

Liaisons hautes fréquences

par **Gérard HAMON**

Ingénieur de l'École Supérieure d'Électronique de l'Ouest
Ingénieur d'Études à Thomson-CSF Communications

1. Spécificités des liaisons HF	E 6 230 - 2
1.1 Propagation dans la gamme HF.....	— 2
1.2 Particularités du canal HF	— 3
2. Émetteurs-récepteurs HF BLU	— 4
2.1 Architecture et schéma synoptique de principe	— 4
2.2 Étages audiofréquences et fréquences intermédiaires	— 4
2.3 Synthétiseur de fréquences.....	— 5
2.4 Étages de puissance HF	— 5
2.5 Exemples de réalisation.....	— 6
3. Les antennes et leurs dispositifs d'adaptation	— 7
3.1 Antennes HF.....	— 7
3.2 Dispositifs d'adaptation aux antennes	— 7
4. Fonctionnement cosite	— 9
4.1 Perturbation d'un récepteur par un émetteur cosite.....	— 9
4.2 Solutions aux problèmes cosite.....	— 9
5. Evolution des liaisons HF	— 11
5.1 Évolution des services	— 11
5.2 Évolution des équipements.....	— 11

Officiellement, la gamme **haute fréquence** (HF) (High Frequency) s'étend de 3 à 30 MHz. Les longueurs d'ondes correspondantes se situent entre 100 et 10 m. La HF est donc le domaine des **ondes décamétriques**, également appelées **ondes courtes**. Par abus de langage, le terme de HF est souvent appliqué à une gamme débordant légèrement sur les **moyennes fréquences** (MF : 300 kHz à 3 MHz) et s'étendant de 2 MHz (voire 1,5 MHz) à 30 MHz. Précisons, enfin, que diverses raisons, tant historiques que techniques, ont fait de la gamme HF le domaine privilégié de la **modulation à bande latérale unique** (BLU).

La HF s'avère particulièrement bien adaptée aux liaisons moyennes et longues distances. Dans cette gamme en effet, les ondes radioélectriques, outre la propagation classique à vue directe, offrent la possibilité de propagation par réflexion sur certaines couches ionisées de l'atmosphère. Cette particularité est mise à profit pour l'établissement de liaisons à très longues distances, tant civiles que militaires.

Les ambassades et services de presse sont ainsi des utilisateurs habituels de cette gamme : un émetteur et un récepteur HF sur le toit d'un bâtiment, une antenne directive, et voilà notre ambassade équipée pour joindre à tout moment la métropole. Moins ordinaire mais tout aussi révélatrice des formidables potentialités des ondes décamétriques, cette fameuse expédition **Transantarctica** du docteur Jean-Louis Étienne : miracle de la HF qui, pendant cette extraordinaire traversée de l'Antarctique, a permis d'établir des liaisons quotidiennes entre les explorateurs et un camp de base installé à Punta Arenas, en Terre de Feu, à plusieurs milliers de kilomètres. Plus classiques sont bien évidemment les liaisons mobiles maritimes et aéronautiques : communications des navires entre eux ou

avec les stations côtières, communications entre stations de contrôle et aéronefs. Plusieurs plages de fréquences de la gamme sont également dédiées aux services de radiodiffusion. Les radioamateurs enfin sont des utilisateurs passionnés et passionnants des liaisons HF ; ce service d'amateur constitue en effet une activité réglementée et reconnue au niveau international.

Dans le domaine militaire, les forces navales de surface s'avèrent aussi être des utilisateurs privilégiés de la HF : quelques stations à terre judicieusement réparties sur la surface du globe combinées aux possibilités offertes par la propagation ionosphérique omnidirectionnelle sont en effet suffisantes pour assurer un lien quasi permanent avec les navires au beau milieu des océans. Pour être complet, nous préciserons toutefois que ces moyens HF sont bien souvent utilisés comme dispositifs complémentaires des satellites. Si pour les forces terrestres, la VHF (Very High Frequency) (30 à 300 MHz) constitue le moyen principal des communications du champ de bataille, dans certaines conditions particulières (forêt ou jungle par exemple) ces communications sont avantageusement assurées par la HF. La HF est également utilisée pour réaliser la liaison entre les unités de combat sur le terrain et les forces de commandement situées à l'arrière.

Si des prophètes de malheur ont à plusieurs reprises pronostiqué la disparition complète de ces liaisons HF, supplantées à terme par les liaisons par satellites, force est de constater que les faits leur ont jusqu'à présent donné tort. Mieux même, la prise de conscience de la vulnérabilité chaque jour accrue des satellites et les solutions techniques d'adaptativité et de recherche automatique de canal libre apportées par les constructeurs pour remédier aux imperfections du canal HF ont engendré, en ce qui concerne les communications stratégiques, un regain d'intérêt non négligeable pour cette gamme.

Le présent article se propose donc de traiter de ces liaisons HF. Après avoir rappelé succinctement les spécificités de cette gamme de fréquences en matière de propagation et de particularités du canal, nous abordons la conception des équipements émetteurs-récepteurs HF à bande latérale unique, les antennes utilisées et dispositifs d'adaptation associés. Les contraintes particulières, mais relativement courantes dans le domaine des transmissions mobiles, de fonctionnement simultané sur un même site (véhicule, shelter, navire), désigné sous le vocable « cosite », sont analysées ; les problèmes posés sont explicités et les solutions classiquement mises en œuvre exposées. L'article se termine par un panorama des évolutions actuelles et projetées des liaisons HF, tant en matière de services que de conception même des équipements.

1. Spécificités des liaisons HF

Sans développer autre mesure les spécificités de ces liaisons HF, il paraît pertinent de rappeler quelques points fondamentaux qui éclairent l'utilisation qui en est faite et qui justifient pour partie certains choix opérés dans la conception des équipements de radiocommunications HF.

1.1 Propagation dans la gamme HF

Deux types principaux de propagation coexistent dans cette gamme :

— la **propagation par onde de sol**, ou onde directe : il s'agit d'une onde guidée le long de la surface terrestre ou maritime. Les distances atteintes sont fonction de nombreux paramètres (caractéristiques

électriques du sol, fréquence, puissance, etc.). Elles peuvent aller de quelques dizaine de kilomètres (portables 20 W) à plusieurs centaines de kilomètres (1 kW pleine mer) ;

— la **propagation par réflexion ionosphérique** (figure 1) : la réflexion s'effectue sur les couches ionisées de l'atmosphère (couches E, F1 et surtout F2, situées entre 100 et 400 km d'altitude). Les distances atteintes vont alors jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres, avec toutefois des zones intermédiaires de silence.

Par rapport à la gamme HF complète, la bande de fréquences utilisables pour ce mode de propagation entre deux points donnés se trouve toutefois notablement restreinte. En effet, au-dessus d'une certaine fréquence qui dépend essentiellement de l'ionisation et de l'angle d'incidence, l'onde va traverser l'ionosphère sans réflexion. Cette limite supérieure est classiquement dénommée MUF (*Maximum Usable Frequency*).

Par ailleurs, l'affaiblissement rencontré sur le trajet définit une fréquence inférieure au-dessous de laquelle le niveau reçu n'est pas suffisant. C'est la LUF (*Lowest Usable Frequency*). Et la fourchette entre la LUF et la MUF est parfois bien étroite !

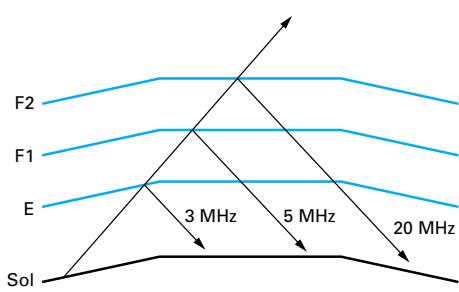


Figure 1 – Propagation par réflexion ionosphérique en HF

1.2 Particularités du canal HF

Les différents modes de propagation induisent inévitablement des **trajets multiples** d'origines diverses : réflexion sur deux couches différentes, double, voire triple réflexion (sur deux couches, sur une couche puis sur le sol, etc.), variation spatiale de l'indice de réfraction ; ils peuvent conduire à des annulations complètes lorsque les signaux reçus sont de même niveau mais en opposition de phase. De plus, ces trajets sont fonction de la fréquence ; ils limitent pratiquement la bande utilisable à quelques kilohertz, une restriction très contraignante pour les transmissions numériques.

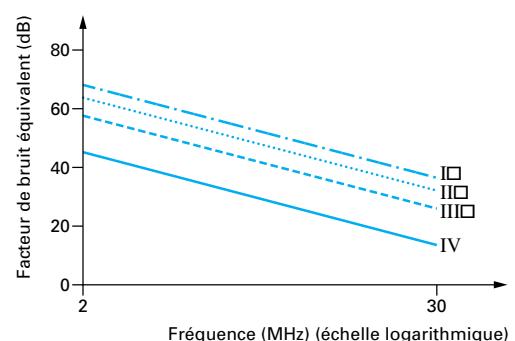
Les évolutions rapides des conditions ionosphériques entraînent des fluctuations importantes du niveau en fonction du temps. C'est le phénomène bien connu de l'**évanouissement (fading)**. Ce phénomène, associé à un niveau reçu variable en fonction des pertes de transmission et à l'emploi de modulations d'amplitude qui imposent le respect de la dynamique du signal audiofréquence d'origine, interdisant de ce fait l'usage d'écrêteurs, conduisent à la mise en œuvre de circuits de commande automatique de gain à la réception.

La variation de l'indice de réfraction avec la fréquence dans la bande de transmission est également cause de **distorsion** (étalement temporel, également Doppler).

L'ionisation des couches, qui résulte de l'action du soleil et, à un degré moindre, des météores, est évidemment un paramètre essentiel, hélas éminemment variable, rendant les **prévisions de propagation difficiles**, voire hypothétiques. L'ionisation est en effet fonction de l'année (cycle solaire de période proche de 11 ans), de la saison, de l'heure, de l'endroit, bref un véritable casse-tête chinois. Certains organismes, tels le CNET (Centre National d'Études et Télécommunications), publient régulièrement des bulletins de prévisions ionosphériques fort utiles pour ne pas dire indispensables aux utilisateurs de la HF. Des techniques de sondages ionosphériques (émissions cycliques par paliers) sont parfois utilisées pour vérifier en temps réel le caractère passant d'une fréquence. Ces contraintes incontournables ont conduit les constructeurs à associer à leurs équipements émetteurs-récepteurs des processeurs internes ou externes de gestion automatique ou semi-automatique des fréquences visant à faciliter au maximum la tâche de l'opérateur.

La gamme HF se caractérise également par son niveau de **bruit externe** élevé (bruit atmosphérique, bruit galactique, parasites industriels) (figures 2a et 2b).

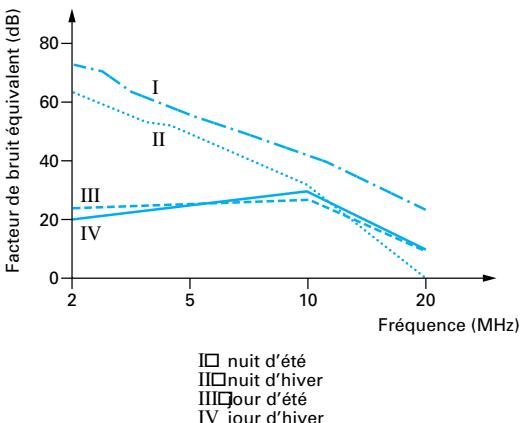
Le **bruit atmosphérique** provoqué par les décharges orageuses présente ainsi un spectre très large (de quelques hertz jusqu'à 20 MHz et plus) et de niveau élevé, avec toutefois une décroissance régulière en fonction de la fréquence. Le CCIR fournit des estimations des valeurs moyennes du bruit atmosphérique en fonction des différents paramètres influents (zone, saison, heure, etc.). En bas de gamme HF, le niveau de bruit externe reçu peut dépasser de plus de



Fréquence (MHz) (échelle logarithmique)

- I\square centres commerciaux
- II\square quartiers résidentiels
- III\square agglomérations rurales
- IV\square zones rurales calmes

(a) bruit industriel



(b) bruit atmosphérique moyen en zone européenne

Figure 2 – Facteur de bruit externe (d'après CCIR)

60 dB le bruit minimal inévitable, avec toutefois des fluctuations importantes à certaines heures (30 dB et plus). Au mieux, le bruit externe reçu se situe sensiblement entre 20 et 30 dB au-dessus du bruit minimal inévitable. Cet état de fait conduit à considérer en règle générale comme suffisant un facteur de bruit propre des récepteurs HF tactiques de l'ordre de 16 dB, et donc assez nettement supérieur aux facteurs de bruit classiques en VHF (inférieurs à 10 dB). Dans certains cas d'exploitation, un facteur de bruit amélioré jusqu'à 12 dB peut cependant s'avérer judicieux (utilisation optimale de la bande 20 à 30 MHz, association à une antenne directive). Cette valeur de 12 dB est ainsi communément retenue pour des récepteurs d'infrastructure installés dans des stations d'écoute et de contre-mesures qui bénéficient le plus souvent d'une implantation en site calme, à faible niveau de bruit industriel.

La gamme HF se caractérise également par son extrême densité d'occupation, découlant entre autres des propagations ionosphériques, et par les brouillages qui en résultent. Trouver un canal libre relève parfois de la gageure. Jointe au niveau de bruit externe élevé, cette caractéristique conduit en réception HF à privilégier les performances de sélectivité et de linéarité au détriment de la sensibilité.

2. Émetteurs-récepteurs HF BLU

2.1 Architecture et schéma synoptique de principe

L'architecture des équipements HF BLU est pour l'essentiel conditionnée par la contrainte d'émission et de réception à une fréquence élevée pouvant couvrir une large gamme (2 à 30 MHz) d'un signal utile audiofréquence d'amplitude généralement variable et de bande très étroite. Classiquement, la solution mise en œuvre s'avère dès lors être du type chaîne linéaire réversible à triple transposition, et donc à deux fréquences intermédiaires. Le schéma synoptique de principe est représenté sur la figure 3.

Sans développer exagérément le sujet, il paraît néanmoins utile d'expliquer les grands choix effectués et de les justifier sommairement.

La nécessité de couvrir la gamme HF complète d'une part, sauf cas très particulier d'un équipement qui fonctionnerait à fréquence fixe, et la nécessaire sélectivité en réception d'autre part conduisent à une architecture à transpositions de type superhétérodynie à fréquences intermédiaires fixes permettant d'assurer le filtrage étroit requis.

L'adoption d'une fréquence intermédiaire FI_1 haute, c'est-à-dire supérieure à la fréquence maximale à traiter, en l'occurrence 30 MHz, facilite grandement le filtrage RF d'entrée. La réjection de la fréquence image, située à 2 FI_1 de la fréquence HF, peut s'effectuer par un simple filtre passe-bas couvrant la gamme HF complète. Généralement, la valeur retenue pour la FI_1 se situe entre 40 et 120 MHz, rejettant ainsi la fréquence image entre 80 et 240 MHz, et donc très au-delà de la bande à transmettre. À l'inverse, l'adoption d'une fréquence intermédiaire FI_1 basse, c'est-à-dire inférieure à la fréquence minimale à traiter, en l'occurrence 2 à 3 MHz, conduirait à un filtrage accordé en RF, la fréquence image se situant dans un tel cas dans la bande à transmettre.

Le filtrage de canal requiert une bande passante étroite (environ 3 kHz) associée à une grande sélectivité (réjection de 50 à 60 dB en quelques centaines de hertz). Il convient en effet d'assurer une bonne protection sur les canaux adjacents, et tout particulièrement en bande latérale unique de rejeter la bande latérale non utile. Les

possibilités technologiques actuelles ne permettent pas de réaliser à coût concurrentiel et avec une stabilité en température acceptable un tel gabarit de filtrage à des fréquences supérieures à 30 MHz. Compte tenu du choix préférentiel d'une FI_1 haute explicité précédemment, ceci conduit en conséquence à effectuer une deuxième transposition à une fréquence intermédiaire plus basse, sur laquelle sera effectué le filtrage de canal. Cette fréquence intermédiaire FI_2 est généralement comprise entre 400 kHz et 2,5 MHz. Des valeurs standards existent, telles que 455 kHz, 1,4 MHz, 2,5 MHz, pour lesquelles les fabricants de filtres peuvent fournir un large échantillon de gabarits de filtrage.

2.2 Étages audiofréquences et fréquences intermédiaires

Le schéma synoptique des étages audiofréquences et fréquences intermédiaires est donné sur la figure 4.

Classiquement, les circuits amplificateurs sont spécifiques émission ou réception, les étages de filtrage et de transposition sont par contre communs. Compte tenu de la dynamique élevée des signaux à recevoir, l'amplification réception nécessite un gain variable important (100 dB et plus). Ce gain variable est réparti judicieusement entre les différents étages à fréquences intermédiaires (environ 40 dB en FI_1 , 60 dB en FI_2) ; il peut aussi, pour une faible part (20 dB), être directement appliqué à la fréquence HF. La commande est générée automatiquement par détection crête après filtrage de canal. L'amplification émission nécessite un gain variable plus limité (environ 20 dB), destiné pour l'essentiel à assurer un niveau crête constant en sortie. La commande est générée automatiquement à partir d'une détection de la tension crête émise. Cette fonction gain variable peut être assurée par des circuits intégrés spécifiques, des étages de type transistors double grille, des amplificateurs de gain fixe associés à des atténuateurs variables ou commutés.

Les circuits de transposition sont généralement du type mélangeur en anneau commandés par une hétérodynie de niveau adapté au point d'insertion de ces circuits dans la chaîne émission-réception. Il faut également noter que le fonctionnement en bande latérale unique avec suppression de porteuse permet l'emploi de tels mélangeurs pour assurer très simplement les fonctions de modulation et de démodulation.

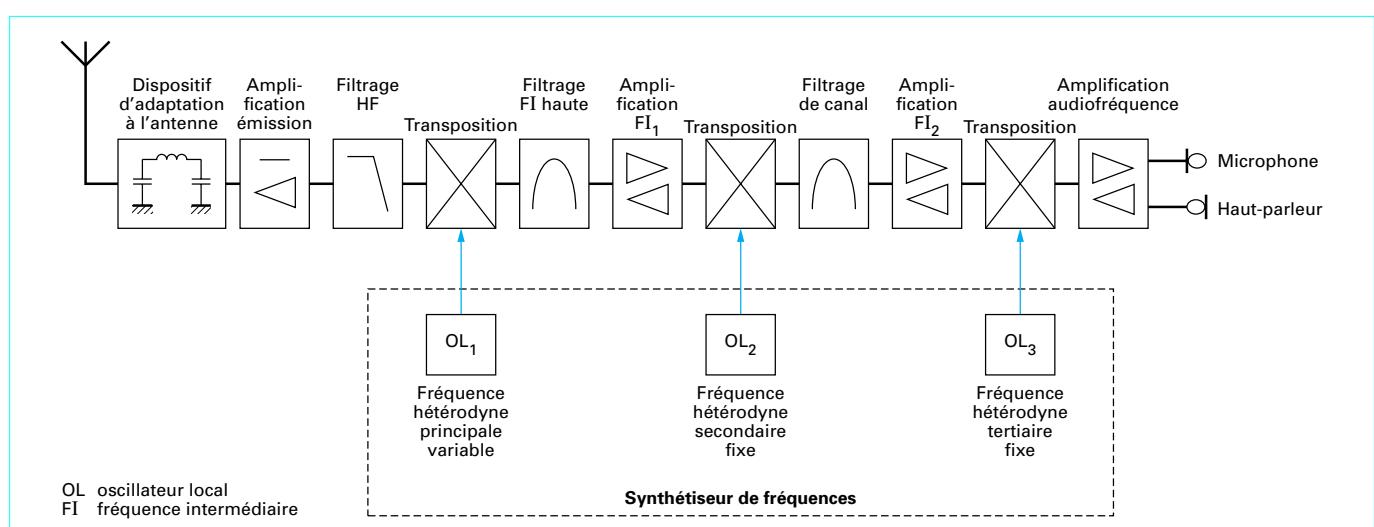


Figure 3 – Schéma synoptique de principe d'un émetteur-récepteur HF

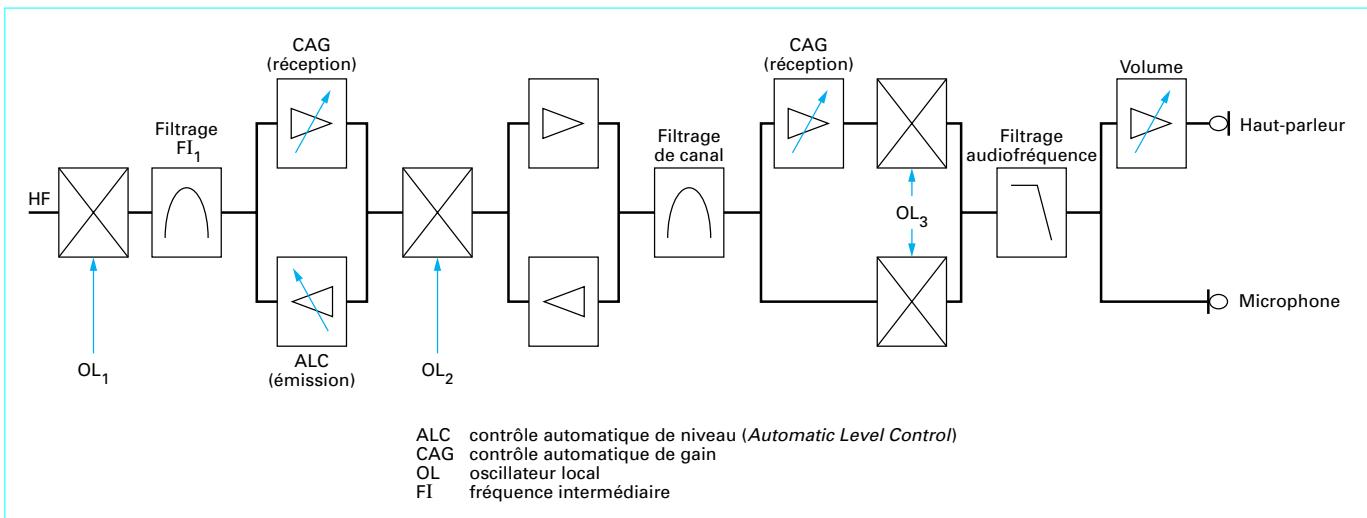


Figure 4 – Schéma synoptique des étages audiofréquences et fréquences intermédiaires

Le fonctionnement en *bandes latérales indépendantes* (BLI) nécessite la présence de deux filtres de canal (une bande latérale supérieure et une bande latérale inférieure). Il est par contre courant de n'utiliser qu'un filtre unique pour réaliser les deux modes BLU+ et BLU- dès lors qu'ils ne sont pas simultanés. On utilise pour ce faire divers artifices de retournement de bande et de valeurs des fréquences hétérodynes fixes et variables. Précisons enfin que pour certains modes bande réduite tels que télégraphie manipulée ou télégraphie par déplacement de fréquence, des filtres réception étroits spécifiques sont avantageusement insérés en fréquence intermédiaire ou en audiofréquence.

2.3 Synthétiseur de fréquences

Le synthétiseur de fréquences a pour fonction de délivrer les signaux hétérodynes fixes et variables nécessaires aux différentes transpositions de la chaîne radio.

Ces signaux hétérodynes sont générés à partir d'un oscillateur pilote de référence qui conditionnera pour l'essentiel la précision et la stabilité de fréquence de l'équipement. La précision et la stabilité court terme (quelques jours) des pilotes utilisés sont de l'ordre de $\pm 10^{-7}$ en variation relative. La stabilité à long terme (plusieurs mois) et la dérive en température sont plutôt de l'ordre de $\pm 10^{-6}$. Il convient de rappeler en effet que le mode BLU phonie est très contraignant en la matière puisque, pour assurer une intelligibilité correcte, il ne tolère guère un décalage absolu supérieur à une cinquantaine de hertz entre l'émetteur et le récepteur.

Les différents signaux hétérodynes sont obtenus par boucles de synthèse de fréquences dans lesquelles un oscillateur à tension contrôlée est, après division fixe ou variable, asservi par comparaison à une fréquence de référence issue du pilote (figure 5).

Les fréquences disponibles sont des multiples entiers de la fréquence de référence. L'obtention d'un pas de synthèse faible (1 Hz) avec un temps d'acquisition court (quelques millisecondes) peut dès lors nécessiter la mise en œuvre de plusieurs boucles imbriquées.

D'autres solutions sont également envisageables. Grâce à un rang de division non entier, la synthèse monoboucle à division fractionnaire autorise ainsi un pas très inférieur à la fréquence de référence. Par rapport aux systèmes multiboucles, ce principe offre l'avantage d'une complexité et d'une consommation moindres. Il est en conséquence largement répandu dans les équipements HF tactiques.

Une caractéristique importante de l'hétérodyne variable principale réside dans sa pureté spectrale (bruit, raies parasites). Cette caractéristique conditionne en effet le bruit et les signaux parasites émis par l'émetteur et la tenue aux brouilleurs du récepteur. Le plancher de bruit de cette hétérodyne devra être minimum (155 à 160 dBc/Hz). Pour une adaptation optimale à la gamme HF, il devra en outre être atteint à un écart de fréquence faible (quelques centaines de kilohertz).

2.4 Étages de puissance HF

La transposition à la fréquence à émettre est effectuée à un niveau de l'ordre du milliwatt. La puissance de sortie des émetteurs HF est classiquement de 10/20 W pour un portable, 100/400 W pour une station véhiculaire, 1 kW pour des équipements d'infrastructure installés à poste fixe ou sur navire. La chaîne d'amplification requise en sortie du dernier mélangeur implique donc un gain en puissance élevé (40 à 60 dB). Ce gain est obtenu par mise en cascade de plusieurs étages.

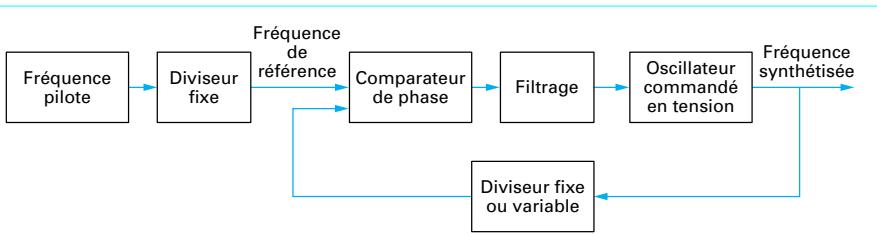


Figure 5 – Schéma synoptique d'un synthétiseur de fréquences

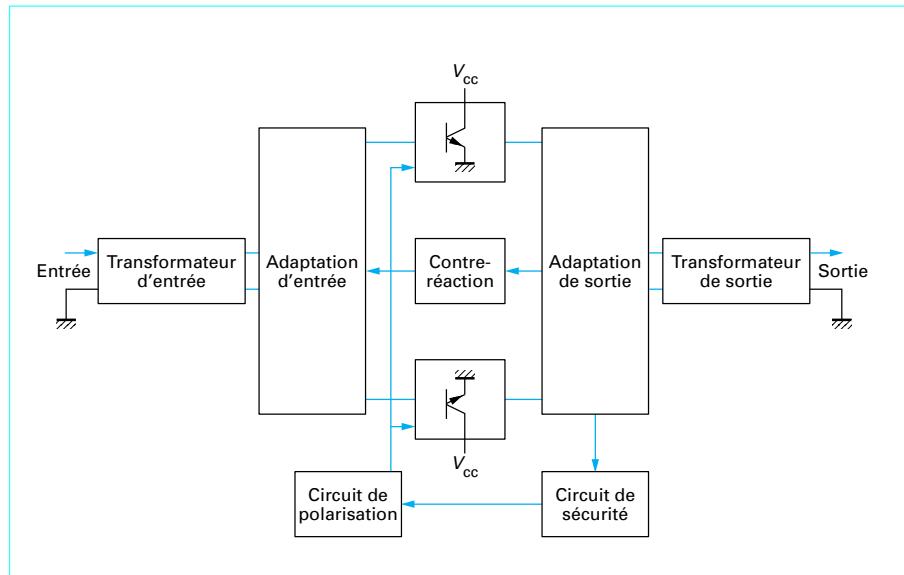


Figure 6 – Schéma synoptique d'un amplificateur de puissance HF

L'amplificateur de puissance HF type est à semi-conducteurs, de structure push-pull en classe AB. Par rapport à la stricte classe B, la très légère polarisation introduite permet de minimiser les distorsions de recouplement des caractéristiques à faible niveau. Cette classe AB est bien adaptée à la transmission de signaux BLU sans porteuse (consommation nulle en l'absence de modulation). Les niveaux de linéarité intrinsèquement obtenus sont en règle générale suffisants pour les modes de transmission utilisés dans cette gamme (produits d'intermodulation typiquement à 30 dBc en dessous des signaux fondamentaux). Certains modes spécifiques (bandes latérales indépendantes, transmissions de données par multiportées) peuvent impliquer des niveaux de linéarité supérieures et nécessiter la mise en œuvre de dispositifs spécifiques visant à améliorer les performances intrinsèques (prédistorsion, contre-réaction, systèmes bouclés de linéarisation).

Le schéma synoptique d'un étage amplificateur de puissance HF est donné sur la figure 6.

Il comprend :

- un transformateur d'entrée assurant le passage dissymétrique-symétrique ;
- les étages d'adaptation d'entrée et de sortie ;
- les deux transistors d'amplification ;
- les circuits de contre-réaction ;
- un transformateur de sortie assurant le passage symétrique-dissymétrique ;
- les circuits de polarisation et de sécurité.

La technologie à transistors bipolaires longtemps utilisée tend de plus en plus à être remplacée par une technologie à transistors MOS (*Metal Oxide Semiconductor*). Les niveaux de puissance obtenus par un module élémentaire équipé de deux transistors peuvent atteindre plusieurs centaines de watts, voire dépasser le kilowatt.

L'obtention d'une puissance élevée (1 kW et plus) peut également être obtenue par le couplage de modules élémentaires de puissance plus faible. Nombreux sont ainsi les émetteurs HF de 1 kW constitués par couplage de quatre modules de 250 W.

Les variations de gain de la chaîne d'amplification dans la gamme de fréquences et en température jointes au niveau essentiellement variable du signal de modulation d'entrée conduisent inéluctablement à insérer un système de régulation de la puissance de sortie. Un prélèvement effectué en sortie et comparé à une valeur de référence vient asservir un étage de gain variable d'ordinaire implanté à

fréquence intermédiaire. Ce dispositif est souvent mis à profit pour assurer la protection de l'émetteur par réduction automatique de puissance en présence de désadaptation de l'antenne. Il peut aussi être utilisé pour adapter le niveau de puissance émise au strict besoin nécessaire à la liaison.

Des filtres d'harmoniques, usuellement de type passe-bas, situés en sortie de l'émetteur permettent de respecter les recommandations internationales en la matière (harmoniques inférieurs à 40 dBc ou 50 mW). Cette fonction de filtrage des harmoniques peut également être assurée par le dispositif d'adaptation à l'antenne.

2.5 Exemples de réalisation

■ Les caractéristiques principales de l'**émetteur-récepteur HF BLU TRC 3500** (Thomson-CSF Communications) sont résumées ci-après :

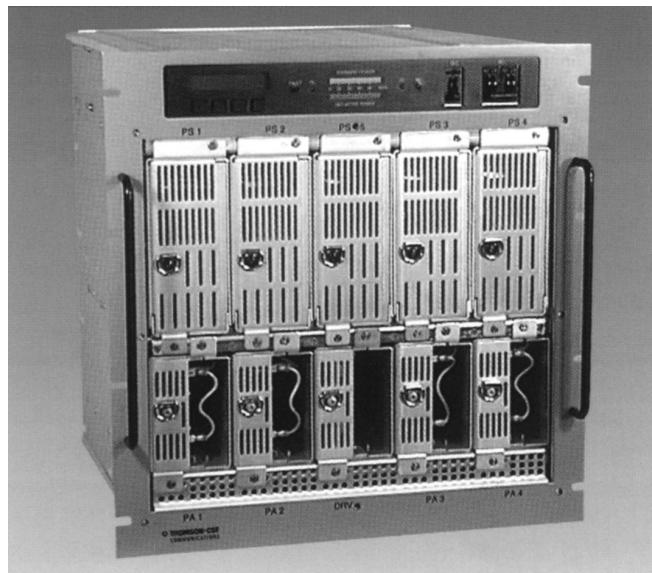
- gamme de fréquences : 1,5 à 30 MHz au pas de 100 Hz ;
- modes de trafic : BLU supérieure et inférieure, compatible AM ;
- stabilité de fréquence : $\pm 10^{-6}$;
- puissances d'émission : 1, 5 et 20 W pep (peak envelope power) et moyens ;
- intermodulation émission : 34 dBc par rapport à la puissance pep ;
- harmoniques émis : inférieurs à 40 dBc ;
- sensibilité réception BLU : 0,5 μ V pour rapport signal/bruit > 10 dB ;
- dispositif d'adaptation d'antennes automatique interne ;
- modem intégré pour transmission de données ;
- adaptativité et recherche de canal libre ;
- évolution de fréquence : 10 à 20 sauts par seconde ;
- poids : 3,7 kg ;
- volume : 4 L.

■ L'**émetteur HF 1 kW TMR 5300** (figure 7) et le **récepteur HF TMR 6100** (figure 8), de conception numérique, sont plutôt destinés à l'établissement de liaisons d'infrastructures, tant civiles que militaires.

Les caractéristiques principales de ces équipements sont résumées ci-après.

- **Émetteur TMR 5300 :**

- gamme de fréquences : 1,5 à 30 MHz au pas de 1 Hz ;

**Figure 7 – Amplificateur de l'émetteur 1 kW TMR 5300**

[Thomson-CSF Communications - Mac Kay (États-Unis)]

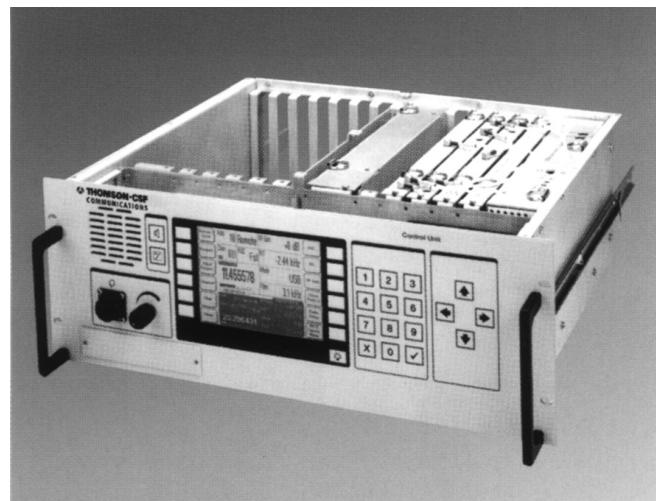
- modes de trafic : BLU supérieure et inférieure, BLI, AM ;
 - stabilité de fréquence : $\pm 3 \cdot 10^{-7}$;
 - puissance d'émission : 1 kW pep (peak envelope power) et moyens ;
 - intermodulation émission : 34 dBc par rapport à la puissance pep ;
 - harmoniques émis : inférieurs à 73 dBc ;
 - modulateur numérique multimode interne ;
 - volume et poids de l'amplificateur : 120 L (cube de 50 cm), 56 kg.
- **Récepteur TMR 6100 :**
- gamme de fréquences : 10 kHz à 30 MHz au pas de 1 Hz ;
 - modes de trafic : BLU supérieure et inférieure, BLI, AM ;
 - stabilité de fréquence : $\pm 3 \cdot 10^{-7}$;
 - sensibilité réception BLU : 0,5 μ V pour rapport signal/bruit > 10 dB ;
 - démodulateur numérique multimode interne ;
 - option présélecteur interne pour fonctionnement cosite ;
- volume et poids : 43 L, 15 kg.

3. Les antennes et leurs dispositifs d'adaptation

3.1 Antennes HF

L'antenne assure l'interface entre l'équipement de radiocommunications et le milieu de propagation.

L'antenne fouet, de hauteur généralement comprise entre 3 et 5 m, voire jusqu'à 10 m sur sol fixe et sur navires, est largement utilisée en HF pour les liaisons tactiques en raison de son diagramme de rayonnement omnidirectionnel. Elle nécessite un dispositif d'adaptation à l'antenne réglé sur la fréquence de transmission et reste donc bande étroite.

**Figure 8 – Récepteur HF numérique TMR 6100**

[Thomson-CSF Communications - Redifon (Grande-Bretagne)]

**Figure 9 – Antenne boucle HF installée sur le toit d'un bâtiment**
(Document STAREC)

Les antennes demi-boucles, basées sur les propriétés d'un cadre accordé de faible dimension, offrent un diagramme de rayonnement semi-toroïdal et une grande sélectivité en fréquences. Leur hauteur réduite par rapport aux fouets justifie leur emploi sur les mobiles

métalliques. Les antennes boucles basées sur le même principe sont plutôt utilisées à poste fixe (figure 9).

Les communications entre stations fixes telles qu'entre ambassades et métropole utilisent aussi sinon préférentiellement des antennes directives. Dans ce domaine, nous pouvons ainsi citer les dipôles et les antennes râteau.

Toutes ces antennes peuvent être utilisées tant à l'émission qu'à la réception. Toutefois, en ce qui concerne la réception, des considérations particulières peuvent être prises en compte. Ainsi, pour un récepteur installé dans un endroit donné, on peut considérer qu'il existe une hauteur efficace optimale de l'antenne qui correspondrait à ramener à son entrée une puissance de bruit externe correspondant à son facteur de bruit propre. La réception étant possible avec des rapports d'ondes stationnaires (ROS) plus élevés que l'émission, les antennes réception sont naturellement plus large bande que les antennes émission. Enfin, la réception autorise l'emploi d'antennes spécifiques dites *actives*. Une telle antenne est constituée d'un élément passif court (moins d'1 m) tel que monopôle, dipôle, ou cadre, à la base immédiate duquel est inséré un amplificateur adapté en bruit à l'impédance de l'antenne. La sensibilité d'une antenne active est approximativement équivalente à celle d'un fouet accordé d'une hauteur cinq fois supérieure. L'élément actif nécessite une source d'alimentation et est cause potentielle de non-linéarités en présence de brouilleurs. Il doit donc sur ce point offrir un niveau de performances au minimum égal à celui des récepteurs associés. Une antenne active peut couvrir la gamme HF complète. Elle s'avère donc apte à recevoir simultanément plusieurs émissions de fréquences distinctes ; il est dès lors courant de l'associer à un multicoupleur qui répartira les signaux reçus sur des récepteurs accordés aux différentes fréquences d'émission. Ses dimensions réduites et sa faculté à remplacer ainsi plusieurs antennes en font une solution opérationnelle élégante dès lors qu'émetteur et récepteur constituent des équipements séparés.

3.2 Dispositifs d'adaptation aux antennes

Ces dispositifs, souvent dénommés **boîtes d'adaptation d'antenne**, situés entre l'aérien et l'amplificateur de puissance de sortie ont pour fonction de ramener l'impédance complexe de l'antenne à une valeur résistive aussi proche que possible de 50 Ω. Ce faisant, ils assurent une charge optimale pour l'amplificateur et permettent le transfert maximal de la puissance HF à l'élément rayonnant.

À titre d'exemple, une antenne fouet de 3 m montée sur véhicule présente une impédance complexe éminemment variable en fonction de la fréquence. La partie résistive va de quelques ohms à 2 MHz à 50 Ω à 18 MHz ; la partie réactive est équivalente à une capacité de 50 à 150 pF de 2 à 17 MHz, et devient ohmique au-delà. La boîte d'adaptation d'antenne doit donc comporter les éléments réactifs permettant d'assurer la transformation d'impédance pour la gamme HF complète avec le minimum de pertes, et ce généralement de manière entièrement automatique. Elle comprend dès lors (figure 10) :

- des éléments d'adaptation variables de type inductances et condensateurs série, condensateurs parallèles ;
- un prélèvement d'informations de type coupleur directionnel ou discriminateur d'amplitude et de phase ;
- éventuellement, un transformateur d'impédance d'entrée ;
- des circuits de gestion automatique de l'accord ;
- des circuits de sécurité.

Les inductances et condensateurs d'accord peuvent être continûment variables ou se présenter sous forme d'éléments discrets commutés par relais HF ou par diodes PIN. Il convient de noter que la technologie choisie n'est pas sans incidence sur les possibilités opérationnelles de la station (aptitude ou non au fonctionnement en évolution de fréquence, par exemple). La minimisation des inductances et des capacités parasites des éléments d'accord s'avère primordiale quant à la qualité de l'adaptation obtenue (rendement, ROS).

Pour assurer l'accord, le prélèvement d'informations HF fournit aux circuits de gestion automatique des éléments significatifs du ROS (tension incidente, tension réfléchie) ou de l'impédance (module, phase) obtenus.

Un transformateur d'impédance est parfois utilisé en entrée pour simplifier le schéma (adaptation sur une impédance de 200 Ω et utilisation d'un transformateur de rapport 4 en impédance, accord par simple compensation série des éléments réactifs de l'antenne avec transformateur à prises présentant plusieurs rapports de transformation).

Compte tenu des impédances présentées et des puissances mises en jeu, les tensions développées au pied de l'antenne peuvent être très élevées (plusieurs kilovolts). Des circuits de sécurité sont en règle générale disposés pour éviter le développement de tensions destructrices ou les échauffements excessifs (réduction judicieuse de la puissance de l'émetteur, écrêteurs).

La boîte d'adaptation d'antenne est ordinairement conçue pour adapter plusieurs types d'antennes (fouets de longueur variable, antennes filaires). Elle doit être dimensionnée pour le niveau de puissance crête de l'émetteur associé. Les ROS visés sont en général inférieurs à 1,5 en émission, jusqu'à 10 et plus en réception.

Les accords peuvent être déclenchés par l'opérateur ou lancés automatiquement suite à un changement de fréquence ou, dans certains cas, à un passage en émission (ROS mesuré élevé dans une séquence d'émission précédente). Ils peuvent être autoritaires ou asservis.

Les accords autoritaires, qui consistent à mettre d'office les éléments correspondant à l'adaptation pour la fréquence considérée, sont le plus souvent suffisants en réception. Ils peuvent également être utilisés en émission par recopie d'accords asservis précédemment mémorisés. Ils présentent l'avantage d'être discrets, puisqu'ils ne requièrent pas de passage en émission.

Les accords asservis, qui nécessitent par contre une émission sur la fréquence de trafic, sont nécessaires pour atteindre un ROS inférieur à 1,5. Pendant cette phase d'asservissement, l'émission s'effectue à puissance faible (quelques watts). Les durées d'accord sont essentiellement fonction du type de l'accord (autoritaire ou asservi) et de la technologie (éléments commutés ou continûment variables). Elles vont de la milliseconde (accord autoritaire par éléments commutés à diode PIN ou relais HF rapides) à plusieurs dizaines de secondes (accord asservi avec self déroulable et condensateurs variables).

4. Fonctionnement cosite

La possibilité de duplex ou de fonctionnement simultané de plusieurs émetteurs-récepteurs sur un même site en conservant une qualité de liaison acceptable constitue une contrainte opérationnelle fréquemment rencontrée dans les transmissions militaires. C'est ainsi le cas lorsque plusieurs équipements sont installés sur le même véhicule. Cette contrainte de proximité géographique est également incontournable sur les navires, dès lors que plusieurs équipements doivent coexister. Les difficultés rencontrées dans un tel environnement cosite sont bien évidemment fonction de la distance entre les antennes et des écarts en fréquence entre les équipements ; elles résident essentiellement dans la perturbation des récepteurs par les émetteurs. Elles trouvent leur solution dans le respect de contraintes d'exploitation, dans la conception même des équipements et dans la mise en place de dispositifs spécifiques.

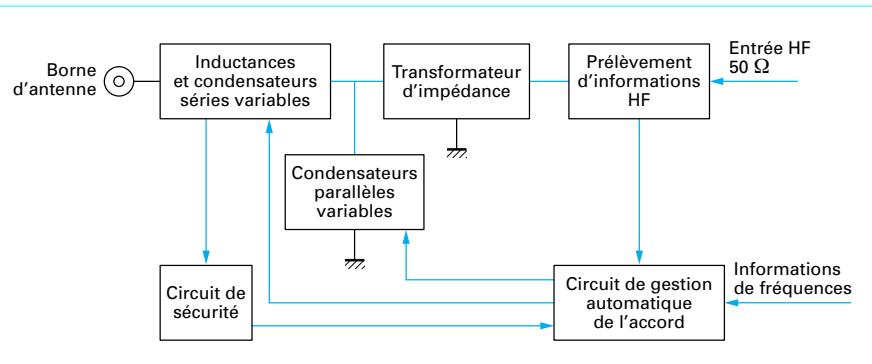


Figure 10 – Schéma synoptique d'une boîte d'adaptation d'antenne HF

4.1 Perturbation d'un récepteur par un émetteur cosite

Les phénomènes rencontrés sont induits par la faiblesse du découplage entre les antennes. D'une manière générale, l'affaiblissement de propagation A entre deux antennes verticales courtes sans pertes et sur sol parfait est donnée par la formule :

$$A (\text{dB}) = -[20 \lg (4\pi d/\lambda) - 3,52]$$

λ étant la longueur d'onde

et d la distance séparant les deux antennes.

Dans le cas présent, la distance réduite entre les antennes se traduit par un couplage serré, avec interaction des dispositifs d'adaptation. Il y a également lieu de tenir compte du décalage entre les fréquences d'émission et de réception, et donc de la surtension des dispositifs d'adaptation des aériens. Enfin, l'environnement mécanique n'est pas neutre. Il en résulte que le découplage est difficile à déterminer théoriquement ; il est alors nécessaire d'effectuer des mesures correspondant à l'ensemble des conditions opérationnelles pour en connaître la véritable valeur.

Exemple : dans la gamme HF le découplage entre deux fous de 3 m installés sur shelter et séparés de 2 m, se situe pratiquement entre 10 et 15 dB pour des écarts de fréquence de 10 %.

Des valeurs concrètes de découplage fournies précédemment, nous déduisons facilement que la difficulté va consister à recevoir un signal utile très faible en présence d'un signal perturbateur de niveau très élevé. Ainsi, pour un émetteur HF de puissance 100 W, soit 50 dBm, avec un découplage de 10 dB, la puissance recueillie à l'entrée du récepteur sera de 40 dBm. Cette valeur est à comparer à -123 dBm, bruit propre, encore dénommé sensibilité tangentielle, d'un récepteur HF de facteur de bruit 16 dB et la bande passante 3 kHz. La dynamique correspondante du récepteur s'établit ainsi à 163 dB !

Les perturbations rencontrées trouvent leur origine pour certaines au niveau du récepteur et pour d'autres au niveau de l'émetteur.

Côté récepteur, le non-respect de la dynamique requise se traduira par des phénomènes de saturation (diminution du gain du récepteur), de transmodulation (modulation du signal utile reçu par la modulation du signal cosite émis), d'intermodulation (génération par non-linéarité des étages d'entrée réception de raies parasites à la fréquence d'accord du récepteur par les combinaisons de plusieurs signaux cosite émis). Enfin, la présence du signal cosite émis sur le mélangeur d'entrée du récepteur va induire un phénomène de mélange réciproque (transposition dans la bande passante FI₁ du bruit de l'hétérodyne principale du récepteur). Ces différents phénomènes sont explicités en détail dans l'article [E 6 205] *Récepteurs radioélectriques - Caractéristiques et conception* de ce traité.

Côté émetteur, la gêne résulte essentiellement dans le bruit et dans les signaux parasites (harmoniques, raies parasites) émis par

l'émetteur cosite à la fréquence de réception. Dans le cas de plusieurs émissions cosite, des produits d'intermodulation peuvent également être générés à l'émission. Dans ce cas, les produits d'intermodulation sont dus à la présence en sortie de l'émetteur A₁ (ou A₂) d'un signal réinjecté de fréquence F₂ (F₁ pour l'émetteur A₁). Par non-linéarité dans l'émetteur A₁ (ou A₂), les deux signaux F₁ et F₂ vont créer une raie d'intermodulation de type mF₁ ± nF₂. Une telle raie se révélera surtout gênante lorsqu'elle sera égale à la fréquence de réception. Ce phénomène est désigné sous le vocable **intermodulation inverse** (figure 11).

4.2 Solutions aux problèmes cosite

Nonobstant la mise en œuvre de dispositifs spécifiques destinés à résoudre les problèmes cités précédemment, le respect de contraintes d'exploitation drastiques s'avère indispensable dès lors qu'un fonctionnement cosite doit être assuré. Le fonctionnement simultané d'émetteurs et de récepteurs ne sera envisageable que sous réserve de respecter un écart minimal entre les fréquences de travail. En HF, cet écart se situe rarement en dessous de 5 %. De même, le fonctionnement d'un récepteur sur une fréquence harmonique d'un émetteur s'avère prohibé. Dans le cas d'une gestion des fréquences de trafic centralisée et gérée par ordinateur, un plan de fréquence adapté peut également être calculé pour l'ensemble des équipements de manière à minimiser la probabilité de gêne par raies parasites de toutes natures (harmoniques, intermodulation).

Les caractéristiques intrinsèques des équipements sont, en règle générale, insuffisantes pour résoudre à elles seules et en totalité les problèmes cosite rencontrés. Des caractéristiques améliorées en matière de dynamique d'entrée du récepteur et de pureté spectrale de l'hétérodyne principale, tant à l'émission qu'à la réception, contribuent toutefois en partie aux solutions. Ainsi, un récepteur HF de facteur de bruit 16 dB et de point d'interception d'ordre 3 de +36 dBm, valeur au demeurant fort honorable, présentera une dynamique d'entrée libre de tout parasite de 106 dB. Bien qu'élevée, cette dynamique reste néanmoins encore faible face aux 163 dB calculés précédemment.

La solution aux problèmes cosite passe dès lors par la mise en œuvre de dispositifs spécifiques.

Le découplage entre l'émetteur et le récepteur peut ainsi être artificiellement augmenté par la mise en œuvre de filtres placés en entrée de la chaîne de réception (figure 12). Classiquement, de tels filtres sont du type passe-bande accordé. L'atténuation apportée peut atteindre 50 dB pour des écarts de fréquence compris entre 5 et 10 %.

Dans le cas particulier, mais courant, de fonctionnement cosite d'équipements traînant dans des gammes de fréquences différentes, telles qu'un récepteur HF en présence d'un émetteur VHF, la protection de la réception HF vis-à-vis de l'émission VHF pourra avantageusement être réalisée par un filtre de sous-gamme de type

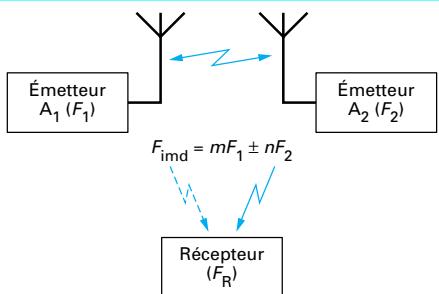


Figure 11 – Phénomène d'intermodulation inverse en émission

passe-bas couvrant la bande complète 2 à 30 MHz et apportant l'atténuation requise sur les signaux VHF.

Le problème du bruit généré par l'émetteur à la fréquence de réception peut être résolu par l'insertion de filtres dans la chaîne émission. Comme en réception, ces filtres sont généralement de type passe-bande accordé. Compte tenu du fait que la source principale de bruit provient de l'hétérodyne, et pour des raisons bien compréhensibles de puissance à supporter, ils ne sont toutefois pas disposés en sortie de l'émetteur, mais insérés à des niveaux classiquement compris entre 10 et 30 dBm. Les figures 13a et 13b expliquent les puissances de bruit recueillies en entrée récepteur dans une bande de 3 kHz avec et sans filtre pour les hypothèses réalisistes suivantes :

— émetteur :

- niveau de transposition en HF : 0 dBm,
- pureté spectrale de l'hétérodyne à 10 % : -155 dBc/Hz,
- puissance de sortie de l'émetteur HF : 50 dBm,
- facteur de bruit des étages amplificateurs de sortie : 6 dB,
- caractéristiques de filtrage envisagées : > 50 dB à 10 %,
- niveau maximal d'insertion du filtre : 30 dBm ;
- facteur de bruit du récepteur : 16 dB ;
- bruit propre du récepteur pour une bande de 3 kHz : -123 dBm ;
- découplage entre émetteur et récepteur : 10 dB.

Le bruit reçu atteint -80 dBm ; il dépasse donc de 43 dB le bruit propre du récepteur. La gêne engendrée par le bruit issu de l'émetteur est très importante et la sensibilité opérationnelle du récepteur se trouve notamment dégradée.

Nous constatons clairement que l'insertion d'un filtre apportant 50 dB d'atténuation et inséré au niveau 30 dBm a permis de ramener le bruit émis au niveau du bruit propre du récepteur, et donc de supprimer totalement la gêne correspondante. À noter qu'ici également, dans le cas d'équipements traîquant dans des gammes de fréquences différentes, le filtre passe-bande accordé peut avantageusement être remplacé par un filtre de sous-gamme. La protection de la réception HF vis-à-vis du bruit généré par un émetteur VHF sera dans ce cas réalisée par un filtre de sous-gamme de type passe-haut couvrant la bande VHF et apportant l'atténuation requise sur le bruit émis en HF.

Une autre solution aux problèmes engendrés par le niveau élevé de signal reçu à l'entrée du récepteur sur la fréquence d'émission peut consister dans la mise en œuvre de dispositifs de type annulateur. Le principe de fonctionnement d'un tel dispositif consiste à prélever une portion du signal *cosite* émis afin de le réinjecter au même niveau mais en opposition de phase avec le signal reçu en entrée récepteur (figure 14). La précision requise pour obtenir une atténuation significative (supérieure à 40 dB) conduit nécessairement à un système asservi. Un tel dispositif suppose un découplage minimal (15 à 20 dB). Il s'asservit sur le signal principal de l'émetteur. Son efficacité éventuelle sur le bruit émis est fonction de l'évolution du couplage entre les fréquences d'émission et de réception considérées, et donc d'autant meilleure que ces fréquences sont proches et que les dispositifs d'adaptation sont peu surtendus.

Precisons enfin pour terminer qu'il n'est pas rare de devoir combiner les différentes solutions évoquées pour résoudre au mieux les problèmes posés par un fonctionnement *cosite*.

5. Évolution des liaisons HF

5.1 Évolution des services

Les spécificités des transmissions HF ont longtemps nécessité une mise en œuvre par des opérateurs spécialisés. Ceci tenait entre autres à la grande congestion spectrale limitant le nombre des fréquences utilisables et aux variations fréquentes des conditions de propagation rendant difficiles l'établissement et le maintien durable de la liaison sur une fréquence donnée.

Face à ces contraintes, la recherche de canal libre permet désormais une utilisation simple et fiable du canal HF en assurant l'établissement et le maintien automatiques des communications en point à point ou entre les stations d'un réseau. D'autres paramètres, tels que le niveau de puissance et le débit des transmissions, peuvent également être gérés automatiquement en fonction de l'évolution de la qualité de la liaison.

Utilisées par les militaires, les liaisons HF doivent en outre résister aux menaces croissantes de la guerre électronique. L'évasion de fréquence adaptative permet aujourd'hui d'assurer une résistance élevée à l'ensemble des menaces de la guerre électronique (interception, écoute, localisation, brouillage, intrusion), à la condition toutefois de s'affranchir des contraintes de propagation et d'occupation spectrale qui limitent habituellement l'efficacité des systèmes HF à évasion de fréquence. Pour une efficacité correcte, ceci requiert dès lors la mise en œuvre de techniques sophistiquées d'analyse du spectre et de traitement du signal.

Les particularités du canal HF ont longtemps confiné les transmissions dans cette gamme à la phonie et à la télégraphie bas débit. Cette époque est depuis peu révolue. La transmission de données haut débit (2 400 bit/s) telles que fichiers de calculateurs, télécopies, images numérisées, phonie vocodée, est désormais rendue possible par l'emploi de modems adaptés. Le modem HF série multimode TRC 1751 de Thomson-CSF Communications intègre ainsi des procédés de protection contre les trajets multiples, les interférences, l'étalement Doppler ou le *fading* qui le rendent parfaitement apte à

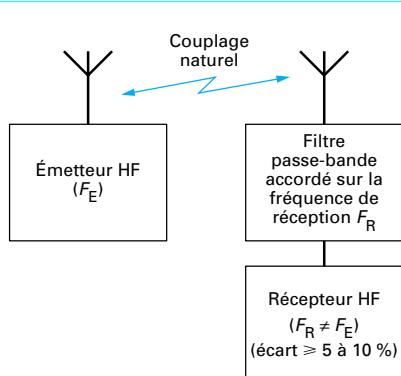


Figure 12 – Augmentation du découplage par filtrage réception

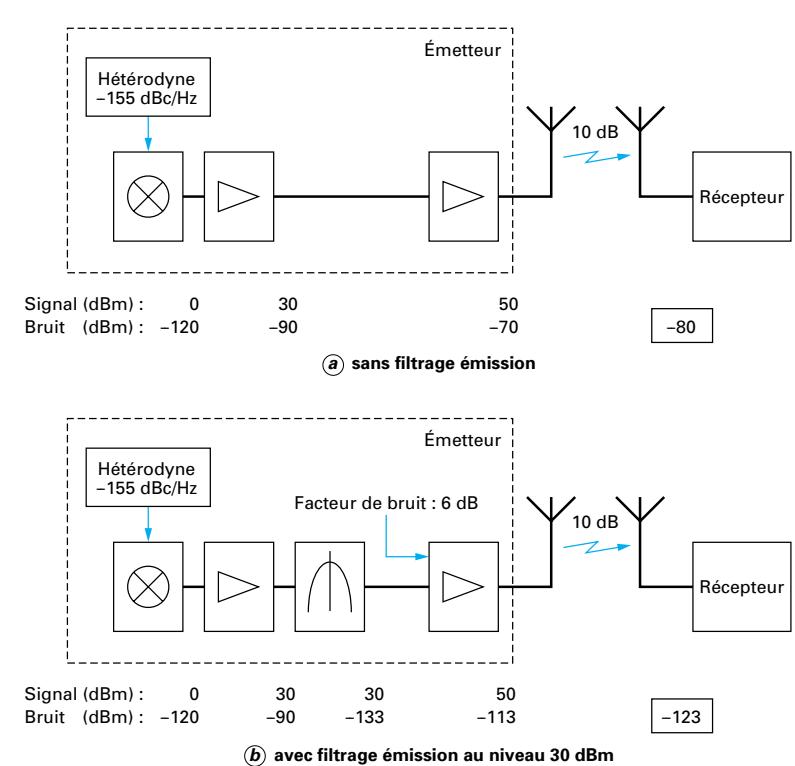


Figure 13 – Puissance de bruit recueillie en entrée récepteur

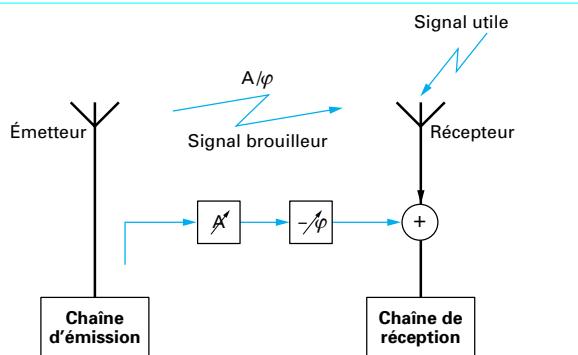


Figure 14 – Principe de fonctionnement d'un dispositif annuleur

assurer un service opérationnel fiable à débit élevé. La confidentialité et la résistance aux contre-mesures s'en trouve indirectement améliorée, les transmissions de données se prêtant en effet beaucoup mieux au codage que les signaux analogiques.

5.2 Évolution des équipements

Si pour la gamme HF la réalisation d'équipements émetteurs-récepteurs professionnels entièrement numérisés reste encore du domaine du futur, l'introduction de techniques numériques se fait néanmoins chaque jour croissante. Les solutions de numérisation après transposition sur une FI₁ haute ont aujourd'hui la préférence des concepteurs. Un tel choix permet en effet de conserver les avan-

tages inhérents à l'architecture FI haute explicitée précédemment tout en rendant possible la numérisation sans contraintes insurmontables.

Deux solutions pratiques peuvent être mises en concurrence, à savoir la numérisation sur voies *I* (en phase) et *Q* (en quadrature de phase) analogiques ou la numérisation sur fréquence intermédiaire.

La numérisation sur voies *I* et *Q* analogiques en quadrature de phase offre l'avantage d'un traitement de signal à effectuer sur des fréquences basses, en l'occurrence la bande de base (figure 15a). La génération d'une hétérodyne fixe avec deux voies en quadratures est aisée. Les inconvénients d'une telle solution résident essentiellement dans les difficultés à assurer un équilibrage parfait en amplitude et en phase sur deux voies analogiques distinctes. L'équilibrage imparfait se traduira par une raie parasite de fréquence négative et par l'apparition d'une fréquence parasite centrée sur zéro. À titre d'exemple, un déséquilibre de seulement 0,1 °C sur la phase et 0,1 dB sur l'amplitude se traduit par une raie parasite d'amplitude 45 dBc par rapport au signal utile. Ces imperfections analogiques peuvent être partiellement compensées par des traitements numériques appropriés, mais nécessitant une puissance de calcul certaine.

La numérisation sur fréquence intermédiaire requiert de travailler sur une fréquence sensiblement plus élevée que la numérisation sur voies *I* et *Q* analogiques (figure 15b). La transposition en voies *I* et *Q* est ici réalisée en numérique, éliminant ainsi totalement les problèmes liés aux déséquilibres de la solution précédente. Les traitements de signal sont facilités, sous réserve de relations pertinentes entre les valeurs de la fréquence intermédiaire et de la fréquence d'échantillonnage. Les valeurs de fréquence intermédiaire adoptées se situent en règle générale entre 100 kHz et 2 MHz. Le filtrage FI₁ doit apporter la protection nécessaire (80 à 90 dB) sur la fréquence image de la FI₂; il peut également assurer tout ou partie du filtrage

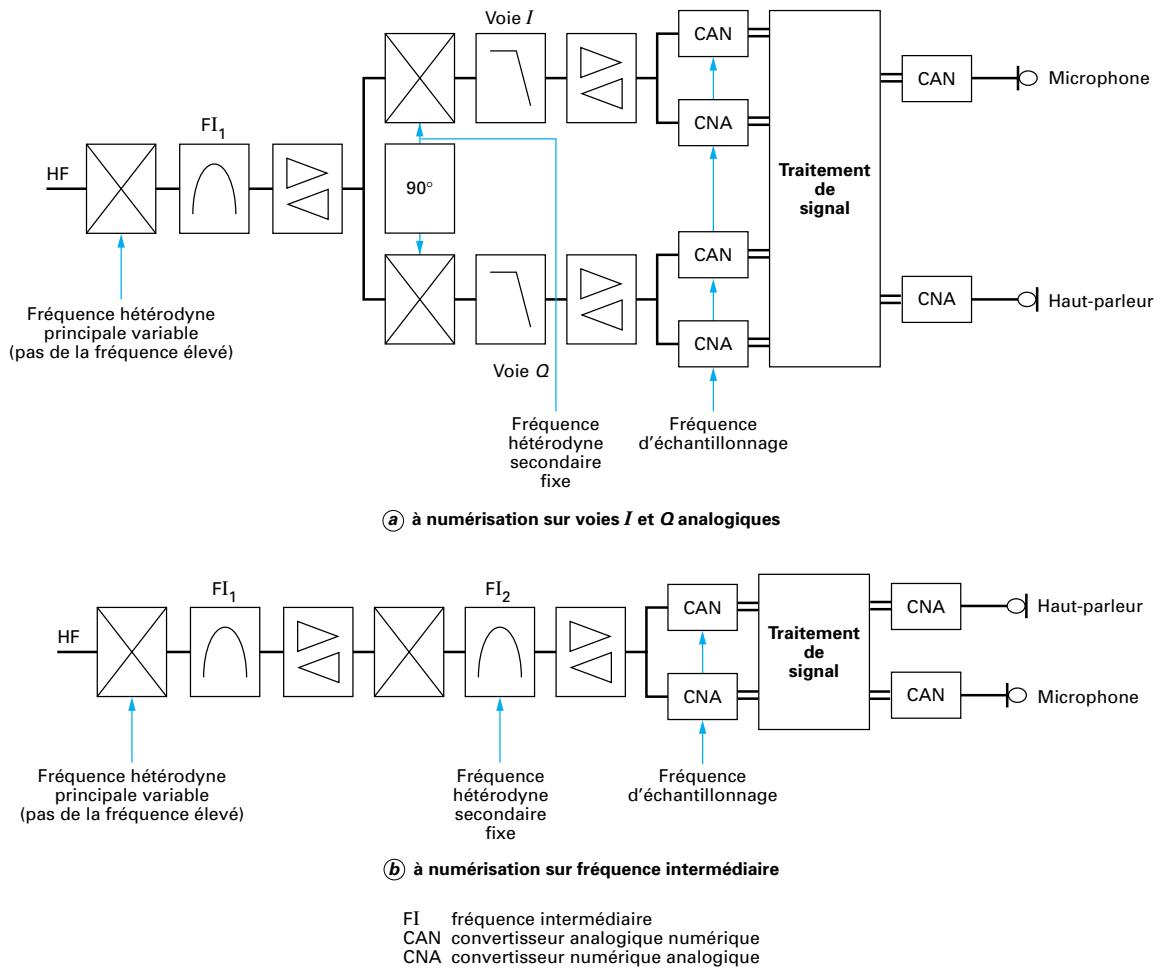


Figure 15 – Émetteur-récepteur HF numérique

antirepliement requis avant numérisation et est, sauf exception, choisi relativement étroit (bande passante inférieure à 100 kHz). La bande à traiter se trouve dès lors limitée. Dans un tel cas, la fréquence d'échantillonnage peut être soit supérieure soit inférieure à la fréquence intermédiaire, et ce sans déroger à l'incontournable théorème d'échantillonnage de Shannon (fréquence d'échantillonnage 2 fois supérieure à la bande maximale à traiter). On parle alors respectivement de suréchantillonnage ou de sous-échantillonnage.

Dans une telle architecture d'émetteur-récepteur HF, les fonctions réalisées numériquement par traitement de signal sont principalement :

- le filtrage de canal ;
- les opérations de modulation et de démodulation ;
- l'accord « fin » à la fréquence de trafic, en complément de l'accord « gros » réalisé par l'hétérodyne variable principale ;
- les commandes automatiques de gain à la réception et de niveau à l'émission.

Les consommations des convertisseurs et des processeurs de traitement de signal limitent encore l'application de ces architectures numérisées dans les équipements tactiques. Dans les équipements d'infrastructure présentant des contraintes moindres de

consommation, de telles solutions s'avèrent de plus en plus concurrentielles face aux solutions analogiques éprouvées ; elles se prêtent en outre mieux à la mise en œuvre de procédés de modulation complexes et permettent la réalisation de filtres de canal à grande sélectivité sans distorsion de temps de propagation. La réalisation de l'ensemble de ces fonctions par logiciel de traitement de signal garantit de plus un potentiel d'évolutivité indéniable.

L'utilisation de technologies modernes comme les composants montés en surface et les implantations de haute densité ont permis une réduction significative des poids et volume des émetteurs-récepteurs HF de la génération actuelle par rapport aux équipements de la génération précédente. Sur les équipements tactiques de Thomson-CSF Communications, cette réduction a ainsi pu atteindre 40 %.

Terminons enfin en précisant que la conception des équipements futurs est pour l'essentiel guidée par l'optimisation des coûts de possession, de l'achat initial au maintien en condition opérationnelle sur la durée de vie du produit, par l'intégration de nouveaux services et par la facilité encore accrue d'exploitation et de mise en systèmes.