Liaisons contre-contre-mesures électroniques (CCME)

par **Gérard AUGER**
Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électrotechnique et de radioélectricité de Grenoble
Responsable Études amont à Thomson-CSF Communication

Les contre-contre-mesures électroniques (CCME) dans les transmissions radioélectriques comme leur nom l'indique sont destinées à contrer les contre-mesures électroniques (CME). La description et la problématique des CCME ne peuvent donc être comprises qu'après un rappel des objectifs et des difficultés des CME (hors brouillage et antibrouillage radar).

Celles-ci peuvent être classées en 2 grandes catégories :

*— les **CME passives**, au moyen desquelles on cherche, à travers leurs émissions radioélectriques de toute nature, à identifier et localiser les forces ennemies, deviner et anticiper leurs manœuvres, sans qu'il soit nécessaire d'émettre et donc de risquer de se dévoiler et de donner prise soi-même aux CME ennemies ;*

*— les **CME actives** dont le but est de désorganiser ou d'interdire les communications de l'adversaire et qui nécessitent le recours à des émissions, généralement de forte puissance, pour brouiller.*

La lutte contre les CME passives consiste essentiellement à rechercher la discrétion. Dans cette stratégie, la minimisation de la puissance d'émission est toujours un facteur favorable. À l'inverse, un moyen de lutte contre le brouillage, primaire mais toujours efficace, est l'augmentation de la puissance d'émission de manière à surpasser le brouilleur.

Les techniques CCME permettent de sortir au moins partiellement de ce dilemme, certaines étant efficaces contre les 2 types de menace, d'autres étant ciblées sur l'une ou l'autre. Elles ont pour objectif d'augmenter considérablement les exigences de performance et donc le coût des CME pour une efficacité réduite. Il est plus rare que les CME puissent être rendues totalement inopérantes parce que les exigences sont portées hors des limites de faisabilité technologiques ou physiques.

1. Rappels sur les CME des liaisons radio

1.1 CME passives

1.1.1 Objectifs

Sur le plan opérationnel, ils peuvent se résumer à la recherche du maximum de renseignements sur le dispositif et les intentions de l'ennemi.

Des moyens techniques privilégiés pour y parvenir consistent évidemment à tenter d'intercepter et de localiser toutes les émissions et à recueillir l'information transmise. On s'efforcera ainsi de déterminer qui communique avec qui et où sont situées les concentrations de sources d'émissions et donc probablement de forces. La simple mesure de l'intensité de l'activité de communication est déjà une source intéressante de renseignements sur l'activité et les manœuvres de l'ennemi. Le décodage d'adresses ou d'indicatifs permet de remonter directement à l'identité des entités opérationnelles. L'analyse technique des signaux émis est aussi un moyen d'y parvenir si l'espionnage a pu établir des bases de données en dotations de matériels.

1.1.2 Difficultés

La détection de présence et la goniométrie des émissions sans étalement de spectre sont des techniques bien maîtrisées aujourd'hui et qui peuvent être réalisées avec des rapports signal/bruit (S/B) du même ordre de grandeur que ceux qui sont nécessaires à la réception des signaux par les récepteurs destinataires. À titre d'ordre de grandeur, il est possible, grâce à des calculs de FFT (*Fast Frequency Transform*), de détecter et goniométrer toute émission apparaissant dans une bande de quelques dizaines de mégahertz (typiquement 20 à 50 MHz) en moins de 500 µs avec un rapport S/B au moins égal à environ 6 dB dans 25 kHz.

La détection et la goniométrie ne sont mises en échec que par la superposition de signaux à peu près de même puissance dans la même bande de fréquence, le rapport S/B étant alors inférieur à 0 dB pour chacun d'eux. C'est la technique de l'étalement de spectre par séquence directe (§ 3.2.2).

Un autre problème crucial des CME est celui de l'analyse et du tri des nombreuses réponses fournies par les capteurs, parmi lesquelles se rencontrent d'autant plus de fausses alarmes que le temps alloué à la détection est court.

1.2 CME actives

Les actions de CME actives sont :
— le brouillage sélectif ;
— le brouillage aveugle ou de barrage ;
— le brouillage suiveur ;
— l'intrusion.

Brouillage sélectif

Il convient d'abord de souligner que la sélectivité du brouillage recherche avant tout une discrimination opérationnelle et non technique : de manière évidente, brouiller les communications de l'ennemi de préférence à celles de son propre camp, mais aussi et plus précisément brouiller les communications de l'état-major de préférence à celles des échelons subalternes, ou encore, par exemple, celles d'un système d'armes antiaérien si l'on projette une incursion aérienne, etc.

Le **brouillage sélectif** consiste donc d'abord à rechercher des critères d'identification des communications. Un paramètre souvent suffisant dans le passé était la fréquence car à chaque fonction militaire était attribué un canal fréquentiel relativement stable dans le temps. Une observation préalable du spectre éventuellement associée à l'espionnage pouvait donc permettre d'identifier assez sûrement chaque fonction opérationnelle par la fréquence de transmission. Grâce aux techniques de sauts de fréquence et de recherche de canal libre (cf. § 3.1 et 3.2.2), cette association n'est plus aussi caractéristique aujourd'hui. Elle subsiste dans une certaine mesure si l'on remplace fréquence par bande et/ou plan de fréquence. L'association est cependant beaucoup plus difficile à établir.

Un autre paramètre pouvant permettre d'associer un émetteur à sa fonction opérationnelle est sa localisation.

Le brouillage sélectif consiste donc à concentrer à chaque instant la puissance du brouilleur sur une ou des fréquences dont on pense qu'elles sont attribuées à la communication que l'on veut brouiller ou qui sont rayonnées d'un certain point ou d'une certaine direction de l'espace. Bien entendu la puissance sera, si possible, rayonnée au moyen d'antennes directives vers les stations de réception ennemies, dont la position peut cependant être difficilement localisable si elles ne comportent pas d'émetteurs associés. Une autre grande difficulté de ces brouilleurs contre des communications changeant fréquemment de fréquence (sauts de fréquence ou recherche de canal libre) consiste à minimiser le temps de détection de la nouvelle fréquence à brouiller, temps pendant lequel le brouillage est impossible et donc la communication opérationnelle. Le simple cumul des temps de propagation du signal émis vers la station CME et du signal de brouillage de celle-ci vers la station de réception est d'ailleurs un temps de protection physique contre le brouillage sélectif d'une fréquence non connue à l'avance.

Brouillage aveugle ou de barrage

À défaut de pouvoir identifier précisément une fréquence à une communication opérationnelle ou si la fréquence est changée trop fréquemment, la puissance de brouillage est répartie dans une large bande de fréquence et rayonnée de manière omnidirectionnelle. C'est le **brouillage de barrage** ou **brouillage aveugle**. L'efficacité d'un tel brouillage est évidemment réduite puisqu'une grande partie de la puissance est perdue à brouiller des fréquences inutilisées ou utilisées par des communications de moindre importance. La puissance de l'amplificateur nécessaire se trouve portée à une valeur qui, combinée avec la largeur de bande nécessaire, peut dépasser les limites de faisabilité technologiques. De plus les communications amies se trouvent elles aussi interdites dans la bande de fréquence et dans la zone brouillées.

Les brouilleurs aéroportés ou largués chez l'ennemi sont les plus efficaces pour une puissance et une bande données en raison de leur proximité des récepteurs attaqués mais n'ont qu'une autonomie et/ou une puissance limitées par l'énergie embarquable.

Brouillage répéteur

Un compromis entre le brouilleur sélectif et le brouilleur de barrage est le **brouilleur répéteur**. Celui-ci consiste à altérer et amplifier tous les signaux reçus dans une certaine bande de fréquence. La difficulté technique réside dans la réception et l'amplification simultanée. Seules les fréquences occupées sont brouillées, ce qui économise de la puissance relativement au brouillage aveugle, mais il n'existe pas de sélectivité en fonction de l'importance des communications.

Intrusion

Enfin, le dernier mode de CME active, l'**intrusion**, consiste à tenter d'imiter une communication adverse pour diffuser de l'information altérée ou fabriquée. C'est une attaque nécessitant beaucoup moins de puissance rayonnée puisqu'elle prend simplement la place d'un émetteur habilité, en revanche elle nécessite une très bonne connaissance des procédures de communication. D'ailleurs, l'intrusion peut se placer au niveau de l'information elle-même, mais également au niveau technique pour tenter de désorganiser ou saturer le fonctionnement des réseaux.

2. Principes généraux

2.1 Objectifs

L'objectif des liaisons CCME est de maintenir les communications malgré les menaces de brouillage ou autres agressions électroniques ennemies tout en limitant les possibilités d'exploitation par son renseignement. Bien entendu, le silence radio n'est pas une mesure CCME puisqu'il consiste précisément à consentir prématurément à l'ennemi le principal résultat recherché par les CME actives : l'interruption des communications. D'une manière plus générale, la limitation préventive de l'intensité des échanges d'information par rapport au niveau souhaité est déjà un succès « gratuit » obtenu par l'ennemi grâce à une menace non effectivement mise à exécution. Les systèmes CCME devront donc s'efforcer de conserver en l'absence de mise en œuvre des CME ennemies le même flux d'information qu'un système non protégé. En revanche, l'adaptation des flux des échanges d'information au niveau effectif de brouillage (par exemple, ajustement du débit des liaisons en fonction du rapport signal/brouilleur disponible) est un véritable moyen CCME.

2.2 Techniques de protection

Recherche de canal libre

Elle est assez rudimentaire sur le plan guerre électronique et elle ne résiste pas aux CME un peu évoluées. Toutefois c'est une technique qui peut être très efficace pour des liaisons de seconde importance qui ne susciteraient pas une attaque sélective mais qui seraient néanmoins des victimes accidentelles d'un brouillage de barrage.

Sauts de fréquence

Le canal de transmission est changé très rapidement de manière pseudoaléatoire dans une bande de fréquence aussi large que possible tout au long d'une communication. Le temps d'utilisation d'une fréquence étant très court, les CME passives disposent d'un temps réduit pour détecter et goniométrer. Cependant, le maximum de protection est obtenu contre le brouillage sélectif, car le temps est encore plus critique pour l'analyse technique, le tri et la montée en puissance du brouilleur.

Étalement de spectre par séquence directe

La puissance du signal utile est dispersée sur une bande de fréquence beaucoup plus large que ce qui est nécessaire pour la transmission de l'information. Ainsi, la densité de puissance du signal est très faible et se situe, en limite de portée, bien en dessous de la densité de bruit thermique des récepteurs. Cette technique est donc efficace contre la détection et la goniométrie. Elle protège également contre le brouillage sélectif, la puissance du brouilleur, quelle que soit sa forme, étant dispersée dans le récepteur sur la bande d'étalement du signal.

Impulsion

Le principe consiste à raccourcir au maximum la durée d'une transmission de façon à prendre de vitesse les CME actives et si possible passives.

Contrôle de puissance

Il s'agit de limiter la puissance d'émission au strict nécessaire pour assurer la liaison utile, en tablant sur la limite de sensibilité des CME passives.

Traitement d'antennes

Le diagramme de rayonnement des antennes est conformé en créant des trous dans la direction des stations CME pour lutter contre les CME passives à l'émission et les CME actives à la réception.

Chiffrement

Cette technique est destinée à empêcher l'ennemi de comprendre l'information transmise et également à se prémunir contre l'intrusion.

Banalisation des transmissions

C'est une forme de lutte contre les CME passives et le brouillage sélectif en réduisant les possibilités d'identification des liaisons par l'analyse technique.

Leurrage

Il est destiné à la lutte contre le brouillage sélectif en obligeant le brouilleur à partager sa puissance entre signaux importants et signaux peu importants ou factices.

Codage correcteur d'erreurs

En permettant de reconstituer les informations perdues à cause du brouillage à partir de celles qui ont été correctement reçues, il oblige l'ennemi à brouiller de manière uniforme en temps et fréquence. C'est donc un moyen utilisé en conjonction avec les autres techniques pour éviter que le brouilleur ne puisse accroître son efficacité grâce à une forme d'onde adaptée à celle de la liaison attaquée (brouilleur à bande partielle contre les sauts de fréquence ou en impulsions contre l'étalement par séquence directe).

Absorption atmosphérique

Certaines bandes de fréquence subissent une absorption par les composantes de l'atmosphère. Par exemple, autour de 60 GHz l'oxygène provoque une absorption de 15 dB/km. Certaines liaisons, qui ne peuvent être qu'à courte portée pour obtenir la liaison avec une puissance d'émission acceptable, choisissent ces bandes pour se protéger à la fois contre les CME passives et actives.

2.3 Contraintes d'emploi

Les moyens CCME reposent d'une manière générale sur la variabilité pseudoaléatoire de certains paramètres de transmission au cours du temps. Cette remarque montre clairement la nécessité pour tous les participants à une communication de disposer d'une référence commune de temps.

Cette référence peut être établie spécifiquement par les participants au début d'une session de communication, par connexion physique ou par voie radio, mais avec une protection réduite.

La tendance est d'utiliser de plus en plus une référence universelle comme le temps UTC (*Coordinated Universal Time*) distribué par le système GPS.

3. Description des méthodes CCME

3.1 Recherche de canal libre

Le principe consiste à rechercher un canal exempt de brouillage avant de transmettre de l'information utile. Pour cela la communication commence par une mesure de bruit sur le canal en l'absence de transmission utile ou par une mesure de la qualité de la transmission : mesure de rapport *S*/*B* dans une liaison analogique ou mesure de taux d'erreurs dans une liaison numérique.

Ces mesures s'effectuent successivement sur un certain nombre de fréquences jusqu'au moment où l'une d'elles offre une qualité de service suffisante pour les transferts d'information.

Les difficultés de la méthode sont de coordonner les actions de l'émetteur et du ou des récepteurs avant qu'ils n'aient trouvé un canal de communication satisfaisant, puis d'assurer la cohérence du choix par toutes les parties.

Le principe de base consiste à faire scruter un certain nombre de fréquences potentielles par les récepteurs systématiquement en l'absence de communication. Lorsque l'émetteur décide de commencer une communication, il interroge les récepteurs sur chacune d'elles (figure **1**) et attend leurs réponses. Si le canal est satisfaisant, par définition interrogation et réponses sont reçues et l'émetteur confirme le début de la transmission sur la fréquence en cours de test. Sinon l'émetteur invite à poursuivre la scrutation. La sélection de la fréquence est généralement de plus subordonnée à une mesure négative de bruit ambiant tant du côté émetteur que récepteurs pour éviter de brouiller une communication déjà en cours.

Les figures **2**, **3** et **4** présentent 3 mises en œuvre possibles de la procédure de scrutation des fréquences. Sur la figure **2**, l'émetteur et les récepteurs disposent d'une horloge commune et effectuent un balayage synchrone des fréquences. Sur la figure **3**, les récepteurs scrutent rapidement les fréquences de manière asynchrone et l'émetteur émet un signal de test de durée supérieure à la durée d'un cycle de balayage pour être certain d'être reçu par tous les récepteurs si la fréquence est bonne. Sur la figure **4**, c'est au contraire l'émetteur qui scrute rapidement les fréquences et les récepteurs qui veillent plus longuement.

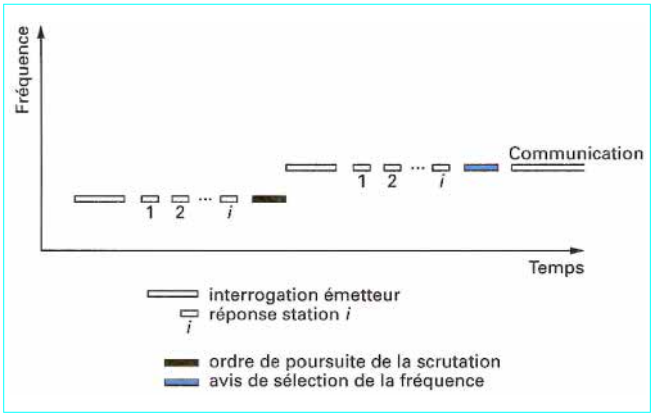

Figure 1 – Procédure de recherche de canal libre (RCL)

La recherche de canal libre est une technique efficace à la fois contre les CME actives et passives.

En effet, sa grande qualité est sa faculté de permettre d'assurer une liaison dans un environnement très perturbé puisqu'il suffit théoriquement d'un seul canal libre pour l'exploiter, quelle que soit l'intensité du brouillage sur les autres canaux. Une caractéristique secondaire également intéressante est qu'il dissocie les notions de canal et de liaison opérationnelle.

Toutefois on a pu constater que la sélection d'un canal exigeait par principe un certain temps, fonction de la largeur du canal pour mesurer un rapport *S*/*B*, ou du débit dans une communication numérique, puisqu'elle consiste à s'assurer qu'un certain nombre de bits sont reçus avec un nombre d'erreurs inférieur à un seuil fixé en fonction du service à assurer. De plus, cette opération doit être répétée jusqu'à ce qu'un canal libre soit trouvé, c'est-à-dire que la durée de la prise de liaison est indéterminée et d'autant plus longue que le spectre de fréquence est encombré. Cette méthode n'est donc efficace que contre des brouillages relativement stationnaires.

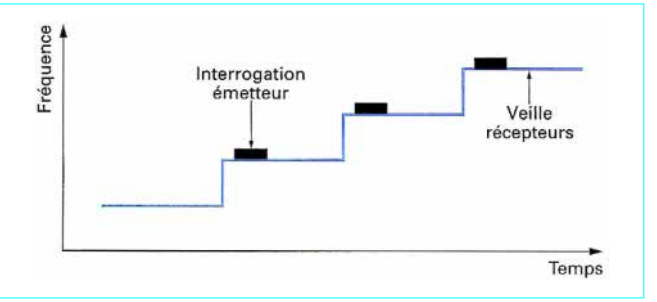

Figure 2 – RCL avec interrogation et veille synchronisées

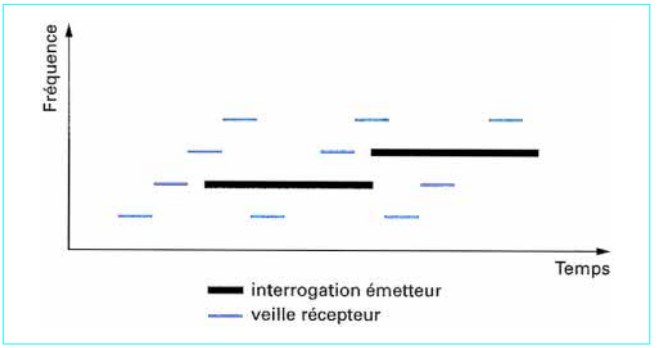

Figure 3 – RCL avec interrogation longue et veille courte

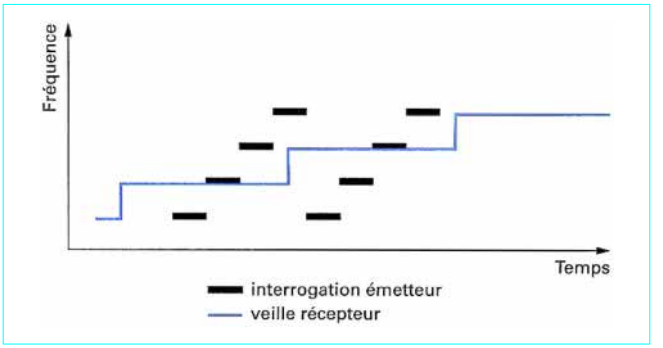

Figure 4 – RCL avec interrogation courte et veille longue

3.2 Étalement de spectre

Le terme d'étalement de spectre se réfère aux techniques qui consistent à occuper pour la transmission une bande de fréquence très supérieure à celle qu'exigerait le débit à transmettre.

Pour réaliser cet étalement de spectre, 2 classes de techniques sont utilisées. L'une consiste à surimposer à la modulation porteuse d'information une modulation plus rapide par un signal connu des correspondants, c'est-à-dire non porteur d'informations. Cette technique est appelée **étalement de spectre par séquence directe** [en anglais DS/PN (*Direct Sequence/Pseudo Noise*)]. L'autre consiste à changer continuellement au cours d'une communication la fréquence porteuse de la modulation par l'information. Cette technique est appelée **saut de fréquence** ou évasion de fréquence (EVF) [en anglais FH (*Frequency Hopping*)].

3.2.1 Saut de fréquence

La figure **5** représente une communication à sauts de fréquence. Entre 2 changements de fréquence porteuses, ou autrement dit pendant un palier de fréquence, le signal reste donc à spectre étroit. On a représenté un brouillage de barrage à bande limitée et quelques fréquences occupées par des communications classiques à fréquence fixe. On observe ainsi qu'en ambiance brouillée le récepteur va disposer d'une suite de paliers de fréquence exempts de brouillage entrecoupés de paliers fortement brouillés. Le taux d'erreurs moyen sur la liaison est ainsi égal à $0{,}5\ F_b + T_e(1 - F_b)$, si F_b représente la proportion de paliers totalement brouillés et T_e le taux d'erreurs bit sur les autres.

Ainsi, à moins que le taux de paliers brouillés soit faible ou le service très tolérant aux erreurs, une transmission à sauts de fréquence sera obligatoirement accompagnée d'un codage correcteur d'erreurs permettant de reconstituer l'information perdue sur les paliers brouillés. Si les paliers comportent suffisamment de bits il peut être intéressant de détecter les paliers brouillés grâce à des bits de contrôle de façon à demander leur retransmission ou améliorer l'efficacité du codage correcteur d'erreurs. Ainsi, par exemple, des codes de Reed-Solomon travaillant sur des effacements au lieu d'erreurs doublent leur capacité de correction. En cas de paliers courts, la perte de débit résultant de bits de contrôle est trop lourde et, au lieu de chercher à détecter les paliers brouillés, on met en place un entrelacement qui évite de pénaliser le décodage correcteur d'erreurs par la présence de paquets d'erreurs trop longs (cf. article *Théorie du codage et protection contre les erreurs* [E 170] dans le présent traité).

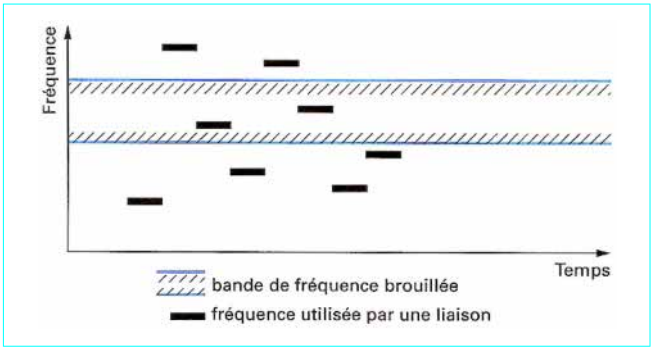

Figure 5 – Liaison à sauts de fréquence

En revanche, des codes de Reed-Solomon restent intéressants si les N bits d'un même symbole sont transmis sur le même palier, le taux d'erreurs symbole étant voisin de F_b et non de NF_b comme si les bits étaient entrelacés.

Parmi les services qui supportent un taux de paliers brouillés élevé, pourvu que leur durée soit comprise entre 1 et 10 ms environ, on peut citer la phonie. En effet, dans ce cas un palier brouillé provoque la perte d'une syllabe sans compromettre l'intelligibilité globale. Selon le niveau de qualité recherché on admet, par exemple, de 10 à 30 % de paliers brouillés pour transmettre de la phonie numérisée à 16 kbit/s par codage à adaptation syllabique.

Si on note B_c la puissance de brouillage nécessaire pour brouiller un canal et $P_{b\,max}$ le taux maximal de paliers brouillés, le minimum de puissance nécessaire à un brouilleur de barrage pour interrompre la liaison étalée sur N_c canaux est :

$$B_{total} = N_c \cdot P_{b\,max} \cdot B_c$$

Le gain de traitement est donc égal à $N_c \cdot P_{b\,max}$.

La principale difficulté de mise en œuvre de l'EVF est la synchronisation des sauts de fréquence du récepteur sur ceux de l'émetteur. Les sauts sont cadencés par des horloges régulièrement resynchronisées sur une horloge de référence par connexion physique ou par transmission de l'heure par voie radio.

Par définition cette transmission ne peut pas s'opérer dans le monde nominal de sauts de fréquence, mais à fréquence fixe. Toutefois les ingénieurs rivalisent d'ingéniosité pour protéger cette mise à l'heure contre les ECM, en réduisant sa durée, en effectuant des transmissions multiples, en enfouissant les fréquences critiques au milieu de fréquences de leurrage. Il est impossible de citer tous ces procédés car ils sont très variés et protégés par le secret militaire puisqu'ils constituent un maillon faible des systèmes.

3.2.2 Séquence directe

Le principe en est rappelé sur la figure **6**. Le signal $S_e(t)$ modulé par l'information utile à bande étroite subit une seconde modulation, généralement biphase 0-π ou MSK (*Minimum Shift Keying*) mais en tout cas sans résidu de porteuse, par une séquence pseudoaléatoire $m(t)$.

Si $S_e(t) = A(t)\cos[\omega t + \varphi(t)]$ représente de manière générale un signal modulé en phase et/ou en amplitude et si $m(t)$ symbolise une suite pseudoaléatoire prenant les valeurs ± 1, le signal étalé par une modulation biphase s'écrit :

$$S_{étalé} = S_e(t) \cdot m(t)$$

L'opération de désétalement à la réception consiste alors simplement à remultiplier le signal reçu, représenté à un facteur multiplicatif près par $S_e(t-\tau)$, τ étant le temps de propagation. Le signal fourni au démodulateur est donc :

$$\begin{aligned} S_d &= [S_e(t-\tau) + N(t) + B(t)] \cdot m(t-\tau) \\ &= [S_e(t-\tau) + N(t)] \cdot m(t-\tau) + B(t) \cdot m(t-\tau) \end{aligned}$$

où $N(t)$ représente un bruit à large bande et $B(t)$ un brouilleur à bande étroite.

Comme le montre la figure **6**, le brouilleur à bande étroite subit un étalement de spectre équivalent à celui du signal utile à l'émission, le signal utile est ramené en bande étroite tandis que le bruit à large bande est inchangé. Si b et W sont respectivement les bandes du signal utile et du signal étalé et P_b la puissance du brouilleur à bande étroite, la puissance de brouillage accompagnant le signal utile dans le démodulateur est réduite à $P_b \cdot b/W$.

Le gain d'étalement est donc égal à W/b.

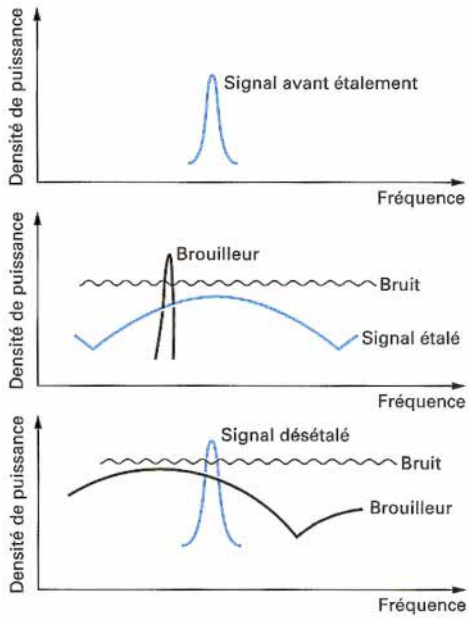

Figure 6 – Liaison à étalement de spectre par séquence directe

Le problème de l'étalement de spectre par séquence directe est que tous les brouilleurs, volontaires ou non et même les signaux utiles dans la bande *W*, additionnent leur puissance pour se retrouver dans la bande de démodulation. Contrairement au saut de fréquence qui supporte une puissance de brouillage quasiment illimitée sur un nombre limité de canaux et peut profiter de bandes d'étalement disjointes, l'étalement de spectre par séquence directe nécessite une bande de fréquence continue et la puissance globale de brouillage est limitée. D'autre part, la vitesse de modulation est souvent aux limites de la technologie. Une vitesse de 100 Mchip/s est déjà très difficile à mettre en œuvre tant pour la vitesse des circuits numériques que pour la largeur de bande des filtres, amplificateurs... Vis-à-vis d'un signal de 10 kHz de bande, le gain d'étalement est donc de 40 dB au maximum. Supposons que le démodulateur exige un rapport S/B au moins égal à 6 dB (valeur typique), la puissance de brouillage doit être au plus supérieure de 34 dB à celle du signal utile. Si le brouilleur et l'émetteur utile émettent la même puissance mais à des distances différentes du récepteur, l'atténuation de propagation variant en $1/d^2$, la distance du brouilleur au récepteur ne doit pas être inférieure à 1/50 de celle de l'émetteur utile. Sachant que l'atténuation de propagation peut varier en $1/d^4$, le rapport des distances peut être ramené à 1/7. Cette contrainte est parfois difficile à respecter surtout que la valeur de 40 dB est très favorable et que des valeurs plus typiques sont comprises entre 15 et 30 dB.

Pour lutter contre les brouilleurs très puissants mais à bande étroite et peu nombreux, il est possible d'utiliser des filtres réjecteurs dont la fréquence centrale s'adapte automatiquement à la fréquence des brouilleurs. C'est la **technique** dite **d'excision**.

3.3 Traitement d'antennes

3.3.1 Formation de faisceaux

C'est un traitement qui est effectué à l'émission. Il consiste à envoyer sur plusieurs antennes le même signal multiplié par des coefficients complexes (figure 7).

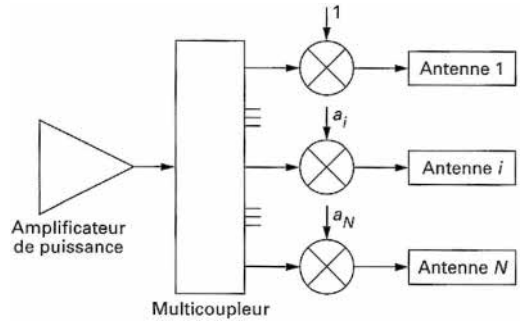

Figure 7 – Formation de faisceaux

Le champ électrique induit par une antenne à la distance D dans la direction définie par les angles de gisement θ et de site ϕ est égal au signal appliqué à l'antenne multiplié par un coefficient complexe dépendant de D, θ et ϕ.

Dans le cas d'un réseau, les paramètres de propagation (D, θ, ϕ) d'un même point de l'espace sont en principe différents pour chaque antenne. En fait, à grande distance (de 50 à 100 longueurs d'onde), les antennes étant écartées de distances de l'ordre de la longueur d'onde, les angles θ et ϕ sont pratiquement identiques. Les coefficients de propagation $C_p(i)$ diffèrent essentiellement par un déphasage dépendant des différences de distance parcourue. Ces différences de distance sont les projections des espacements entre antennes sur la direction de propagation. Prenant le champ rayonné par une antenne comme référence [$a_1 = 1$, $C_p(1) = 1$], le champ résultant peut s'écrire :

$$E_r = E_1 \left(1 + \sum_2^N a_i E_i C_p(i)\right)$$

Ainsi, si l'on dispose de N antennes, on peut s'imposer un champ résultant dans $N-1$ directions et calculer grâce à un jeu de $N-1$ équations à $N-1$ inconnues les coefficients a_i nécessaires.

Le gain maximal accessible avec N antennes est égal à $10 \lg(N)$.

Bien entendu, dans un système ECCM on cherchera à calculer les coefficients a_i pour créer un champ maximal dans la direction du ou des récepteurs utiles et un champ minimal dans la direction probable des stations ECM d'écoute ennemies.

La formation de faisceau permet ainsi de lutter à la fois contre les ECM passives en améliorant la discrétion et actives en accroissant la marge sur le bilan de liaison.

Les coefficients a_i sont physiquement réalisés par un jeu de déphaseurs et d'atténuateurs analogiques. Il existe 2 façons de leur appliquer le signal à émettre. Ou bien on utilise un seul émetteur de puissance dont la sortie est divisée pour alimenter les différentes antennes, ou bien on utilise autant d'émetteurs de puissance que d'antennes. La première méthode pose le problème du multicoupleur de puissance, la deuxième celui de l'équilibrage en phase et amplitude des différents amplificateurs.

3.3.2 Antennes à annulations

La propagation des signaux radioélectriques étant réciproque, tout ce qui a été dit sur la formation de faisceau à l'émission s'applique à la formation de faisceau à la réception. Les conditions d'emploi et la réalisation physique peuvent cependant être très différentes.

Il reste évidemment possible d'utiliser des déphaseurs analogiques au pied des antennes, mais il peut devenir plus économique, plus souple et performant d'opérer les multiplications et sommations complexes en numérique, en aval de chaînes de réception dont le problème sera encore l'équilibrage en phase et amplitude.

De plus, au lieu de positionner les coefficients a_i, comme à l'émission, *a priori* en fonction de la position connue de l'émetteur ou des émetteurs utiles et des stations ECM ennemies, de brouillage cette fois, il est possible de déterminer automatiquement les directions d'arrivée des signaux utiles et des brouilleurs. Différents algorithmes ont été mis au point pour parvenir à ce résultat. Ces algorithmes travaillent à minimiser la puissance reçue vis-à-vis des brouilleurs et à la maximiser vis-à-vis des signaux utiles. Leur convergence peut être accélérée s'il existe des créneaux temporels pendant lesquels seuls les brouilleurs sont présents (signaux utiles absents).

3.4 Impulsions

Cette technique vise à tirer profit de 3 faiblesses potentielles des ECM : le temps de réaction du détecteur, le temps de réaction du brouilleur, le temps nécessaire à l'analyse et au tri des signaux détectés.

C'est souvent ce dernier problème qui limite l'efficacité des ECM contre une impulsion. En effet, même si elle est détectée et goniométrée, son caractère bref et non récurrent rend difficile de la distinguer d'une fausse alarme et donc de décider d'engager le brouillage.

Cependant les problèmes de mise en œuvre de transmissions brèves sont également difficiles à résoudre. À moins que la quantité d'information à transmettre ne soit très faible, le débit instantané doit être accru, ce qui nécessite une bande de fréquence libre de brouillage et une bande de cohérence du canal plus larges. La puissance crête d'émission doit être augmentée proportionnellement au débit pour conserver un bilan de liaison identique, ce qui complique la conception des émetteurs, même si la puissance moyenne est inchangée.

En pratique, la recherche du fonctionnement en impulsions se limite souvent à respecter des règles opérationnelles, qui limitent au strict nécessaire la quantité d'information transmise, et de conception qui n'oublient pas un mode de fonctionnement dans lequel les procédures de synchronisation, les codages, entrelacement, modulation sont orientés vers la vitesse de transmission plus que vers la résistance au brouillage qui est normalement déjoué.

3.5 Diversité, reconfiguration, maillage

En plus des mesures qui peuvent être prises pour rendre une liaison individuellement résistance à la guerre électronique, les communications peuvent être sécurisées en multipliant les moyens de transmission entre les sources et les destinataires d'information. C'est ainsi que l'on peut mettre en parallèle, par exemple, des transmissions en HF et VHF et par satellites. La protection obtenue est double : l'ennemi est contraint à mettre en place des moyens énormes pour brouiller toutes les communications simultanément, de plus, certaines ressources peuvent être conservées en réserve de manière à garder secrètes certaines de leurs caractéristiques (à commencer par la fréquence), voire leur existence même.

Dans cette catégorie de moyens ECCM se placent également les réseaux maillés. Il s'agit alors de prévoir plusieurs cheminements possibles à travers des relais entre 2 points à mettre en communication. En effet, le brouillage peut être difficilement uniforme dans l'espace et surtout sa puissance est toujours limitée. Il n'interrompt donc une communication qu'entre 2 points fixes. En revanche, si 2 points échangeant de l'information ont la possibilité de se rapprocher jusqu'à rétablir un rapport signal/brouilleur acceptable par le récepteur, l'effet du brouillage n'est qu'une réduction de portée qui peut donc être compensée par la mise en place de relais ou un déploiement opérationnel approprié.

3.6 Chiffrement

Le chiffrement est destiné à lutter contre l'écoute, le rejeu, l'intrusion.

La technique de base consiste à effectuer l'addition modulo 2 des bits d'information $i(t)$ avec des bits aléatoires $x(t)$. Le signal chiffré est donc égal à :

$$c(t) = i(t) + x(t) \text{ modulo } 2$$

Le destinataire connaît également la suite $x(t)$ et l'additionne modulo 2 au signal chiffré qu'il reçoit. Il obtient donc :

$$m(t) = i(t) + x(t) + x(t) \text{ modulo } 2 = i(t)$$

La suite $x(t)$ pourrait être effectivement aléatoire et connue des participants préalablement à la communication. Cependant, pour une communication de longue durée, la quantité de données à mémoriser serait prohibitive. Il est évidemment impossible de répéter une suite $x(t)$ raccourcie sans compromettre la sécurité de la liaison. On a donc recours à un algorithme F de calcul qui permet de calculer $x(t)$ à partir d'un nombre restreint de données initiales (typiquement 64 à 256 octets). Ces données initiales sont généralement divisées en 2 groupes. Un groupe qui change plus rarement, c'est la clé K. Un groupe qui est initialisé au début et incrémenté pendant le cours de la communication, c'est le marquant. Par exemple, appelons N_i le nombre de bits transmis depuis le début d'une communication. Le bit de chiffrement associé au bit d'information N_i est :

$$x(N_i) = F(N_i, K)$$

L'algorithme est une fonction non linéaire de N_i et de K telle que la connaissance de N_i et d'une suite $x(N_i)$ ne permette pas de déterminer F et K.

De plus, la clé K doit être changée avant la fin de la durée du cycle de l'algorithme (limitée par $2^{\max(N_i)+K}$).

Le terme pseudoaléatoire appliqué à $x(t)$ désigne le fait que la suite n'apparaît aléatoire qu'à un observateur ne connaissant pas l'algorithme F et les paramètres N_i et K.

On emploie les termes COMSEC et TRANSEC pour désigner respectivement le chiffrement appliqué aux bits d'information et au support de transmission.

3.7 Codages correcteurs d'erreurs

Les codages correcteurs d'erreurs accompagnent obligatoirement le saut de fréquence et l'étalement de spectre par séquence directe, ou tout autre procédé, et peuvent même être employés seuls pour améliorer la résistance d'une liaison dans un environnement très perturbé.

3.8 Choix des méthodes CCME

3.8.1 Choix selon les applications opérationnelles

Réseaux tactiques sans nœuds

Les communications en conférence du champ de bataille sont aujourd'hui réalisées en sauts de fréquence et/ou recherche de canal libre, qui doivent encore coexister avec les communications à fréquence fixe. Le coût et la consommation relativement modestes de ces techniques permettent de réaliser des stations mobiles à bord de véhicules légers et même portables à dos d'homme.

Les traitements d'antennes sont pratiquement exclus à cause de la mobilité des stations qui exigeraient des algorithmes de détermination des directions d'arrivée très rapides, de la multiplicité des brouilleurs potentiels et surtout de l'encombrement des réseaux d'antennes.

L'emploi de l'étalement de spectre par séquence directe est limité par les problèmes de dynamique entre une émission parasite à proximité et le signal attendu d'un émetteur utile distant.

Un exemple de système mettant en œuvre le saut de fréquence et la recherche de canal libre est le PR4G qui équipe toutes les unités de l'armée de terre française. Tous ses concurrents des États-Unis, de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne utilisent également le saut de fréquence.

Raccordement à des centres radio

Pratiquement toutes les techniques peuvent être et sont mises en œuvre dans les centres de raccordement.

Comme ils disposent naturellement de plusieurs antennes, elles peuvent être exploitées en commun dans les traitements d'antennes.

Dans la gamme de fréquence affectée au sens centre radio vers mobiles, tous les signaux sont émis avec des puissances égales ou proches, donc compatibles avec l'étalement de spectre par séquence directe.

Le sens mobile vers centre est moins favorable à cette technique, mais la dynamique des signaux reçus par le centre peut être réduite par le contrôle de la puissance d'émission des mobiles en fonction de leur distance au centre.

Beaucoup de systèmes de téléphonie mobile des États-Unis utilisent l'étalement de spectre par séquence directe.

Le système RITA (réseau intégré de transmission automatique) de l'armée de terre française et le GSM (*Global System for Mobile*) utilisent le saut de fréquence.

Les traitements d'antennes sont encore en phase de développement, y compris dans les programmes européens ACTS (*Advanced Communications Technologies and Services*).

Liaisons par satellites transparents

C'est un domaine d'application privilégié des liaisons par étalement de spectre à séquence directe, la dynamique des différents signaux étant faible et parfaitement maîtrisable.

En France, le système SYRACUSE a mis en œuvre ce procédé depuis plus de 10 ans, de même que des systèmes américains et anglais. La protection est complétée par des traitements d'antenne à la réception par le satellite.

Liaisons par satellites non transparents

Ces satellites ne sont pas encore opérationnels, mais devraient mettre en œuvre une combinaison de sauts de fréquence, d'étalement de spectre et de traitements d'antennes.

Liaisons aéronautiques

Les systèmes de l'OTAN (SATURN) reposent sur des sauts de fréquence très rapides. En effet, les avions ennemis bénéficient d'un encombrement spectral relativement peu chargé et d'une proximité physique qui rendent plausible le brouillage sélectif avec un temps de réaction court.

Liaisons point à point

Ce type d'application est surtout une allusion à la possibilité de créer du gain en direction du correspondant grâce à des traitements d'antennes. Par ailleurs, les autres techniques de protection sont utilisables, y compris l'étalement de spectre par séquence directe dans la mesure où la directivité des aériens apporte le complément de protection indispensable contre les émetteurs proches.

3.8.2 Choix selon les bandes de fréquence

Bande HF

C'est une bande de fréquence où la largeur des canaux ne dépasse pas 3 kHz et où, surtout, la bande de cohérence est très faible (inférieure à 3 kHz très souvent) en raison des réflexions multiples sur l'ionosphère. Le débit ne dépasse pas 200 à 1 200 bit/s sans égalisation et environ 5 kbit/s avec égalisation. Le spectre est en outre très encombré (plus de 50 % d'occupation, plus de 50 % du temps).

Les seules techniques de protection utilisées aujourd'hui sont donc la recherche de canal libre et le saut de fréquence à moins de 100 sauts/s.

Bande VHF/UHF

La bande de cohérence dépassant souvent 100 kHz et la canalisation, au pas de 10 ; 12,5 ; 25 kHz et plus selon les sous-bandes, autorisent des débits de 10 à 20 kbit/s sans égalisation. En revanche, l'occupation spectrale est encore assez pénalisante pour la séquence directe.

La protection dans cette bande repose donc encore essentiellement sur le saut de fréquence, mais à des débits de 100 à 10 000 saut/s. Toutefois, à partir d'environ 1 GHz et au-dessus se rencontrent des systèmes mixtes sauts de fréquence/séquence directe.

Les traitements d'antennes ne se rencontrent guère en-dessous de 400 MHz en raison de la dimension des réseaux d'aériens nécessaires.

Bande SHF/EHF

Ces bandes sont très utilisées pour les liaisons par satellites et les faisceaux hertziens. On y rencontre la plus grande variété de moyens de protection : sauts de fréquence rapides, séquence directe, traitements d'antennes.

Bande des 60 GHz

C'est la bande privilégiée des liaisons discrètes à courte portée, l'atténuation atmosphérique dispensant *a priori* de toute autre protection.

4. Conclusions

Ce tour d'horizon des techniques CCME a montré qu'il existait un important arsenal de lutte contre la guerre électronique et que, selon les types de liaison à protéger et la menace la plus critique sur le plan opérationnel (détection ou brouillage), un ensemble de moyens appropriés pouvait être mis en œuvre.

Cependant, aujourd'hui pratiquement toutes les liaisons militaires sont numériques et ne se conçoivent plus sans chiffrements et codage correcteur d'erreurs. Les modes analogiques ne subsistent que pour la compatibilité avec les matériels plus anciens.

Le mode CCME privilégié est le saut de fréquence à des vitesses de plus en plus élevées.

L'étalement de spectre par séquence directe est plus difficile d'emploi en raison de sa dynamique limitée. Il se trouve de ce fait restreint aux cas où la discrétion est primordiale et où la dynamique est faible ou contrôlable.

La technique en pleine évolution est le traitement d'antennes dont le gain s'ajoute à celui des moyens précédents. Ses cas d'application étaient restreints par l'encombrement des réseaux d'antennes. La migration de nombreuses liaisons vers des fréquences plus élevées qui correspondent à des aériens beaucoup plus petits devrait favoriser son expansion.