

## RECOMMANDATION UIT-R S.734\*

**Application des annuleurs de brouillage  
dans le service fixe par satellite**

(1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les brouillages mutuels entre réseaux à satellites desservant la même zone géographique ou des zones géographiques adjacentes sont un des principaux obstacles à une meilleure utilisation du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires par le service fixe par satellite (SFS);
- b) que la protection contre les brouillages entre satellites est assurée essentiellement par la discrimination des antennes des stations terriennes;
- c) que d'autres techniques, notamment la réutilisation des fréquences, la modulation améliorée, les émetteurs de satellite à grande puissance et les récepteurs à faible bruit, peuvent servir à augmenter la capacité de communication;
- d) que certaines de ces techniques augmentent la vulnérabilité des réseaux à satellites aux brouillages mutuels;
- e) que l'emploi de dispositifs annuleurs de brouillage permet d'atténuer les effets néfastes de certaines de ces techniques;
- f) que les annuleurs de brouillage utilisent le principe de base qui consiste à établir la réplique tant en amplitude qu'en phase du signal brouilleur, à inverser la phase de la réplique et à ajouter le signal obtenu à la somme du signal utile et du signal brouilleur,

*recommande*

**1** d'équiper les systèmes de communication par satellite d'annuleurs de brouillage, lorsque la valeur du rapport coût-efficacité correspondant le justifie, afin d'atténuer les brouillages ou leurs effets.

NOTE 1 – Plusieurs exemples de techniques d'annulation du brouillage sont examinés en Annexe 1.

---

\* 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

## Annuleurs de brouillage pour le service fixe par satellite

## 1 Exemples d'annuleurs de brouillage

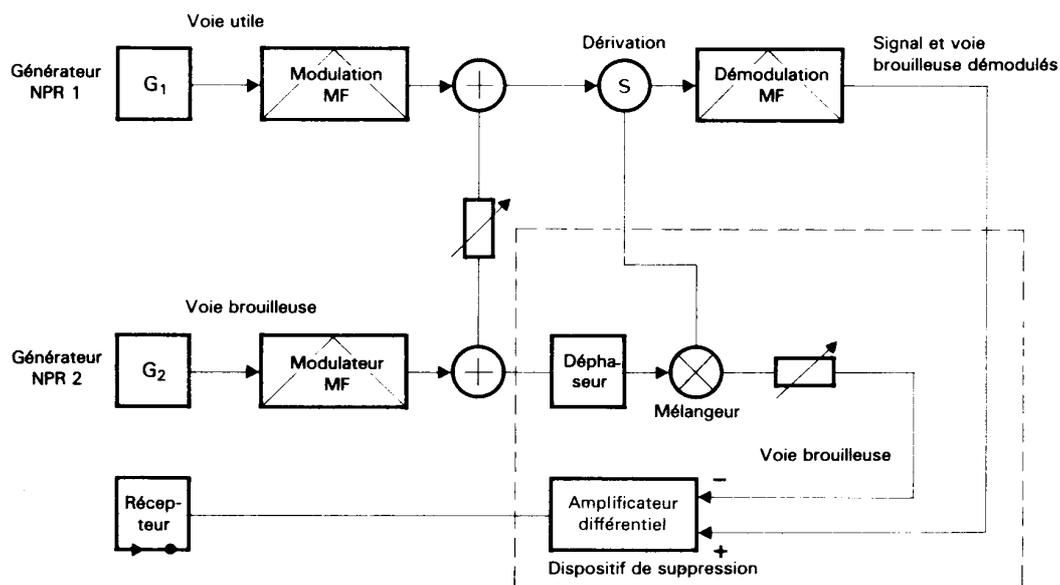
On trouvera ci-après quelques exemples de ces techniques dont il a été fait état dans les publications techniques. Les résultats obtenus par les divers chercheurs proviennent d'expériences exemptes de tout bruit thermique important.

## 1.1 Annuleurs de brouillage au niveau de la bande de base

Pour les porteuses à modulation angulaire, on a mis au point une méthode de suppression du brouillage au niveau de la bande de base en mélangeant les signaux radioélectriques utiles et brouilleurs dans le système expérimental représenté à la Fig. 1. Il convient ici de noter qu'avec cette méthode, il faut que le signal brouilleur soit reçu directement en tant que signal d'entrée de la voie brouilleuse. On peut y parvenir en pointant directement une antenne séparée sur la source de brouillage. Le signal brouilleur est mélangé à la porteuse utile au niveau des radiofréquences ou de la fréquence intermédiaire. On a pu démontrer que les composantes basses fréquences qui en résultent sont la réplique du brouillage au niveau de la bande de base. On a pu supprimer le brouillage en soustrayant cette réplique de la somme du signal de bande de base et du signal brouilleur démodulés. Des essais en laboratoire ont montré que cette méthode réduisait le brouillage d'environ 15 dB pour une large gamme de paramètres d'exploitation.

FIGURE 1

Schéma de principe du dispositif d'essais



Pour les cas où il n'y a pas de signal brouilleur séparé assurant un moyen de contrôle ou de référence, on a proposé une autre technique pour les signaux à modulation angulaire. Dans cette méthode, on utilise l'information contenue dans le signal d'enveloppe des porteuses utile et brouilleuse combinées pour reconstituer le brouillage dans la bande de base. Pour avoir une bonne suppression du brouillage, la source de brouillage doit être séparée de la porteuse utile par la somme des fréquences de modulation les plus élevées. Les études et les expériences ont montré que la somme de l'enveloppe détectée de la porteuse utile et de la porteuse brouilleuse est égale à la composante du brouillage démodulé déphasée de  $\pm 90^\circ$ . Une fois identifié, le brouillage peut être éliminé par soustraction. On a réussi à obtenir une réduction du brouillage de 15 dB pour une gamme de paramètres employés dans les essais (espacement entre fréquences, rapports porteuse/brouillage et indices de modulation). On a obtenu les meilleurs résultats avec de faibles indices de modulation et de grands espacements entre fréquences porteuses.

Pour les signaux modulés en fréquences (MF) où le signal brouilleur est faible et ne peut être reçu séparément, il est possible de détecter le brouillage au niveau de la bande de base à l'aide d'un détecteur à quartz. Un signal MF pur a une enveloppe constante et l'addition du brouillage se traduit par une modulation d'amplitude qu'il est possible de détecter et donc d'éliminer par soustraction. Cependant, dans les essais de laboratoire, cette technique n'a permis de supprimer que les composantes de brouillage qui n'avaient pas subi de mutation spectrale. Étant donné que l'on n'a la certitude de supprimer que la composante du premier ordre, le brouillage doit être faible par rapport au signal utile MF.

Les termes d'ordre plus élevé deviennent gênants si la puissance de brouillage est importante. Ils limitent le degré de suppression du brouillage que l'on peut obtenir avec une technique de suppression au niveau de la bande de base, la mise en phase requise pour supprimer le terme du premier ordre n'étant pas la même que celle qui est requise pour supprimer les termes d'ordre supérieur. Dans ces conditions, mieux vaut supprimer le brouillage au niveau des radiofréquences ou de la fréquence intermédiaire avant démodulation, tous les ordres du spectre de brouillage dans la bande de base se trouvant alors supprimés.

## 1.2 Annulation au niveau de la fréquence intermédiaire

Une autre technique qui a été l'objet de recherches pour les systèmes à modulation de fréquence consistait à soustraire le spectre de la fréquence intermédiaire ou des radiofréquences d'un signal brouilleur avant le démodulateur du récepteur comme indiqué dans le dispositif d'essai de la Fig. 2. On a postulé dans ce cas que le signal brouilleur pouvait être capté séparément. Il convient de souligner que la voie auxiliaire (brouillage uniquement) nécessitait un abaissement de fréquence et un filtrage «pratiquement identiques» à ceux de la voie principale (signal utile plus brouillage). De même, les longueurs électriques du signal brouilleur dans les deux voies devaient être pratiquement identiques pour que la modulation des deux signaux au point de suppression soit cohérente. La mise en phase du signal de suppression a été améliorée à l'aide d'un changeur de phase variable. Les résultats des essais ont montré que le spectre de brouillage au niveau de la fréquence intermédiaire était réduit d'environ 25 à 30 dB sur toute la largeur de bande du filtre FI. Les avantages de cette technique étaient:

- la simplicité,
- la suppression simultanée des termes du premier ordre et des termes d'ordre supérieur,
- la possibilité d'assurer la suppression avec n'importe quelle valeur de  $C/I$ ,
- un bruit impulsif plus faible qu'avec les méthodes de suppression au niveau de la bande de base.

### 1.3 Pont d'annulation du brouillage

Une autre technique passive, démontrée lors d'essais en laboratoire, fait intervenir un réseau à pont pour supprimer le signal brouilleur au niveau du récepteur à l'aide d'un signal auxiliaire obtenu à partir d'une voie brouilleuse. On trouvera à la Fig. 3 un schéma de principe de ce dispositif. Théoriquement, l'angle de phase du signal de sortie du circuit en point doit rester à  $180^\circ$  et son amplitude doit rester égale au brouillage sur toute la bande des fréquences utiles et ce, de façon permanente. L'objectif des essais était de déterminer la qualité de fonctionnement du système pour diverses erreurs d'angle de phase et d'amplitude produites par le pont.

Les essais ont été menés à l'aide d'une tonalité de signalisation à quelque 3 807 MHz et de signaux de brouillage à  $3\,809 \pm 4,5$  MHz et 3 950 MHz. Cette technique a permis d'affaiblir les signaux brouilleurs de 15 à 50 dB, le dernier chiffre correspondant à des signaux brouilleurs dans une bande relativement étroite et par beau temps.

FIGURE 2  
Dispositif d'essais de suppression au niveau de la fréquence intermédiaire

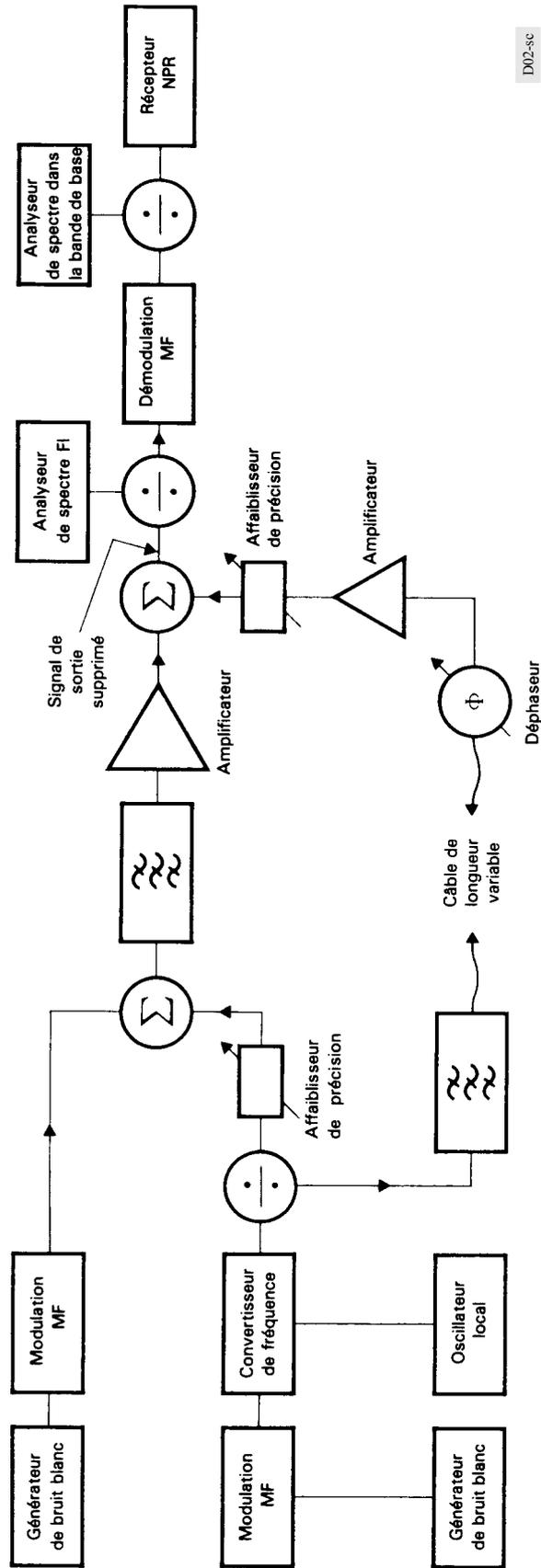
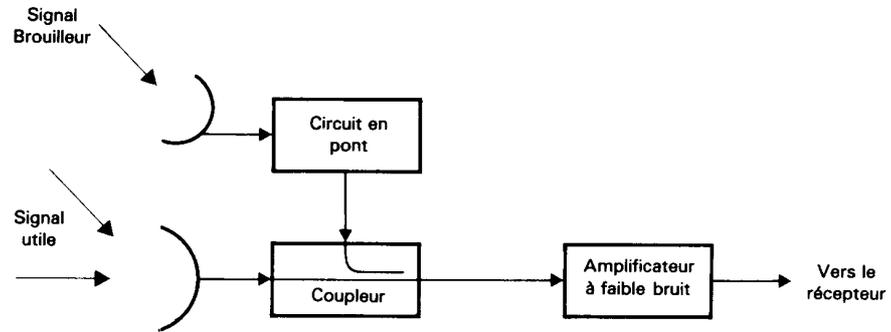
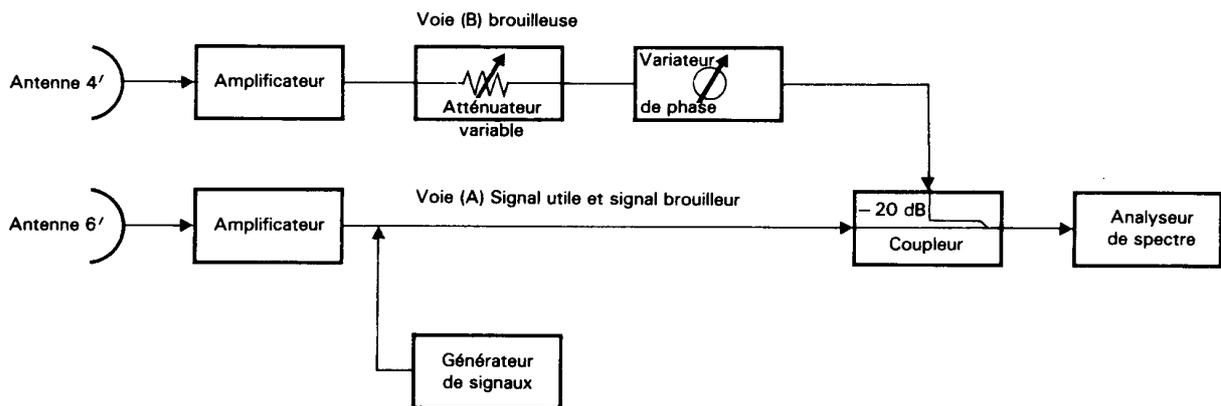


FIGURE 3

## Système de suppression du brouillage avec pont



a) Schéma du système



b) Dispositif d'essais

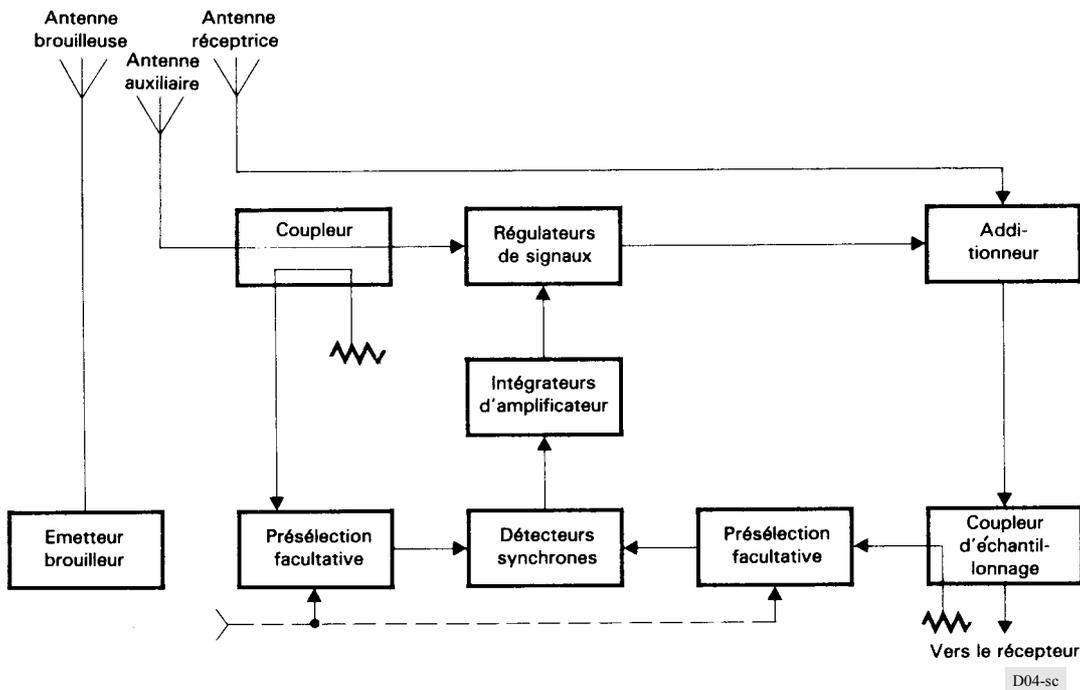
D03-sc

## 1.4 Systèmes d'annulation adaptables

Des systèmes d'annulation actifs ou asservis, capables d'assurer des réductions de brouillage de l'ordre de 50 à 60 dB ont été mis au point et exploités depuis plusieurs années pour des fréquences allant des ondes myriamétriques (3-30 kHz) aux ondes centimétriques (3-30 GHz). Les applications ont également porté sur les brouillages provenant d'un même point, où la source de brouillage est un émetteur voisin dont les caractéristiques sont connues, et sur le brouillage à distance, dont la source

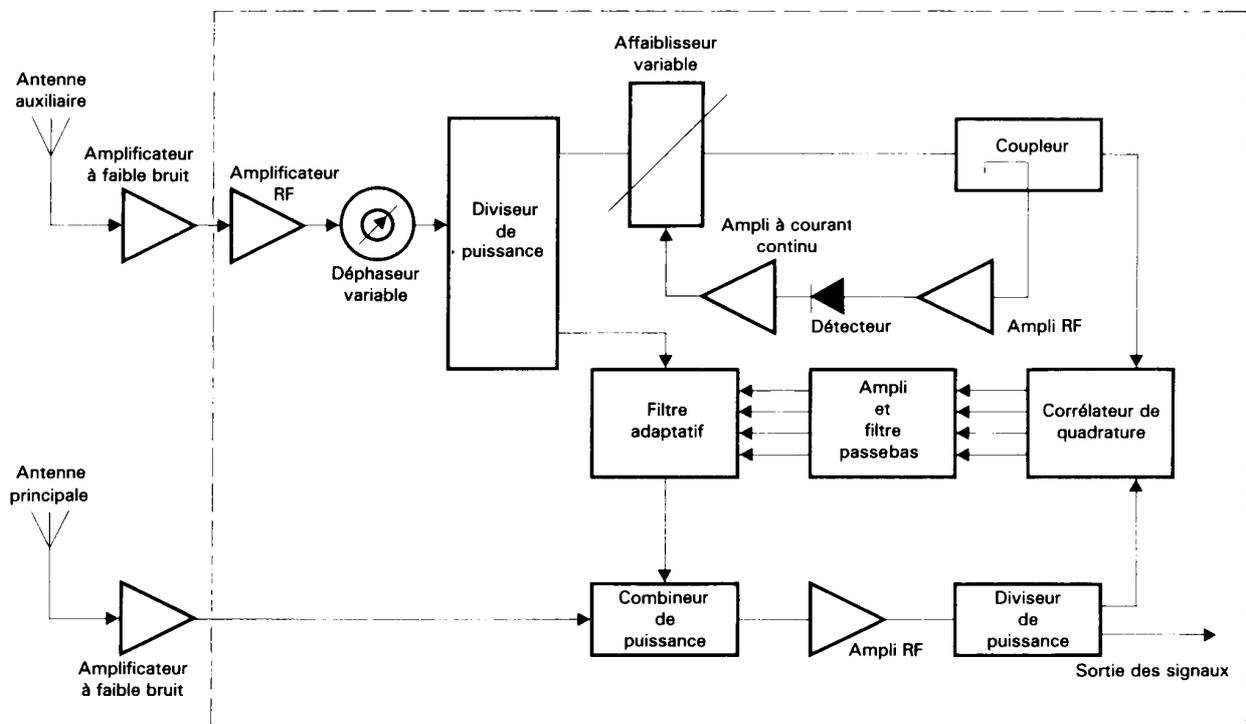
peut être soit fortuite, soit délibérée. Quand il s'agit d'un brouillage à distance, on utilise une antenne auxiliaire pointée vers la source de brouillage pour recueillir un échantillon de référence du brouillage. Dans quelques applications, il est possible d'obtenir ce signal à partir d'un lobe latéral de l'antenne principale. Aux fins de discrimination, on peut faire intervenir diverses propriétés des signaux utiles et des signaux brouilleurs (telles que la direction d'arrivée, l'amplitude, la polarisation, la modulation, etc.). La Fig. 4 donne le schéma de principe de fonctionnement d'un système d'annulation adaptable. L'émetteur brouilleur reproduit le signal brouilleur en amplitude mais avec une polarité inversée. Une boucle fermée d'asservissement assure en permanence un ajustement automatique de l'amplitude, du temps de propagation et de la phase pour compenser les variations de ces propriétés imputables aux effets de propagation. Un coupleur échantillonne le signal de sortie vers le récepteur et, si l'annulation est imparfaite, un signal d'erreur est envoyé au dispositif d'asservissement. Les boucles d'asservissement à gain élevé ajustent les paramètres de régulation du signal de façon à abaisser le brouillage résiduel vers zéro. Les détecteurs synchrones limitent la réponse de la boucle de commande aux signaux qui sont cohérents avec le signal de référence ou avec le signal brouilleur. L'importance de l'annulation obtenue dépend de la largeur de bande instantanée du signal de brouillage. Pour les signaux à bande étroite, on peut obtenir une annulation de 60 dB. Pour des largeurs de bandes de 5 ou 6 MHz, on a pu abaisser les brouillages éloignés de 50 à 60 dB. Pour les signaux à caractère de bruit ayant des largeurs de bandes instantanées de 500 MHz, une réduction d'environ 20 dB aurait été obtenue.

FIGURE 4  
Système adaptatif de suppression du brouillage



Un système adaptable d'annulation du brouillage, spécialement mis au point pour les communications par satellite, est représenté à la Fig. 5. On soustrait de l'ensemble signal utile plus signal brouilleur une réplique estimée du signal brouilleur dans le combineur de puissance situé après l'amplificateur à faible bruit du système récepteur. Le signal de sortie (signal d'erreur) représente le signal utile plus le résidu de l'opération de soustraction. Un filtre adaptable inséré dans la voie brouilleuse ajuste l'amplitude et la phase du signal brouilleur pour fournir cette réplique. L'adaptation s'accomplit à l'aide d'un algorithme faisant intervenir la loi des moindres carrés. Le corrélateur de quadrature traite le signal d'erreur et le signal de brouillage (antenne auxiliaire) pour assurer la corrélation voulue de l'amplitude et de la phase entre ces deux signaux. Les sorties du corrélateur servent de tensions de commande pour les affaiblissements du filtre adaptable.

FIGURE 5  
Schéma de principe du système de suppression du brouillage dans la même voie



D05-sc

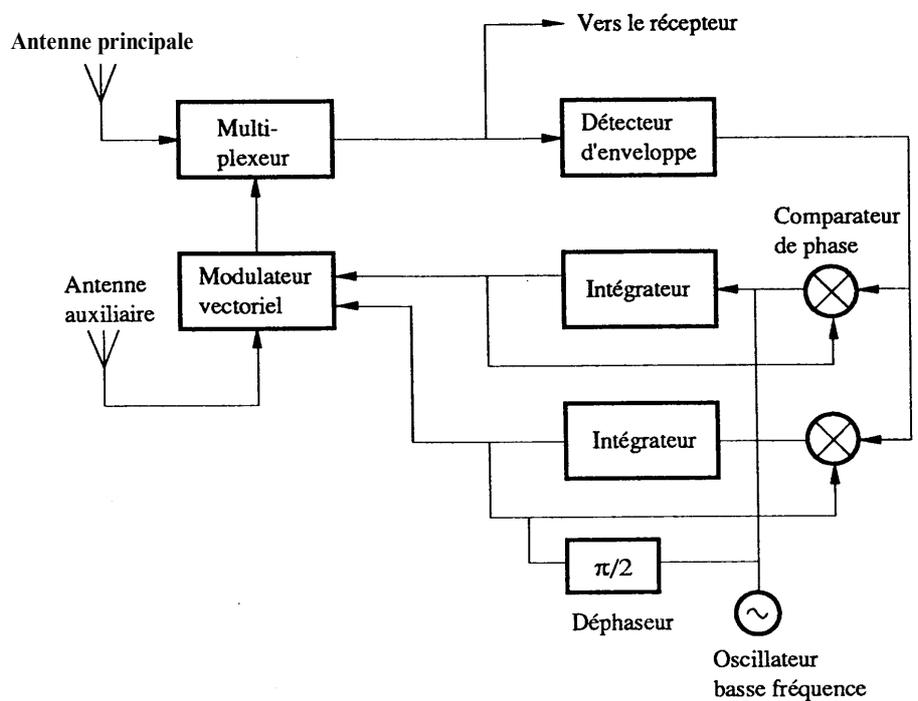
On parvient au régime permanent lorsque la corrélation a atteint un minimum. Les essais en laboratoire ont montré que l'on pouvait atteindre une annulation du brouillage de 20 à 30 dB selon le niveau du rapport  $C/I$ .

Une des premières applications des techniques d'annulation adaptatives est celle qui a été mise en œuvre par le Royaume-Uni lorsque des brouillages importants ont été causés à la station terrienne de Goonhilly par une station de faisceaux hertziens distante d'environ 300 km. Un suppresseur adaptatif réglable fonctionnant à la fréquence intermédiaire a été mis au point et mis en service au début de 1975; il a contribué à réduire les effets des brouillages à un niveau acceptable.

Le système d'annulation de brouillage par détection orthogonale convenant pour n'importe quel type de modulation, même si les signaux utiles et les signaux brouilleurs sont situés dans la même voie, est décrit à la Fig. 6. Dans le modulateur vectoriel qui ajuste l'amplitude et la phase du signal brouilleur provenant de l'antenne auxiliaire, le signal d'entrée est scindé en composantes orthogonales. L'amplitude de chaque composante est commandée indépendamment puis combinée.

FIGURE 6

## Système d'annulation de brouillage par détection orthogonale



D06-sc

Chaque signal de commande est composé du signal de sortie d'un intégrateur et d'un signal sinusoïdal basse fréquence orthogonaux l'un par rapport à l'autre. L'amplitude et la phase du signal de sortie du modulateur vectoriel varient de façon sinusoïdale et modifient l'enveloppe du signal résiduel. Etant donné que cette variation d'enveloppe contient l'information d'erreur utilisée aux fins de commande, les tensions d'erreur sont extraites du signal par détection d'enveloppe et détection de phase en utilisant les deux signaux orthogonaux basse fréquence.

Le système ne disposant que d'un seul convertisseur de fréquence, ses modifications de phase et de gain ont une influence négligeable sur la qualité d'annulation. Toutefois, les systèmes décrits aux Figs. 4 et 5 nécessitent deux convertisseurs. Il faut qu'ils aient des amplificateurs radiofréquence/fréquence intermédiaire qui présentent les mêmes caractéristiques.

Les résultats expérimentaux montrent que l'on a obtenu une annulation de plus de 40 dB pour une largeur de bande de 50 MHz pour des signaux en ondes entretenues, des signaux modulés en fréquence (MF) (téléphonie, télévision) et des signaux MDP. Au cours d'un essai sur le terrain effectué sur un trajet de 45 km, on a obtenu une qualité d'annulation et une réponse suffisantes même pendant les périodes d'évanouissement. On a procédé à un autre essai sur le terrain à l'aide d'une petite station terrienne ayant une antenne de 4,5 m de diamètre et située près d'un émetteur brouilleur. Au cours de cet essai, le signal de télécommunication par satellite et le signal brouilleur provenant de la liaison de Terre étaient des signaux modulés en fréquence (MF) et des signaux de télévision. On a obtenu des images et des sons vidéo clairs après annulation.

Pour annuler le brouillage causé par un satellite appartenant à un système à satellites proche, et pour autant que la direction de la source du brouillage soit connue avec une précision définie par le système de maintien en position du satellite, il est parfois plus rentable de doter l'antenne primaire de la station terrienne réceptrice d'une alimentation supplémentaire que de recourir à une antenne auxiliaire. Le décalage provoqué par cette nouvelle alimentation par rapport à l'alimentation principale dépendra de l'écart angulaire entre le satellite utile et le satellite brouilleur.

L'efficacité de l'annuleur peut être sensiblement renforcée au moyen de paramètres *a priori* applicables aux signaux utiles et brouilleurs (par exemple, des signaux pilotes spécialement insérés dans les parties libres du spectre ou dans des intervalles de temps libre, des signaux de dispersion d'énergie, etc.).

En URSS, ce système d'antenne à alimentation double avec une parabole de 4 m a été utilisé dans le système à satellites «Moskva Globalnaya» pour l'annulation du brouillage provenant du système à satellites «Moskva». L'alimentation supplémentaire (cornet pyramidal) a été connectée à l'alimentation principale au moyen d'un coupleur directif et d'un déphaseur/atténuateur de phase en hyperfréquences à commande électrique. L'écart angulaire entre le satellite utile et le satellite brouilleur était de 3°. Ce système d'annulation adaptable s'est servi de la distinction entre les signaux de dispersion utiles et brouilleurs et a permis une annulation supplémentaire de brouillage allant jusqu'à 20 dB.

### 1.5 Filtrage adaptable du brouillage à bande étroite

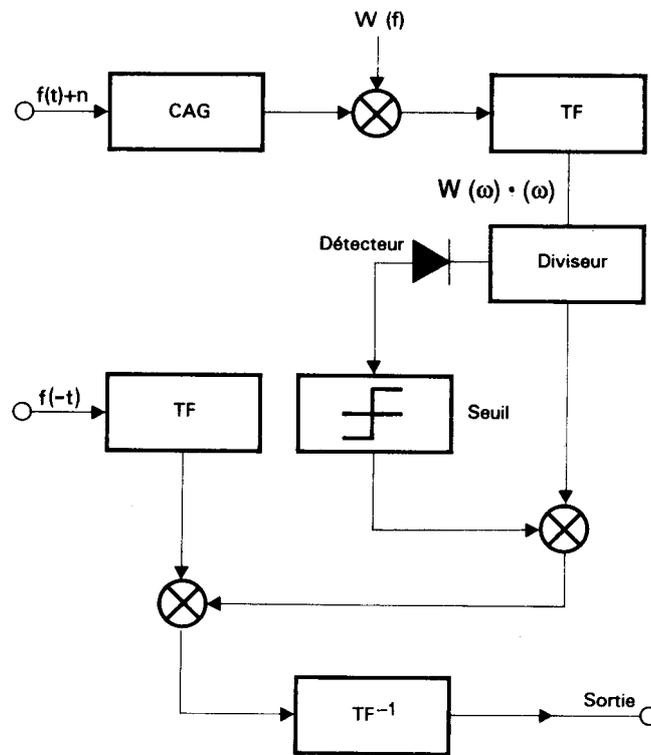
On a appliqué à un système de télécommunication numérique à large bande une technique visant à supprimer les brouillages à bande étroite quand la fréquence du brouilleur est inconnue (et peut même varier lentement). Le schéma de principe de la Fig. 7 représente la mise en œuvre de cette technique. Le système poursuit la fréquence centrale d'un brouilleur et centre un filtre à coupure brusque autour de cette fréquence. Il fonctionne en utilisant les propriétés de la transformation de Fourier en temps réel des filtres à ondes acoustiques de surface. Les conditions requises sont:

- que la largeur de bande du brouilleur soit inférieure à celle du signal utile, et
- dans le domaine de Fourier, que l'amplitude du brouilleur soit supérieure à celle du signal utile.

Une commande automatique de gain permet au système de traiter une vaste plage dynamique de signaux d'entrée. Des réductions sensibles du brouillage ont été obtenues lors des essais du système.

FIGURE 7

Schéma de principe d'un système adaptatif



CAG: commande automatique de gain  
 TF: transformée de Fourier

D07-sc

## 2 Conclusions

Les exemples d'annulation de brouillage décrits dans la présente Annexe ne constituent qu'un échantillon des ouvrages actuellement parus sur ce sujet. Cependant, les annuleurs de brouillage, en tant que moyens de réduire les brouillages entre systèmes à satellites en sont encore à leurs débuts. Jusqu'ici, la méthode suivie par l'UIT et recommandée par l'UIT-R a consisté à imposer des limites au diagramme de rayonnement des lobes latéraux de l'antenne et à la puissance surfacique rayonnée afin d'éviter que le brouillage entre systèmes ne soit excessif. On a employé des annuleurs de brouillage dans des situations relativement isolées, où une station terrienne existante ou nouvellement construite souffrait d'un brouillage inattendu provenant d'une source proche. La nécessité d'antennes et d'équipements de traitement des signaux supplémentaires est une charge que tout planificateur de réseau de télécommunication préfère éviter. De nouvelles études sont nécessaires pour réduire la complexité de l'équipement et réduire les coûts avant que les annuleurs

de brouillage aient une chance d'être largement appliqués dans les systèmes SFS. Les résultats des expériences menées en URSS montrent qu'il est possible d'annuler le brouillage provoqué par un satellite proche en installant une alimentation supplémentaire sur l'antenne primaire, à condition de connaître la direction de la source du brouillage. Cette méthode semble être parfois plus rentable que le recours à une antenne auxiliaire.

Par ailleurs, il semble que la réalisation d'annuleurs de brouillage pour application dans le cadre des systèmes, jointe aux techniques de polarisation croisée, suscite un grand intérêt. Etant donné que le signal brouilleur peut être caractérisé et défini intrinsèquement, il est à prévoir que les réalisations dans ce domaine se traduiront dans un proche avenir, par l'apparition sur le marché d'équipements utilisables. Les résultats obtenus avec ce type d'annuleur de brouillage favoriseront vraisemblablement le développement d'applications intersystèmes.

---