

RECOMMANDATION UIT-R SM.1132-1*

**PRINCIPES GÉNÉRAUX ET MÉTHODES DE PARTAGE DES FRÉQUENCES
ENTRE SERVICES DE RADIOCOMMUNICATION OU
ENTRE STATIONS RADIOÉLECTRIQUES**

(Questions UIT-R 45/1 et UIT-R 203/1)

(1995-2000)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'utilisation efficace et rationnelle du spectre des fréquences radioélectriques exige que différents services de radiocommunication ou stations radioélectriques utilisent en partage des fréquences ou des bandes de fréquences;
- b) qu'il faut disposer de principes généraux pour envisager le partage du spectre;
- c) que des méthodes doivent être définies pour faciliter le partage;
- d) que diverses Recommandations UIT-R décrivent les méthodes à appliquer dans certains cas de partage en fonction de la situation de partage considérée,

recommande

1 aux administrations, de prendre en considération les principes généraux et les méthodes exposés dans l'Annexe 1 pour faciliter le partage efficient et efficace des fréquences entre plusieurs services de radiocommunication ou entre stations radioélectriques.

ANNEXE 1

**Principes généraux et méthodes applicables
à l'utilisation en partage du spectre****1 Dimensions du partage des attributions**

Le partage du spectre permet d'accroître l'efficacité d'utilisation du spectre. Le partage du spectre entre services intervient lorsque deux ou plusieurs services de radiocommunication utilisent effectivement la même bande de fréquences. Les numéros S1.166 à S1.176 du RR définissent les paramètres qui doivent être pris en compte dans le partage du spectre. Le partage interservices et intraservice est facilité par l'application de principes et de méthodes de partage d'application générale, mais qui servent également à assigner des fréquences à chaque station. L'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques met en jeu quatre dimensions, à savoir: l'espacement des fréquences, la séparation spatiale, la séparation temporelle et le découplage des signaux. Tout partage du spectre doit tenir compte de l'une ou de plusieurs de ces quatre dimensions. Le partage est relativement simple lorsque deux de ces dimensions sont communes aux services et que la troisième et/ou la quatrième dimension fait apparaître une différence suffisante pour garantir le fonctionnement satisfaisant de tous les services ou stations concernés (deux ou plus). Le partage peut aussi s'effectuer lorsque des services ou des stations ont en commun les quatre dimensions. Dans ces cas, les règles de partage applicables aux services ne peuvent pas garantir l'absence de brouillage et il faut procéder aux différentes assignations sur la base de toutes les assignations déjà faites dans tous les services avec chevauchement de bandes de fréquences, afin de déterminer pour les différentes assignations un ensemble de facteurs permettant de garantir l'absence de brouillage entre ces dernières.

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention des Commissions d'études 1 et 2 du Secteur du développement des télécommunications.

2 Méthodes de partage

Le Tableau 1 présente certaines des méthodes pouvant être utilisées pour faciliter le partage. Ces méthodes sont énumérées dans des colonnes correspondant à chacune des quatre dimensions précitées: espacement des fréquences, séparation spatiale, séparation temporelle et découplage des signaux.

TABLEAU 1

Méthodes permettant de faciliter le partage

Espacement des fréquences	Séparation spatiale	Séparation temporelle	Découplage des signaux
Plans de disposition des voies Segmentation des bandes de fréquences Systèmes à agilité de fréquences Partage dynamique – assignation dynamique des fréquences en temps réel ⁽¹⁾ AMRF Gestion des caractéristiques du spectre des émissions Segmentation variable dynamique Limitation des tolérances des fréquences	Bandes attribuées en partage sur la base de la séparation géographique Séparation entre emplacements Caractéristiques du système d'antenne: – antennes adaptatives et discrimination de polarisation – discrimination du diagramme de rayonnement d'antenne Accès multiple par répartition spatiale (AMRS) Obstacles physiques et effet d'écran	Contrôle du facteur d'utilisation Assignation dynamique des fréquences en temps réel ⁽¹⁾ AMRT	Codage et traitement des signaux ⁽²⁾ CED Suppression des brouillages AMRC Etalement du spectre – séquence directe – sauts de fréquence – MF pulsée Réglage de la puissance du brouillage/ajustement de la largeur de bande – Partage cocanal – Commande dynamique du niveau de puissance d'émission – réduction de la puissance surfacique et réduction de la densité spectrale de puissance (dispersion d'énergie) Complexité de la modulation Polarisation de l'antenne

⁽¹⁾ L'assignation dynamique des fréquences en temps réel facilite le partage parce qu'elle utilise à la fois le domaine temporel et le domaine fréquentiel. C'est pourquoi cette méthode est indiquée dans les deux colonnes.

⁽²⁾ On peut également appliquer des techniques de codage pour l'espacement des fréquences, la séparation spatiale et la séparation temporelle.

Certaines des méthodes présentées au Tableau 1 sont nouvelles ou inédites et peuvent favoriser une utilisation plus efficace du spectre ou offrir une plus grande souplesse. Bon nombre de ces méthodes ont été élaborées à la suite de la mise en œuvre de techniques nouvelles, de l'informatisation de l'analyse des données et de l'évolution des connaissances. Certaines font appel à des techniques complexes de gestion des fréquences informatisée en temps réel.

Pour appliquer ces méthodes, indiquées dans le Tableau 1, on est souvent amené à définir les paramètres techniques applicables aux équipements.

2.1 Espacement des fréquences

2.1.1 Plans de disposition des voies

On peut disposer les voies de fonctionnement de façon homogène ou non homogène afin d'obtenir une configuration en canaux interstitiels d'un ou de plusieurs systèmes de communication. Ce moyen d'éviter les brouillages doit être coordonné suffisamment à l'avance pour assurer l'espacement voulu entre les canaux et tirer parti du type de modulation utilisé, des formes d'enveloppe dans le domaine fréquence, de la largeur de bande nécessaire émise et des caractéristiques du récepteur en bande passante. Cette technique convient particulièrement aux satellites adjacents qui n'utilisent pas de répéteurs homogènes sur l'OSG.

L'élaboration d'un plan de disposition des voies entraîne fréquemment des coûts liés à la coordination requise entre les utilisateurs des mêmes bandes de fréquences attribuées à titre primaire avec égalité des droits. Ces coûts sont partagés entre les opérateurs de systèmes et on obtient presque toujours de bons résultats.

2.1.2 Segmentation des bandes de fréquences (voir la Note 1)

Le regroupement de plusieurs canaux, ou la création d'une sous-bande pour les systèmes qui ne relèvent pas d'un plan de disposition des voies, pour différents utilisateurs ou différentes utilisations du spectre, est analogue à l'utilisation de plans de disposition des voies. Dans certains cas, on aura intérêt à recourir à cette méthode, car elle présente l'avantage d'éviter le plus possible la coordination tout en permettant des utilisations multiples d'une bande. La segmentation encouragera l'utilisation efficace du spectre si aucune bande additionnelle n'est disponible. Elle favorise par ailleurs le développement plein et entier des services concernés et permet d'éviter qu'un service ou un système donné ne se développe prématurément ou de manière imprévue, au détriment d'un autre service ou système.

NOTE 1 – On peut dire que la segmentation des bandes entre des services de radiocommunication permet effectivement d'éviter le partage du fait de la création de sous-attributions. Etant donné que les administrations segmentent des bandes qui leur sont attribuées en partage au niveau international pour utilisation au niveau national, on peut envisager de recourir à la segmentation comme méthode de partage.

2.1.3 Systèmes à agilité de fréquences

Le principe des systèmes à agilité de fréquences consiste à choisir en temps réel des fréquences de fonctionnement dans une partie d'une bande donnée, à l'aide des techniques dites d'écoute avant la transmission. Ces systèmes, qui ne sont pas assujettis à une procédure de coordination mutuelle ou à la décision d'un opérateur d'un autre système, recherchent des fréquences non utilisées dans le spectre pour une communication. Etant donné qu'ils présentent des risques accrus de brouillage, les systèmes à agilité de fréquences ne se prêtent pas aux télécommunications publiques ou au transfert de données essentielles.

Grâce au progrès technique, il existe aujourd'hui certains systèmes radioélectriques à agilité de fréquences de bonne qualité et relativement bon marché. Si un système tolère les délais nécessaires au changement fréquent de fréquences et à la synchronisation des terminaux, l'agilité de fréquences peut se révéler avantageuse.

2.1.4 Partage dynamique

Les techniques informatiques modernes offrent davantage de possibilités de partage aux gestionnaires du spectre et permettent ainsi de pallier l'inefficacité imputable aux contraintes rigides imposées aux services. Le partage dynamique de fréquences entre différents systèmes relevant des mêmes services permet à plusieurs systèmes d'utiliser les mêmes fréquences, mais à des moments différents, dans une même région géographique. Jusqu'à présent, le partage des mêmes fréquences par des systèmes fonctionnant à des puissances élevées dans une même région géographique obligeait chaque service à utiliser des intervalles de temps discrets. Les techniques de partage dynamique permettent d'effectuer ce partage en fonction des besoins et exige l'utilisation de techniques et de méthodes perfectionnées.

Le partage des canaux est un exemple de partage dynamique. Dans un système à canaux partagés, des canaux qui auraient peut être été assignés à tel ou tel utilisateur sont regroupés dans un même système et des fréquences sont automatiquement assignées aux différents utilisateurs en fonction de leurs besoins. Les systèmes à canaux partagés permettent à des utilisateurs différents de partager le spectre et concourent généralement à une plus grande efficacité d'utilisation que les méthodes d'assignation classiques.

Autre exemple de partage dynamique: le partage de la bande des 900 MHz entre les fournisseurs de radiocommunications cellulaires et d'autres utilisateurs. L'accès à cette bande a permis de libérer un grand nombre de canaux pour les utilisations cellulaires. Avec ce mode de partage, les utilisateurs ayant la priorité bénéficient d'un accès avec capacité de préemption aux fréquences en question et quand ils en ont besoin des logiciels sont utilisés pour récupérer automatiquement les fréquences réservées aux communications prioritaires, qui ne sont alors pas accessibles aux utilisateurs de radiocommunications cellulaires. Ceux-ci subissent donc une légère dégradation mais non une perte complète de ce service.

Le partage dynamique est un moyen d'améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques, dans les cas où il est possible de regrouper des services, et donc d'élargir la définition des services de radiocommunication. Ce mode de partage a en quelque sorte pour conséquence de diminuer les distinctions entre sous-classes d'utilisateurs. Ainsi, dans la bande des 2 GHz, les SMS ont été subdivisés en trois catégories – services aéronautique, maritime et mobile terrestre par satellite – et ont été regroupés dans un SMS générique lors de la CMR-97. Ces services différents, présentant néanmoins des caractéristiques communes, il a été possible de procéder à un partage en les classant dans la catégorie générale des SMS.

2.1.4.1 Assignation dynamique des fréquences en temps réel

Le système de partage proposé actuellement pour les SMS est relativement complexe. Il consiste à faire des attributions dynamiques, en attribuant à chaque service mobile par satellite une quantité de spectre en fonction de ses besoins, et passe par la création d'un mécanisme d'accès prioritaire avec préemption, si nécessaire. Ce système est censé répondre aux besoins des utilisateurs ayant des exigences diverses et en évolution constante s'agissant de la largeur de bande, de la puissance des signaux, des priorités et des interfaces de réseau. Le passage de la technologie de transmission analogique à la transmission numérique favorisera peut-être un recours accru au partage dynamique.

2.1.5 AMRF

La technique AMRF consiste à assigner à chaque utilisateur une fraction de la largeur de bande et à en limiter l'accès à la sous-bande attribuée. L'orthogonalité est assurée dans le domaine fréquence.

2.1.6 Contrôle des caractéristiques spectrales des émissions

Le contrôle des caractéristiques spectrales des émissions permet de libérer davantage de fréquences pour les radiocommunications en limitant la quantité de spectre perdue en raison des rayonnements non désirés (rayonnements non essentiels et émissions hors bande). Le partage est facilité par l'efficacité d'utilisation accrue du spectre. Le contrôle des rayonnements non désirés est généralement coûteux, car il exige l'emploi de méthodes telles que le filtrage, au moment de la conception du système, pour surveiller ces caractéristiques. L'installation ou l'intégration de filtres RF au niveau de la ligne de transmission de l'émetteur ou du récepteur offre un moyen d'améliorer l'efficacité spectrale en limitant le plus possible l'énergie transmise ou la tension reçue qui ne sont pas nécessaires pour obtenir les renseignements voulus. On citera à titre d'exemple les filtres à bande latérale résiduelle sur les lignes de transmission télévisuelle.

2.1.7 Segmentation variable dynamique

La méthode de la segmentation variable dynamique, qui consiste à partager en temps réel une portion de spectre entre deux services, l'un ayant la priorité sur l'autre, permet elle aussi d'accroître la souplesse d'utilisation du spectre. Cette méthode consiste à faire une segmentation qui divise les canaux situés dans une partie du spectre en deux parties: l'une à l'usage du service A et l'autre à l'usage du service B. La segmentation se déplace en temps réel, en réponse à la demande effective ou à la demande perçue telle qu'elle émane du service A. Un centre d'exploitation du réseau est nécessaire pour fournir immédiatement les canaux nécessaires au service A. Le procédé consiste à créer un tampon de canaux permettant de satisfaire immédiatement les demandes. Cette méthode de partage a été simulée par application des techniques de Monte Carlo, mais elle n'a pas encore été validée.

2.1.8 Limitation des tolérances de fréquence

On entend par tolérance de fréquence l'écart maximal admissible entre la fréquence située au centre de la bande occupée par une émission et la fréquence assignée, ou entre la fréquence caractéristique d'une émission et la fréquence de référence. La limitation des tolérances de fréquence consiste à contrôler le dérapage en fréquence du signal de transmission et permet de réaliser des économies de spectre, puisqu'un plus grand nombre de systèmes peuvent fonctionner dans une portion de spectre donnée.

2.2 Séparation spatiale

2.2.1 Bandes attribuées en partage sur la base de la séparation géographique

Les utilisateurs de régions géographiques différentes peuvent réutiliser la même fréquence à condition d'être séparés par des distances suffisamment grandes. Le partage de fréquences géographique ou régional est une technique éprouvée qui a longtemps été considérée comme d'application commode. Ce mode de partage est utilisé depuis longtemps à l'échelle mondiale dans la bande d'ondes décimétriques par exemple. Il est intéressant dans n'importe quelle bande selon les exigences concernant les liaisons de service et la couverture géographique. On peut en faciliter l'utilisation en tenant compte des caractéristiques de la propagation. Le partage géographique peut également tirer parti de l'utilisation des caractéristiques spécifiques du système d'antenne. Dans les bandes des services spatiaux, où les antennes pointent en direction de l'OSG, et en fonction de la latitude, qui détermine à son tour l'angle d'élévation et la direction de visée dans trois dimensions, on peut partager le spectre autour d'un terminal de Terre. On peut également faciliter le partage géographique en faisant appel à la diversité d'antenne, par commutation automatique ou manuelle entre les sites.

Un autre mode de partage possible consiste à attribuer une portion de spectre à deux ou plusieurs services et à assurer le partage dans les administrations en séparant géographiquement les utilisateurs des différents services ayant des attributions. Pour ce faire, on procède à une séparation spatiale des zones d'attribution du spectre. Le partage entre le service de radiodiffusion télévisuelle et les services mobiles de Terre, par exemple, a été facilité par la séparation géographique. Le Tableau d'attribution des bandes de fréquences contient un certain nombre de renvois à des pays qui permettent à une administration donnée d'exploiter un service différent et d'utiliser un service faisant l'objet d'une

attribution dans des conditions autres que celles qui s'appliquent à une attribution mondiale ou régionale. Ces renvois définissent un mode de partage de facto entre les utilisateurs du Tableau d'attribution des bandes de fréquences et les administrations qui exploitent un service défini par un renvoi. Cette forme de partage, qui est la mieux adaptée pour les services de Terre à la surface de la Terre, est plus difficile lorsque l'un des services ou les deux assurent des communications à bord d'aéronefs, spatiales ou par satellite.

2.2.2 Séparation entre emplacements

Il convient de choisir l'emplacement de façon que la station se trouve suffisamment loin des autres stations exploitées sur la même fréquence.

2.2.3 Caractéristiques du système d'antenne

On peut tirer parti de certaines caractéristiques des systèmes d'antenne pour faciliter le partage ou réduire au maximum les brouillages. Pour ce faire, on peut évidemment utiliser des antennes directives, dans la mesure où les techniques le permettent.

2.2.3.1 Antennes adaptatives et discrimination de polarisation

Les panneaux d'antennes actifs (antennes adaptatives) permettent de placer rapidement et en temps réel des zéros dans le diagramme de rayonnement et d'orienter l'antenne dans la direction d'un signal brouilleur détecté. On peut aussi utiliser les modèles d'antennes actuels à lobes latéraux améliorés pour faciliter encore le partage.

Les panneaux d'antennes actifs et les dispositifs de réduction des lobes latéraux offrent une solution intéressante, selon la fréquence de fonctionnement, mais peuvent être très complexes et exigent beaucoup de matériel. La réduction des lobes latéraux actifs ne permet pas de réduire le brouillage résultant du couplage entre faisceaux principaux. On peut également procéder à un contrôle des lobes latéraux améliorés sur les antennes fixes, mais l'applicabilité de cette technique est inversement proportionnelle au niveau de réduction supplémentaire des lobes latéraux. Des facteurs tels que la diffusion due aux mâts d'antennes et aux autres objets ou structures voisins limitent parfois le niveau de réduction des lobes latéraux facilement réalisable. Les tolérances mécaniques et de construction applicables aux éléments des antennes ont une incidence directe sur la réduction des lobes latéraux qu'il est possible d'obtenir sur les antennes réseau fixes à commande de phase.

Le coût des dispositifs de réduction des lobes latéraux et des panneaux d'antennes actifs est proportionnel à la complexité et au matériel supplémentaire requis. La réduction des lobes latéraux à l'aide de matériaux absorbants et/ou par effet d'écran se traduira par un renchérissement des coûts d'installation et des équipements, mais, du point de vue technique, la réduction des lobes arrières devrait être plus avantageuse que la réduction des lobes dans d'autres directions.

2.2.3.2 Discrimination du diagramme de rayonnement d'antenne

L'antenne associée à chaque émetteur radioélectrique utilise la puissance de sortie du système et la transforme en puissance rayonnée, puissance dont le diagramme dépend du modèle d'antenne. Les signaux émis par les antennes omnidirectives ou quasi omnidirectives se répartissent de manière égale le long de tous les azimuts, avec un gain faible ou nul. En conséquence, ces signaux peuvent interdire l'utilisation du spectre à d'autres signaux dans toutes les directions, mais sur une distance limitée uniquement par la puissance d'émission. Les antennes très directives orientent et amplifient la puissance rayonnée dans une direction donnée. Ces signaux interdisent l'utilisation du spectre le long d'une ligne donnée, mais peuvent le faire sur de plus grandes distances en raison du gain de l'antenne. Toutefois, il existe certaines antennes directives pivotantes qui présentent à la fois un gain élevé et un diagramme omnidirectif. Ces diagrammes déterminent la manière dont on peut disposer les systèmes géographiquement. Les diagrammes d'antenne de réception ont également une incidence sur le partage, dans la mesure où ils augmentent ou limitent la possibilité pour le récepteur de capter le signal utile parmi d'autres signaux dans les mêmes zones géographiques. Les antennes très directives ne captent pas les signaux qui sont éloignés de la direction de réception voulue.

On peut mesurer les diagrammes d'antenne et déterminer le gain le long de chaque azimut. Pour la planification du spectre, on mesure généralement les diagrammes en prenant une valeur de gain distincte pour le faisceau principal, le lobe arrière et les lobes latéraux.

2.2.4 AMRS

On a mis au point des techniques permettant de procéder à une discrimination de la transmission fondée sur l'orientation spatiale, en faisant varier les diagrammes d'antenne. Cette technique est particulièrement importante pour les nouvelles applications des satellites, la boucle locale hertzienne et les radiocommunications mobiles cellulaires.

2.2.5 Obstacles physiques et effet d'écran du terrain

L'effet d'écran peut limiter l'angle de rayonnement d'un émetteur et, par conséquent, le brouillage causé à d'autres systèmes ainsi que celui causé à un récepteur. Cette limitation permet d'assurer un meilleur partage, puisqu'on regroupe géographiquement des systèmes qui risquaient de se brouiller mutuellement. L'effet d'écran du terrain peut-être naturel (végétation, terrain ou bâtiments) ou être obtenu par la construction de murets ou d'écrans métalliques.

2.3 Séparation temporelle

Les utilisateurs peuvent partager le spectre dans le temps; tel est le cas des chauffeurs de taxi, qui utilisent alternativement les mêmes fréquences, ou des cibistes, qui utilisent en partage des fréquences.

2.3.1 Contrôle du facteur d'utilisation

Le facteur d'utilisation est le produit de la durée d'une impulsion et de la fréquence de répétition de cette impulsion. Il s'agit aussi du rapport entre la puissance de sortie moyenne et la puissance de sortie de crête.

2.3.2 Assignation dynamique des fréquences en temps réel

La méthode de la segmentation variable dynamique, qui consiste à partager en temps réel une portion de spectre entre deux services, l'un ayant la priorité sur l'autre, permet elle aussi d'accroître la souplesse d'utilisation du spectre. Cette méthode consiste à faire une segmentation qui divise les canaux situés dans une partie du spectre en deux parties: l'une à l'usage du service A et l'autre à l'usage du service B. La segmentation se déplace en temps réel, en réponse à la demande effective ou à la demande perçue telle qu'elle émane du service A. Un centre d'exploitation du réseau est nécessaire pour fournir immédiatement les canaux nécessaires au service A. Le procédé consiste à créer un tampon de canaux permettant de satisfaire immédiatement les demandes. Cette méthode de partage a été simulée par application des techniques de Monte Carlo, mais elle n'a pas encore été validée.

2.3.3 AMRT

L'AMRT est une technique qui consiste à assigner à chaque utilisateur des intervalles de temps de voies fixes prédéterminés. L'utilisateur a ainsi accès à toute la largeur de bande, mais uniquement pendant l'intervalle de temps qui lui a été assigné. Avec cette technique, les signaux de signalisation sont orthogonaux dans le temps. L'AMRT est plus complexe à mettre en œuvre que l'AMRF, mais présente l'avantage d'assurer une bonne connectivité, puisque tous les récepteurs utilisent la même voie tandis que les émetteurs émettent sur la même voie commune à des moments différents. L'AMRT facilite donc de nombreuses réalisations de réseau, tant pour les communications au sol que pour les communications par satellite. Avec la modulation numérique, le partage temporel coordonné, par exemple avec des signaux multiplexés par répartition dans le temps correctement synchronisés, permettrait à deux ou plusieurs systèmes d'utiliser simultanément la même bande de fréquences. Avec la MF analogique, certains types de brouillage sporadiques peuvent être plus acceptables que d'autres en raison de l'effet bien connu de capture MF, qui offre des améliorations et assure une discrimination vis-à-vis des signaux brouilleurs à faible facteur d'utilisation. L'assignation dynamique des fréquences en temps réel peut être gérée par une station de commande dans les cas où l'on utilise une même bande de fréquences à diverses fins et où on déplace les sous-bandes en largeur pour répondre aux besoins. En général, on procède à ces changements par blocs de spectre pendant des intervalles de temps importants.

La MF analogique permet d'obtenir une amélioration pouvant atteindre 10 dB environ en ce qui concerne l'élimination des brouillages, lorsqu'il y a un espacement des fréquences entre les porteuses utiles et les porteuses brouilleuses. On obtient encore de meilleurs résultats lorsqu'il existe un espacement important entre les porteuses dans toute la largeur de bande du signal. Le partage temporel numérique entre émetteurs d'un même système (AMRT) doit permettre de remédier au problème de la synchronisation des émissions provenant d'emplacements différents.

Les améliorations de la MF analogique sont sans conséquences sur le plan des coûts pour les systèmes utilisant ce type de modulation. Le coût du partage temporel numérique est proportionnel aux problèmes que pose la synchronisation.

2.4 Découplage des signaux

La transmission de signaux de communication à l'aide de techniques numériques devrait également concourir à une plus grande efficacité d'utilisation du spectre. Etant donné que de nombreux signaux (audio et vidéo par exemple) sont au départ des signaux analogiques, ils doivent être convertis en signaux numériques avant d'être transmis pour tirer parti de cette technologie. Paradoxalement, la largeur de bande d'un signal numérique est plus grande que celle d'un signal analogique. Les avantages des techniques numériques sur le plan de l'efficacité spectrale résultent de différents facteurs, notamment des techniques de compression. Les systèmes de communication numérique emploient souvent des algorithmes de détection et de CED pour améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes en présence de sources de brouillage, ce qui accroît les possibilités de partage.

2.4.1 Codage et traitement des signaux

Il existe plusieurs techniques dites de codage (ou modulation codée) et de traitement des signaux. Le codage peut être effectué pendant la modulation (codage des canaux, par exemple avec l'AMRC), ou au niveau du signal d'origine avant la transmission (codage à la source, comme dans le cas de la compression de chaînes de données).

2.4.2 CED

La méthode de CED sur les liaisons numériques permet de réduire le rapport $C/(N + I)$ requis et d'utiliser des marges de puissance plus faibles, aux dépens du débit ou de la largeur de bande. Avec cette méthode, on a recours à des techniques de codage à la source pour détecter les erreurs et faire en sorte que l'émetteur retransmette les blocs de données erronées.

2.4.3 Elimination des brouillages

Une technique avancée de réduction des brouillages est l'élimination des brouillages non linéaires, technique fondée sur l'emploi d'algorithmes de traitement des signaux puissants, qui utilisent les caractéristiques de corrélation spectrale du signal utile et du signal brouilleur.

2.4.4 AMRC

Les techniques de modulation par étalement du spectre ou AMRC sont particulièrement intéressantes pour le partage uniforme à l'intérieur d'un même système ou entre plusieurs systèmes.

La technique AMRC permet un chevauchement des signaux transmis à la fois en fréquence et dans le temps. Pour ce faire, on utilise différents codes de signalisation conjointement avec des filtres adaptés (ou encore un dispositif de détection de corrélation) au niveau des récepteurs pour procéder au découplage des signaux. On attribue à chaque utilisateur une séquence de code déterminée qui est modulée sur la porteuse, les données numériques étant elles-mêmes modulées. Les deux méthodes AMRC les plus répandues sont le saut de fréquence et le codage de phase. Avec le système à saut de fréquence, on change périodiquement de fréquence selon un cycle spécifié et avec le codage de phase, la porteuse est modulée en phase par la séquence de données numériques et la séquence de code. On obtient plusieurs codes orthogonaux au prix d'une largeur de bande requise plus importante (pour pouvoir étaler les signaux). Par ailleurs, l'AMRC manque de souplesse pour l'interconnexion de tous les utilisateurs (sauf si des filtres adaptés correspondant à tous les codes sont fournis au niveau de tous les récepteurs). L'AMRC présente néanmoins l'avantage de permettre à plusieurs systèmes de coexister dans la même bande, pour autant que des codes différents soient utilisés pour des systèmes différents.

2.4.5 Etalement du spectre

Les émetteurs qui utilisent des techniques d'étalement du spectre étalent le signal sur une largeur de bande nettement supérieure à la largeur de bande du signal d'origine, au moyen d'un code avec répétition prédéterminé. Le récepteur utilise le même code pour supprimer l'étalement du signal afin de le ramener sous sa forme initiale.

L'avantage de la technique d'étalement du spectre est qu'elle permet d'éliminer les brouillages. Comme exemples d'applications commerciales des systèmes à étalement du spectre, on peut citer les communications personnelles, les téléphones cellulaires, les systèmes d'alarme hertziens, les réseaux locaux d'entreprise et les systèmes de radiomessagerie.

Si la superposition de systèmes à étalement du spectre dans des bandes de fréquences permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre (comme cela est le cas des dispositifs à faible puissance sans licence), le risque de brouillage augmente proportionnellement au nombre de ces systèmes. La multiplication des systèmes à séquence directe peut accroître notablement le bruit de fond et compromettre ainsi le fonctionnement de tous les systèmes à bande étroite. Si le nombre de systèmes à sauts de fréquence augmente de façon substantielle, les brouillages, même de courte durée, risquent de devenir si fréquents qu'ils nuiront au fonctionnement.

On peut définir un système d'étalement du spectre comme un système dans lequel l'énergie moyenne du signal émis se répartit sur une bande beaucoup plus large que la bande d'information. Le principe de ces systèmes est qu'ils compensent une bande d'émission plus large par une moindre densité spectrale de puissance et une capacité d'élimination plus grande des signaux brouilleurs dans la même bande des fréquences. Du fait que la puissance transmise dans la bande passant des récepteurs à bande étroite peut être plus faible, ces systèmes offrent des possibilités de partage du spectre avec des systèmes à bande étroite de conception classique. De plus, les systèmes d'étalement du spectre permettent d'éliminer les brouillages dans la bande étroite.

Un autre facteur qui influe sur le partage des systèmes d'étalement du spectre est le problème qui se pose lorsqu'un système d'étalement du spectre brouilleur est géographiquement proche et que le signal utile provient d'une source qui se trouve à une certaine distance du point de vue spatial. Le partage est difficilement réalisable lorsque les équipements de services différents subissent des brouillages de ce genre.

Grâce à un certain nombre de techniques nouvelles comme les systèmes de communication mobiles et les satellites sur orbite basse, il est possible de transmettre des informations sous la forme de communications par paquets à faible facteur d'utilisation. Pour assurer des communications de ce type, on peut envisager un partage par recouvrement, mais des études doivent être faites pour déterminer la probabilité de brouillage et définir les critères de protection de la qualité de fonctionnement applicables.

Les systèmes d'étalement du spectre et les systèmes de radiocommunication par paquets sont des systèmes de communication avec accès multiple pour lesquels le partage sera effectué dans les meilleures conditions s'il y a peu d'équipements actifs dans la partie du spectre faisant l'objet d'un recouvrement. Les restrictions auxquelles le partage de ces systèmes est soumis dépendent du nombre d'utilisateurs actifs dans une bande de fréquences donnée. Chaque partie du spectre faisant l'objet d'un recouvrement diminue légèrement le rapport signal/brouillage et accroît en conséquence la probabilité de brouillage. L'essentiel est de savoir comment gérer l'utilisation d'une portion de spectre dans laquelle des systèmes d'étalement du spectre ou de radiocommunication par paquets intermittentes sont exploités. Lorsque le partage par recouvrement sera assuré entre des services, il faudra peut-être limiter le nombre d'utilisateurs occupant la partie du spectre faisant l'objet d'un recouvrement, afin de s'assurer que le niveau de brouillage est inférieur à une valeur définie au préalable. Cette procédure s'apparente aux méthodes d'assignation appliquées actuellement, qui consistent à restreindre le nombre d'utilisateurs ainsi que la largeur de bande qu'ils occupent. De nouveaux systèmes comme les systèmes de radiocommunication intelligents à agilité de fréquence ont également recours à la méthode du recouvrement et pourraient faciliter le partage des fréquences. Ces systèmes sont suffisamment intelligents pour déterminer, en temps réel, si le spectre est occupé ou non. Ils pourraient identifier et employer le spectre inutilisé dans la bande de fréquences attribuée en partage.

2.4.5.1 Séquence directe

La technique d'étalement du spectre par séquence directe consiste à étaler la largeur de spectre du signal sur une plus grande largeur de bande. Avec un système modulé par séquence directe, la porteuse est modulée par une séquence de code numérique dont le débit binaire est nettement supérieur à la largeur de bande du signal d'information. Le brouillage causé par un système à séquence directe à un récepteur à bande étroite s'apparente au bruit électrique aléatoire.

2.4.5.2 Sauts de fréquence

L'étalement du spectre par sauts de fréquence est une autre technique courante qui consiste à choisir des fréquences de façon pseudo-aléatoire dans la largeur de bande d'étalement. Le principe de ce système est que la fréquence porteuse est décalée selon des intervalles discrets dont la structure est dictée par une séquence de code. L'émetteur effectue des sauts de fréquence dans un ensemble prédéterminé et l'ordre d'utilisation des fréquences est déterminé par une séquence de code. Les brouillages causés par les systèmes à sauts de fréquence ont la même puissance que les systèmes classiques, mais sont si brefs qu'ils ne nuisent pas au fonctionnement de la plupart des systèmes.

La technique des sauts de fréquence consiste à commuter systématiquement des fréquences pendant la transmission selon un algorithme déterminé, en vue d'éviter autant que possible l'interception ou le brouillage non autorisés des télécommunications. La largeur de bande totale requise pour les sauts de fréquence est beaucoup plus grande que celle nécessaire à la transmission des mêmes informations sur une seule fréquence porteuse.

La durée de transmission des dispositifs à saut de temps et à saut de temps-fréquence (généralement à faible facteur d'utilisation et de courte durée) est régie par une séquence de code qui détermine à la fois la fréquence émise et la durée de la transmission.

2.4.5.3 MF pulsée

La MF pulsée (ou modulation linéaire) consiste à soumettre la porteuse à un balayage sur une bande large donnée pendant un intervalle d'impulsions donné.

2.4.6 Réglage de la puissance des brouillages/ajustement de la largeur de bande

Si l'on part du principe que le bruit et le brouillage ont la même incidence sur la qualité de fonctionnement du récepteur, comme c'est le cas de certains systèmes, on peut recourir à la technique du réglage de la puissance ou de l'ajustement de la largeur de bande pour tirer parti du caractère non linéaire du rapport porteuse/brouillage (C/I) acceptable, en fonction du rapport porteuse/bruit (C/N) pour une constante $C/(N+I)$. Cette technique consiste à augmenter la puissance d'émission du système qui subit le brouillage. En augmentant légèrement la puissance d'émission d'un système limité par le bruit, par exemple de moins de 3 dB, on accroît beaucoup plus le volume de brouillage au niveau du récepteur, par exemple de 10 dB.

Les liaisons montantes des satellites sont souvent limitées par le bruit en raison de la puissance d'émission requise pour remédier à l'affaiblissement sur le trajet sur de grandes distances. Cette limitation fait que la tolérance au brouillage demeure très faible. On peut difficilement augmenter la puissance d'émission des liaisons montantes des satellites lorsque la puissance requise sur la liaison montante est proche de la limite imposée par les équipements les plus perfectionnés ou de la limite maximale autorisée. Au lieu d'accroître la puissance d'émission maximale, on peut aussi réduire le niveau de régulation de puissance prévu pour remédier aux évanouissements dus à la pluie, mais cela limite la disponibilité du système et risque de ne pas être acceptable selon les objectifs de service du système. Une augmentation de la puissance sur la liaison montante du satellite peut causer des brouillages aux récepteurs de Terre, mais les systèmes de Terre qui partagent des fréquences avec des liaisons montantes de satellites peuvent être limités par l'autobrouillage, et non par le bruit. En conséquence, une augmentation de la puissance d'émission sur la liaison montante n'entraîne pas un accroissement comparable du niveau de puissance de brouillage que peuvent tolérer certains systèmes de Terre. Il convient d'examiner la possibilité d'augmenter la puissance et les conséquences de cette augmentation sur les liaisons montantes des satellites avant d'opter pour cette technique.

Le coût d'une augmentation de la puissance d'émission est fonction de l'écart entre la puissance d'émission nominale et la puissance d'émission maximale des équipements les plus modernes. Si la puissance nominale est nettement inférieure à la puissance maximale que la technique actuelle permet d'obtenir, une augmentation de la puissance d'émission ne sera sans doute pas trop onéreuse. Par contre, si la puissance d'émission nominale est déjà relativement élevée, il pourrait être coûteux de l'augmenter si un grand nombre de terminaux étaient concernés. La disponibilité du système étant plus faible, il en résulte une détérioration du service qui fait qu'il est plus difficile de demander à l'utilisateur de payer pour le service. L'ampleur de la réduction de la disponibilité du système dépend de la marge supplémentaire disponible et des statistiques des taux de précipitation dans la région où se trouve la station terrienne.

2.4.6.1 Partage cocanal

On peut procéder à un partage des fréquences cocanal avec des dispositifs de faible puissance (par exemple les dispositifs exploités sans licence) pouvant être exploités simultanément sur les mêmes fréquences que des services autorisés.

2.4.6.2 Commande dynamique du niveau de puissance d'émission

La commande dynamique du niveau de puissance d'émission (ou commande automatique de puissance) permet de faire varier la puissance d'un émetteur en fonction des conditions environnementales. En cas d'augmentation de la pluie, on peut par exemple augmenter la puissance pour compenser l'affaiblissement accru des signaux. On peut ainsi faciliter le partage en supprimant ou en réduisant la quantité de spectre interdite par des systèmes émettant une puissance supérieure à celle dont ils ont besoin dans les cas où une plus grande puissance peut être nécessaire. Cette technique est particulièrement intéressante lorsqu'il est à prévoir que tous les systèmes d'une région géographique subiront les mêmes variations du point de vue de l'affaiblissement des signaux.

2.4.6.3 Réduction de la puissance surfacique et de la densité spectrale de puissance (dispersion d'énergie)

La réduction de la puissance surfacique ou de la densité spectrale de puissance constitue un moyen d'imposer des limites d'émission non pas au niveau de l'émetteur, mais au niveau d'un récepteur potentiel. L'opérateur peut ainsi déterminer la puissance d'émission, le gain d'antenne et l'emplacement du système de manière à respecter ces limites. On a souvent recours à cette technique pour faciliter le partage entre systèmes à satellites et systèmes de Terre.

2.4.7 Complexité de la modulation

L'utilisation de la modulation d'amplitude en quadrature à nombre élevé d'états (MAQ- n) permet d'accroître le débit binaire dans une largeur de bande fixe ou de réduire cette largeur de bande pour un débit binaire fixe. Etant donné que le choix d'une modulation plus complexe oblige à recourir davantage à des codes de correction d'erreur, il faudra peut-être procéder à une égalisation des canaux dynamique plus complexe pour satisfaire aux objectifs de qualité de la transmission.
