura pas besoin de prévoir un dispositif supplémentaire pour la synchronisation.

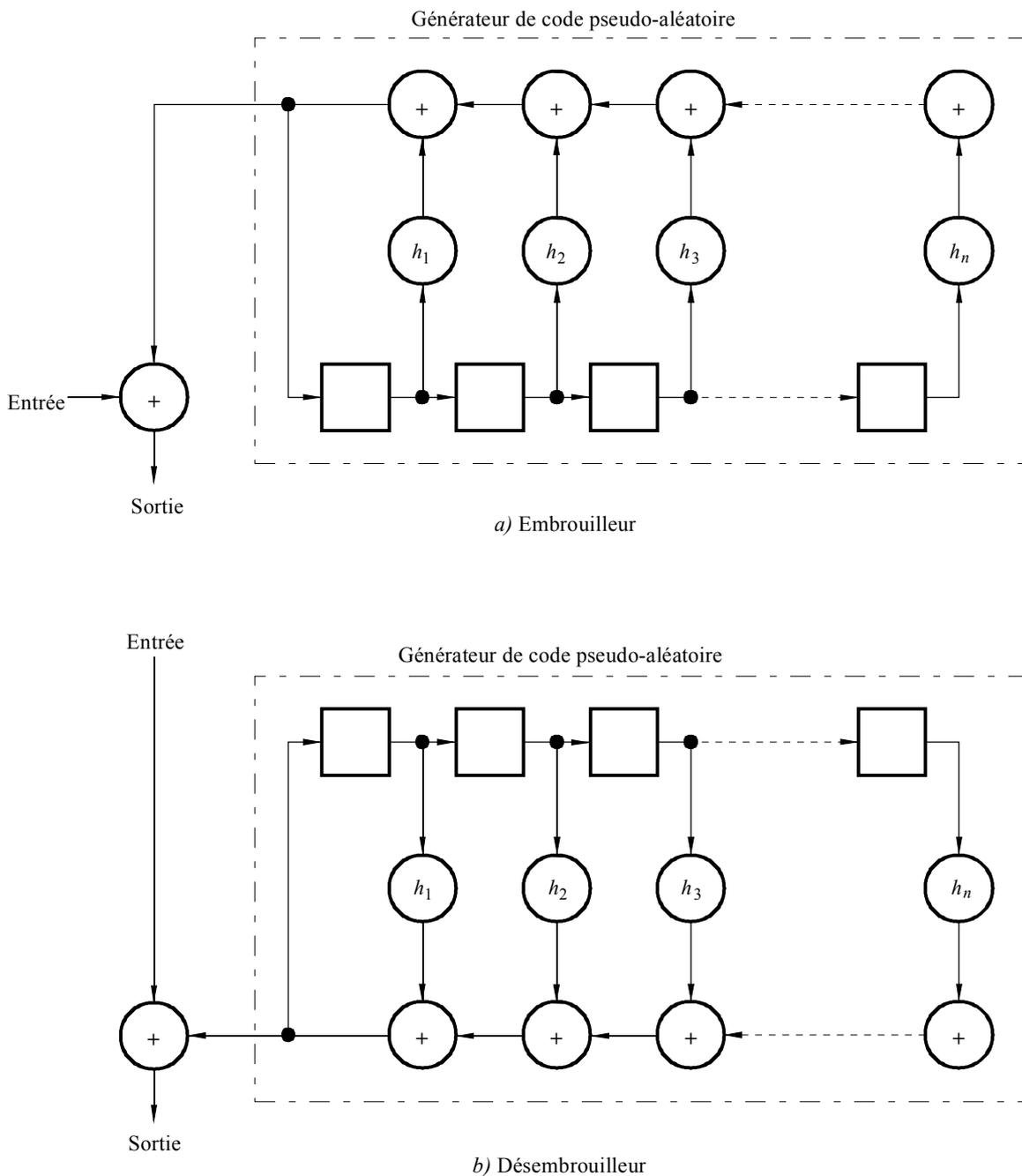
Il convient de noter que le débit de symboles de la séquence pseudo-aléatoire n'est pas forcément égal à celui du train d'impulsions d'information.

On a effectué des transmissions expérimentales de télévision numérique par satellite, dans lesquelles on a mesuré le facteur de dispersion d'énergie. Avec un signal MDP-4 à 60 Mbit/s et une séquence d'embrouillage pseudo-aléatoire à 11 échelons, on a mesuré un facteur de dispersion de 37 dB. Avec ce type de signal, le facteur de dispersion optimal serait théoriquement de 38,7 dB.

4.3.2 Méthode 2: «Auto-embrouilleur»

Pour mettre en œuvre cette méthode de dispersion d'énergie, on utilise respectivement dans l'équipement d'émission et dans l'équipement de réception des registres à décalage ayant une boucle de contre-réaction et une boucle de réaction. Dans l'équipement d'émission, on effectue une conversion de code pour chaque bit du train d'impulsions d'information. A la réception, chaque bit est reconverti afin de restituer le train d'impulsions d'information initial. Les Fig. 5a) et 5b) représentent respectivement un «embrouilleur» et un «désembrouilleur» typiques.

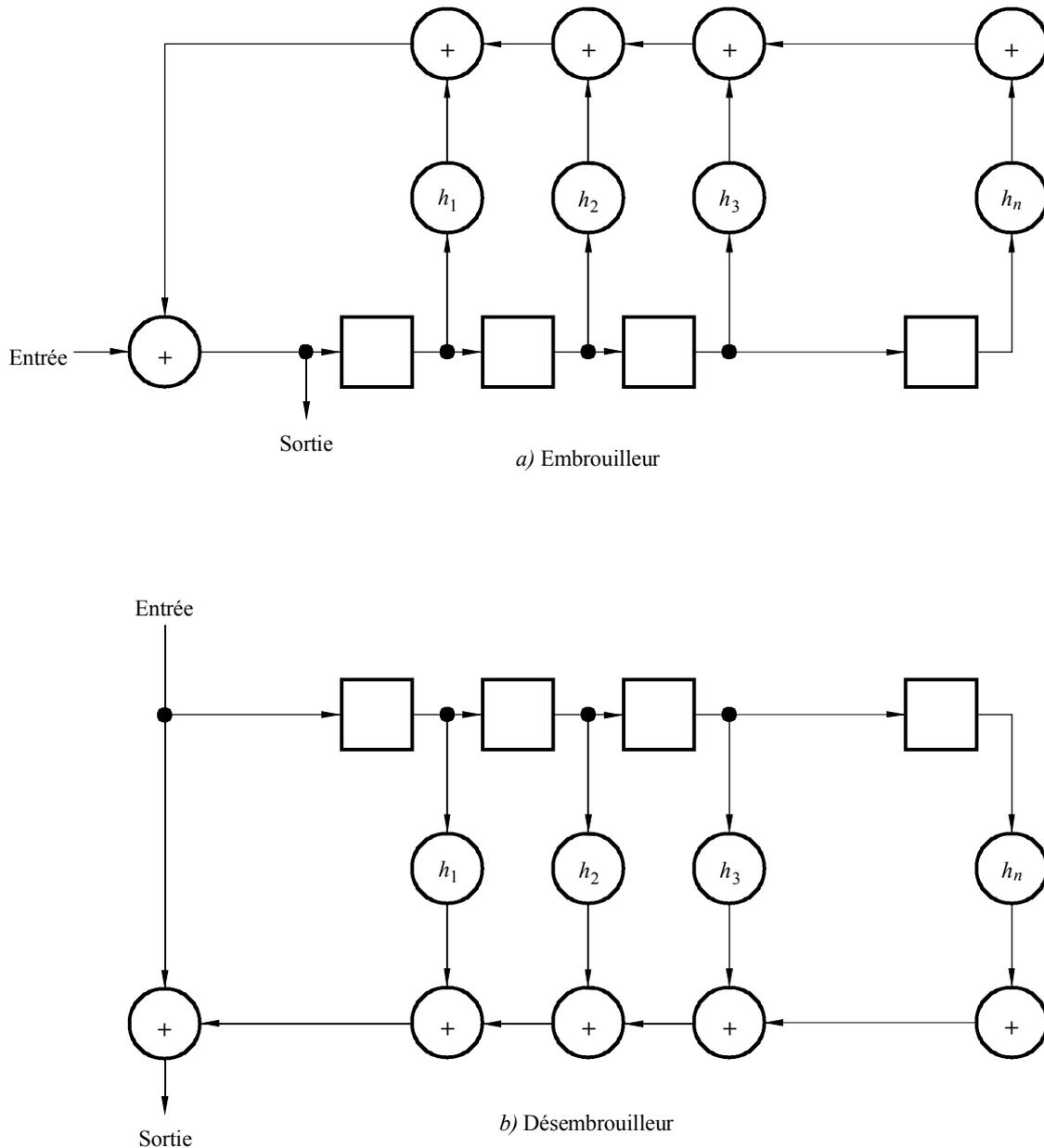
FIGURE 4
Exemple de circuits de dispersion d'énergie pour la méthode 1



Note 1 - $h_1, h_2 \dots h_n$ représentent les connexions internes du registre à décalage qui déterminent la séquence de code.

FIGURE 5

Exemple de circuits de dispersion d'énergie pour la méthode 2



Note 1 – $h_1, h_2 \dots h_n$ représentent les connexions internes du registre à décalage qui déterminent la séquence de code.

D05

Un des avantages de cette méthode de dispersion de l'énergie réside dans le fait que l'on n'a pas besoin de synchroniser l'«embrouilleur» et le «désembrouilleur». Il faut toutefois signaler l'inconvénient suivant: si l'on désigne par r le nombre d'étages du registre à décalage, l'état initial de ce registre affecte les r premiers bits du train d'impulsions de transmission; en conséquence, un seul bit erroné dans le canal radioélectrique affecte les r bits qui le suivent. A noter cependant que cette méthode peut être associée à un système de détection et de correction des erreurs; elle peut donner une dispersion efficace de l'énergie dans les systèmes de transmission de données MIC, en particulier ceux qui fonctionnent selon le mode continu, par opposition au mode AMRT.

4.4 Facteur de dispersion de l'énergie dans les systèmes AMRT

Le degré de dispersion obtenu avec la méthode 1 est directement proportionnel à la longueur de la séquence pseudo-aléatoire. Toutefois, il n'y a aucun intérêt à utiliser une séquence d'une durée supérieure à 250 μ s puisque les raies du spectre de dispersion auraient alors une séparation inférieure à 4 kHz. Dans un système AMRT, le signal pseudo-aléatoire produit dans le récepteur peut être très facilement synchronisé avec celui de l'émetteur si la séquence recommence à partir du début de chaque paquet AMRT. Cela signifie que la longueur d'une séquence est généralement inférieure à 250 μ s et que l'on n'obtient pas une dispersion idéale.

Les effets de la dispersion de l'énergie pour un signal AMRT dépendent de la longueur de la séquence pseudo-aléatoire, de la longueur de la trame, du nombre de paquets, de la longueur de chaque paquet, des méthodes de dispersion d'énergie, etc. Si l'on suppose, pour simplifier, que la longueur de chaque paquet est égale ou inférieure à 250 μ s et que la structure de dispersion est la même pour chaque paquet pseudo-aléatoire, le facteur de dispersion de l'énergie (D) peut être obtenu approximativement à l'aide des équations:

$$D = 10 \log N + 10 \log B - K \quad \text{pour } N < M \quad (4)$$

$$D = 10 \log M + 10 \log B - K \quad \text{pour } N > M \quad (5)$$

dans lesquelles:

N : longueur de la séquence pseudo-aléatoire (symboles)

M : longueur de la séquence d'information (symboles)

B : nombre de paquets dans une trame

K : marge pour l'effet de dispersion de l'énergie.

Pour les équations ci-dessus, K est le terme de variation statistique indiquant le degré de décroissance des effets de la dispersion de l'énergie causés par:

- la coïncidence partielle entre une séquence d'information et une séquence pseudo-aléatoire;
- la différence entre la longueur de la séquence d'information et celle de la séquence pseudo-aléatoire;
- la cohérence de phase de la porteuse entre les paquets.

Parmi ces effets, on peut évaluer le premier comme suit: lorsque la séquence d'information a une faible corrélation de trame, la marge due à la coïncidence partielle dépend de la période d'observation du spectre de puissance. Au contraire, lorsque la séquence d'information a une forte corrélation de trame, la séquence a presque la même structure dans chaque trame, de telle sorte que l'on peut estimer sa marge en considérant la période de trame comme la période d'observation susmentionnée.

Le deuxième effet peut être rendu négligeable si l'on choisit comme il convient le degré et la valeur initiale de la séquence pseudo-aléatoire, si la longueur de celle-ci est inférieure à plusieurs séquences d'information.

Le troisième effet est également négligeable puisque la fréquence porteuse de chaque paquet diffère généralement de plusieurs centaines de Hz des fréquences porteuses des paquets adjacents.

Il est évident que la complexité du système est fortement réduite si la séquence pseudo-aléatoire n'est appliquée qu'à la partie du signal contenant l'information et non pas au préambule du paquet AMRT. En général, le préambule est constitué, du moins en partie, par une simple structure répétitive. Dans certains cas, il peut même contenir une période de porteuse non modulée. Les résultats présentés dans le Tableau 3 montrent qu'avec une structure répétitive 0011 pour le préambule, dans un système MDP-4, le préambule ne représente pas une part importante de la

densité spectrale maximale, sauf peut-être pour les systèmes à faible débit binaire. On peut imaginer d'autres structures de préambule ayant la même durée que celle admise dans le Tableau 3; avec ces structures, la dégradation ne dépasserait pas 3 dB.

Pour montrer quels facteurs de dispersion on pourrait obtenir dans la pratique, le Tableau 3 donne ces valeurs pour un système AMRT dans lequel le préambule n'est pas dispersé. On a fait les hypothèses suivantes:

- longueur de trame: 125 μ s,
- modulation: MDP-4,
- signal de préambule: 40 bits de structure 0011 en alternance,
- les fréquences porteuses émises par toutes les stations sont espacées de 4 kHz au maximum, mais le rythme des symboles dans les différentes stations n'est pas nécessairement en phase,
- les générateurs de séquences pseudo-aléatoires assurent la remise en phase de chaque paquet.

TABLEAU 3

Facteurs typiques de dispersion de l'énergie pour plusieurs valeurs de la longueur des séquences pseudo-aléatoires

	Système à un seul accès			Système à 10 accès équivalents						Facteur de dispersion obtenu (dB)		
	Facteur de dispersion (dB)			Puissance maximale dans une bande de 4 kHz (dB par rapport à la puissance totale permanente)								
				a) due aux préambules			b) due à l'information					
Débit binaire (Mbit/s)	10	50	250	10	50	250	10	50	250	10	50	250
Signal de modulation aléatoire	31	38	45							31	38	45
Séquence pseudo-aléatoire de 127 bits	12	12	12	-23	-37	-51	-20	-22	-22	20	22	22
Séquence pseudo-aléatoire de 511 bits	18	18	18	-23	-37	-51	-20	-28	-28	20	28	28
Séquence pseudo-aléatoire de 2 047 bits	24	24	24	-23	-37	-51	-	-29	-34	-	29	34
Séquence pseudo-aléatoire de 32 767 bits	25	32	36	-23	-37	-51	-	-	-36	-	-	36
Système MF typique à charge totale, occupant la même largeur de bande que le système numérique (sur la base d'un spectre gaussien et d'un rapport: largeur de bande radioélectrique/largeur de bande de base, égal à 15)	27	34	41									

La variation statistique du spectre de puissance est telle que 1% des raies spectrales dépassera l'enveloppe des valeurs efficaces de 6,5 dB.

Le calcul de la densité maximale de puissance spectrale déterminée par des préambules dans la bande de 4 kHz montre que dans certaines situations réunissant un préambule de trames ou de paquets relativement élevé et de grands réseaux de stations terriennes (pour systèmes utilisant des paquets de durée variable), la densité de puissance spectrale des signaux de synchronisation peut dépasser la densité de puissance spectrale correspondante de la partie du signal contenant l'information. Ce phénomène est plus accentué aux débits binaires faibles et aux durées de trame importants.

4.5 Exemple de dispersion de l'énergie appliquée dans un système AMRT expérimental

Les techniques de dispersion de l'énergie couvertes par la méthode 1 ont été appliquées dans le système TTT, système AMRT expérimental (50 Mbit/s) mis au point au Japon pour utilisation dans les radiocommunications par satellite. Dans ce système, seuls sont brouillés les bits d'information; on a constaté cependant que le niveau de crête du spectre de puissance est abaissé d'environ 20 dB.

Il convient de noter que, lorsqu'on applique dans un système AMRT une dispersion d'énergie à l'aide d'une séquence pseudo-aléatoire, la probabilité de détection erronée d'un «mot unique» donné est susceptible d'augmenter d'une quantité qui dépend du mode de synchronisation du paquet.

On peut éviter la détection erronée du mot unique en changeant l'état initial de la séquence pseudo-aléatoire pour chaque trame.

5 Conclusions

Il apparaît que les méthodes les plus prometteuses pour la dispersion de l'énergie sont les suivantes:

- pour les systèmes de téléphonie à modulation de fréquence: l'addition d'un signal ajusté en fonction de la charge, au-dessous de la bande de base, comme il est décrit dans la méthode 1b) de la Fig. 1. Le signal ajusté peut être du bruit ou bien une onde triangulaire «symétrique», mais dans la pratique, il est généralement plus facile d'utiliser cette dernière;
- pour les systèmes de télévision à modulation de fréquence: l'addition d'une onde triangulaire «symétrique» synchronisée sur la fréquence de l'image, comme il est décrit dans la méthode 1a) de la Fig. 1;
- pour les systèmes à modulation numérique: la conversion de code, dans laquelle le train de bits du message est multiplié par un train d'impulsions pseudo-aléatoire, selon des méthodes similaires à celles qui sont décrites dans le § 4.

Des ondes de dispersion de forme triangulaire sont couramment appliquées aux porteuses modulées en fréquence dans la plupart des réseaux du service fixe par satellite. L'avantage théorique des signaux de dispersion triangulaires ne se retrouve dans la pratique que dans la mesure où le signal utilisé est linéaire. L'utilisation de ces méthodes pourrait procurer une dispersion de l'énergie aussi grande que celle qui est obtenue dans les conditions de pleine charge. Mais le dépassement de la puissance de dispersion par bande de 4 kHz, par rapport à la puissance qui peut être obtenue dans les conditions de pleine charge (en supposant un spectre gaussien) n'est vraisemblablement pas, en pratique, inférieur à 3 dB dans le cas de la téléphonie et à 5 dB dans le cas de la télévision. Avec une dispersion d'énergie de ce niveau, son adjonction à la largeur de bande à hautes fréquences occupée n'a présenté aucune difficulté.

La dispersion d'énergie couramment obtenue au moyen d'ondes de dispersion de forme triangulaire se révèle satisfaisante en pratique, sauf lorsque le signal utile est celui d'un système à une seule voie par porteuse. Avec l'utilisation d'une onde de dispersion de forme triangulaire à basse fréquence (≤ 1 kHz) dans des systèmes multivoies, un signal utile d'un système à une seule voie par porteuse peut être brouillé pendant de courtes périodes par la quasi pleine puissance d'une porteuse brouilleuse. Cette difficulté peut être surmontée dans les systèmes de télévision à modulation de fréquence en utilisant pour la dispersion une transformation du signal vidéo ou un signal triangulaire dont la fréquence est égale à la fréquence de ligne de la télévision.