

RAPPORT UIT-R F.2061

Systèmes de radiocommunication du service fixe en ondes décamétriques

(2006)

1 Introduction

Il convient de répartir les émissions des systèmes en ondes décamétriques selon deux types: adaptatif et non adaptatif. Les systèmes non adaptatifs sont subordonnés au niveau de formation de l'opérateur et à ses aptitudes professionnelles qui lui permettront d'évaluer les variables de propagation et le brouillage et ainsi, de trouver un canal fiable non occupé. Les systèmes adaptatifs automatisent ce processus. Bien que les systèmes adaptatifs comportent de nombreux avantages dont une exigence de formation moindre de l'opérateur, les systèmes non adaptatifs continueront d'être exploités dans un avenir proche. Il peut exister des risques de brouillage entre ces deux types de systèmes. Il faut savoir que les caractéristiques d'émission des systèmes adaptatifs et des systèmes non adaptatifs exigent des ensembles séparés de données types si l'on veut faire une analyse précise de la compatibilité électromagnétique dans un environnement donné.

Par ailleurs, les communications modernes utilisant la bande des ondes décamétriques présentent des caractéristiques spécifiques qui constituent une solution viable pour satisfaire bon nombre de besoins en matière d'interventions d'urgence. Les systèmes et réseaux en ondes décamétriques offrent en effet un moyen de communication très polyvalent pour de nombreux utilisateurs participant à des opérations de protection civile ou engagés dans des tâches à caractère humanitaire. Grâce à ces systèmes, il est également possible de transporter facilement des équipements fiables et peu coûteux jusque dans des zones éloignées et peu densément peuplées.

Si une catastrophe naturelle (tremblement de terre, par exemple) ou toute autre situation d'urgence provoque l'arrêt de l'exploitation normale des télécommunications, des systèmes en ondes hectométriques/décamétriques peuvent être mis en place dans un laps de temps très court afin d'établir les liaisons d'urgence nécessaires pendant la phase initiale d'alerte ou pendant la coordination des secours.

2 Systèmes non adaptatifs**2.1 Introduction**

Dans la procédure d'exploitation manuelle de type non adaptatif, l'opérateur doit régler les paramètres du système pour en optimiser les performances. Pour ce faire, il contrôle les conditions de l'ionosphère, suit les conditions de propagation variables et choisit les conditions d'exploitation (c'est-à-dire essentiellement la fréquence) qui permettront la meilleure propagation du signal.

Sur le court terme, l'environnement de propagation dans la bande des ondes décamétriques est extrêmement variable et hautement imprévisible: la propagation est essentiellement ionosphérique (réfraction des ondes radioélectriques provenant de l'ionosphère) et, dans certains cas, la propagation se fait par l'onde de sol.

2.2 Propagation

L'ionosphère et la propagation ionosphérique des ondes radioélectriques sont décrites dans le Manuel de l'UIT-R «L'ionosphère et ses effets sur la propagation des ondes radioélectriques» ainsi que dans les Recommandations UIT-R applicables de la série P (UIT-R P.368, UIT-R P.369,

UIT-R P.371, UIT-R P.434, UIT-R P.531, UIT-R P.532, UIT-R P.533, UIT-R P.534, UIT-R P.535). Des informations supplémentaires sont également disponibles dans les Manuels de l'UIT-R «Conception des systèmes de radiodiffusion en ondes décamétriques» et «Systèmes et réseaux de communication adaptatifs en fréquence fonctionnant dans les bandes des ondes hectométriques et décamétriques».

En quelques mots, l'ionosphère est une région de la haute atmosphère terrestre dont l'altitude est supérieure à environ 80 km et dont les constituants sont ionisés sous l'effet du rayonnement solaire. L'altitude et la densité de l'ionisation dépendent du rayonnement reçu, des éléments constitutifs de l'atmosphère et de leur variation en fonction de l'altitude, etc., du champ magnétique terrestre et de la circulation dans la haute atmosphère. Le rayonnement solaire reçu varie généralement avec le cycle d'activité solaire dont la période est d'environ 11 ans, comme le montre par exemple le nombre de taches à la surface du Soleil.

Le rayonnement reçu ionise une partie des gaz de la haute atmosphère et les électrons libres ainsi produits forment l'ionosphère, qui a la particularité de réfracter ou de réfléchir les ondes radioélectriques. Dans les parties inférieures de l'ionosphère, les électrons libres ont une durée de vie limitée avant de se recombiner, et la densité d'ionisation varie grosso modo avec l'angle d'élévation du Soleil. Ces parties inférieures de l'ionosphère sont appelées les régions ou couches D et E. Plus haut dans l'ionosphère, c'est-à-dire dans la région F, les électrons ont une durée de vie supérieure et la densité d'ionisation fluctue grandement en fonction des vents et du champ magnétique terrestre.

La fréquence maximale qui peut être réfléchi verticalement par une couche ionosphérique dépend de la densité d'ionisation et est appelée fréquence critique. La densité d'ionisation et, partant, la fréquence critique dépendent de l'emplacement géographique et de l'angle solaire et varient selon l'heure, le jour et la saison en fonction de l'évolution du rayonnement solaire, de l'environnement Soleil-Terre, des vents dans la haute atmosphère et du champ magnétique terrestre. Par ailleurs, les parties inférieures de l'ionosphère affaiblissent les signaux radioélectriques, alors que l'interaction avec le champ magnétique terrestre modifie leur polarisation.

La propagation terrestre peut être considérée comme la réflexion sous incidence oblique des ondes sur les couches ionosphériques, et des modes de propagation supplémentaires peuvent être associés à des réflexions multiples sur l'ionosphère et la surface de la Terre. La fréquence maximale de propagation pour chaque mode dépend de la fréquence critique et de l'angle d'élévation au niveau de la couche réfléchissante. Ainsi, le signal reçu est en général la somme de plusieurs modes de propagation, chacun étant caractérisé par une intensité, un instant d'arrivée et une polarisation différents et variables.

A l'aide de statistiques, il est possible de prévoir les variations à long terme des conditions de propagation en fonction de l'heure, du jour, de la saison et du cycle d'activité solaire. On peut pour cela utiliser les méthodes de prévision exposées dans la Recommandation UIT-R P.533 ou d'autres méthodes encore.

Ces méthodes de prévision à long terme ne peuvent pas donner une estimation précise de la meilleure fréquence à utiliser à une date et à une heure données sur un trajet radioélectrique particulier. L'usage veut que l'on choisisse une fréquence quelque peu inférieure à la fréquence maximale utilisable (MUF) pour garantir une réception satisfaisante du signal presque tous les jours du mois. Un programme de changements de fréquence tout au long de la journée est préparé pour chaque mois de façon à assurer des communications utilisables. L'opérateur qui gère le circuit se fonde sur ces programmes de fréquences, ainsi que sur son expérience et sur les conditions effectives le jour donné pour choisir la meilleure fréquence dans le groupe de fréquences limité dont il dispose, assurant ainsi une exploitation du circuit minute par minute.

Les prévisions à long terme fournissent également des informations sur les modes de propagation actifs et sur les angles d'élévation requis pour le rayonnement de l'antenne.

Le mode de propagation par onde de sol est stable et prévisible. Il est décrit dans la Recommandation UIT-R P.368 et le logiciel du site web de l'UIT-R fournit une méthode de prévision. Dans la plage des ondes décamétriques, ce mode de propagation ne présente un intérêt que sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres au-dessus de la mer et sur des distances nettement plus courtes au-dessus du sol dans la partie inférieure de cette plage de fréquences. Dans des conditions adéquates, ce mode de propagation peut toutefois s'avérer précieux.

L'exploitation des circuits est conditionnée par ces modes de propagation, par les fluctuations ionosphériques à long terme et par les évanouissements en fonction de l'intensité et de la polarisation. Cependant, il existe d'autres facteurs à court terme en grande partie imprévisibles, qui sont aussi déterminants.

Dans la partie inférieure de l'ionosphère, à environ 100 km, il peut se produire une ionisation supplémentaire difficilement prévisible qui est due à des facteurs météorologiques, à des éléments-traces et à d'autres mécanismes intervenant aux latitudes élevées et équatoriales. Cette ionisation de la couche E sporadique peut avoir une influence majeure sur la propagation des ondes radioélectriques et donner lieu à un mode de propagation supplémentaire.

D'autres phénomènes se produisant à la surface du Soleil peuvent agir fortement sur le rayonnement reçu. Il s'agit des éruptions solaires qui libèrent des rayons ultraviolets, des rayons X, des particules de grande énergie et un plasma de particules de moyenne énergie susceptibles de se propager ensuite dans le vent solaire et d'atteindre la Terre via l'environnement Soleil-Terre. Lorsque ces rayonnements arrivent dans le voisinage de la Terre, ils provoquent directement une ionisation supplémentaire. Ils entrent également en interaction avec le champ magnétique terrestre, ce qui occasionne un dépôt d'ionisation dans les régions polaires, un changement de température des gaz neutres présents dans la haute atmosphère et une modification du régime des vents et de la répartition de l'ionisation. Ces phénomènes sont appelés des tempêtes géomagnétiques et ionosphériques et peuvent avoir des répercussions importantes sur la propagation des ondes décamétriques. Or, il est impossible d'anticiper ces phénomènes longtemps à l'avance, ni même de prévoir avec précision leurs effets dans les heures qui précèdent leur survenue. Grâce à ses compétences, l'opérateur peut réussir à maintenir une certaine continuité de l'exploitation pendant une tempête, mais il est obligé de travailler de façon empirique car ces phénomènes sont mal connus. La diversité des trajets, qui permet de changer de trajet radioélectrique pour éviter les zones les plus perturbées, est une technique intéressante pour les latitudes élevées, où les effets des tempêtes sont les plus prononcés, mais pour cela il faut obtenir rapidement des informations au niveau réseau.

Les communications en ondes décamétriques nécessitent désormais des débits de données accrus et des systèmes à plus large bande. La performance de ces systèmes dépend de l'étalement des temps de propagation par trajets multiples pour les modes actifs à un instant donné, résultant de la réflexion sur les diverses couches, etc. L'ionisation fluctue également en raison des vents atmosphériques, de sorte que chaque mode est associé, par effet Doppler, à un décalage de fréquence différent. Aux latitudes équatoriales, près de l'équateur magnétique, les couches ionosphériques peuvent se désintégrer après la tombée de la nuit en zones diffuses, dans lesquelles les signaux sont diffusés avec d'importants étalements des temps de propagation et des fréquences. Aux latitudes élevées, les couches ionosphériques peuvent être désintégrées sous l'effet des tempêtes ionosphériques, ce qui là encore s'accompagne d'une diffusion des signaux avec d'importants étalements des temps de propagation et des fréquences.

Pour les systèmes qui utilisent la propagation par onde de sol et qui n'assurent pas de communications à longue distance via l'ionosphère, il convient de choisir les fréquences en tirant parti des conditions de propagation pour limiter les modes de propagation indésirables. La solution

consiste à choisir, pendant les heures diurnes, des fréquences inférieures à la fréquence minimale utilisable (LUF) des modes de propagation disponibles et, pendant la nuit, des fréquences supérieures à la fréquence maximale utilisable (MUF) sur les trajets longs pour l'antenne en cours d'utilisation. Il faut noter que la LUF dépend du cycle d'activité solaire et qu'elle augmente avec l'indice d'activité. Dans les régions tropicales, il convient d'utiliser avec précaution les fréquences supérieures à la MUF en période nocturne, car cela peut favoriser une propagation longue distance de type «changement d'accords» ou transéquatoriale. En outre, les émetteurs et récepteurs doivent là encore avoir une largeur de bande ou des capacités d'accord leur permettant de couvrir toute la gamme de fréquences dans laquelle l'utilisation adaptative est prévue.

3 Systèmes adaptatifs

3.1 Introduction

Dans un système adaptatif en ondes hectométriques/décamétriques, les fonctions d'établissement des liaisons de radiocommunication et d'échange d'informations sont assurées automatiquement (c'est-à-dire sans intervention d'un opérateur radio) et le système tient compte des variations et de la forte probabilité de brouillage inhérente à la propagation dans l'ionosphère des ondes hectométriques et décamétriques. En outre, les systèmes adaptatifs sont plus efficaces que de nombreux systèmes non adaptatifs actuellement en service: contrôle régulier de l'occupation du spectre et choix des fréquences de fonctionnement de façon à éviter de causer des brouillages à d'autres utilisateurs.

3.2 Caractéristiques d'exploitation

Les principales caractéristiques des systèmes adaptatifs à ondes hectométriques et décamétriques sont les suivantes:

- *Exigence de formation moindre de l'opérateur:* les systèmes adaptatifs établissent, maintiennent et déconnectent la liaison en ondes hectométriques ou décamétriques sans l'intervention technique d'un opérateur, ce qui limite les besoins en personnel de radiocommunication qualifié.
- *Fiabilité accrue:* le pourcentage de temps pendant lequel les systèmes adaptatifs assurent un service de haute qualité est nettement plus élevé qu'avec les systèmes classiques à fréquences fixes. Cela tient au choix adaptatif des fréquences, à la répétition automatique sur demande (ARQ) et au choix adaptatif des formes d'onde les plus appropriées.
- *Souplesse:* un système adaptatif analyse et met constamment à jour les données sur l'évaluation de la qualité de la liaison, ce qui permet de choisir à chaque instant la fréquence de trafic et la modulation qui conviennent le mieux. Ce comportement adaptatif réduit au minimum les périodes pendant lesquelles les stations ne peuvent pas communiquer et accroît les possibilités d'utiliser des stations de faible puissance à la fois dans le service fixe et dans le service mobile.

Pendant des décennies, les radiocommunications à ondes hectométriques et à ondes décamétriques ont été utilisées pour des communications longue distance. Ces types de radiocommunication présentent à la fois des caractéristiques positives qu'il est possible de valoriser et des inconvénients qu'il est possible de réduire au minimum, en recourant à des techniques d'automatisation et d'adaptativité. Le bon rapport coût efficacité de la transmission sur de longues distances fait partie des aspects positifs des communications dans la bande des ondes décamétriques. Les aspects négatifs sont les suivants: exploitation nécessitant une forte main-d'oeuvre, propagation variable, fiabilité globalement modeste et largeur de bande limitée pour les données. Si l'on veut que les communications à ondes décamétriques soient raisonnablement fiables, il faut optimiser les

conditions d'exploitation. La fiabilité des émissions radioélectriques à ondes décamétriques dépend d'un grand nombre de facteurs, tels que:

- la fréquence de fonctionnement;
 - a) le degré et la répartition de l'ionisation de l'ionosphère;
 - b) la distance entre les stations (nombre de sauts);
- la puissance de fonctionnement;
- la modulation;
- les valeurs du rapport S/R requises;
- les procédures relatives à l'en-tête de signalisation (c'est-à-dire contrôle d'erreurs, prise de contact, etc.).

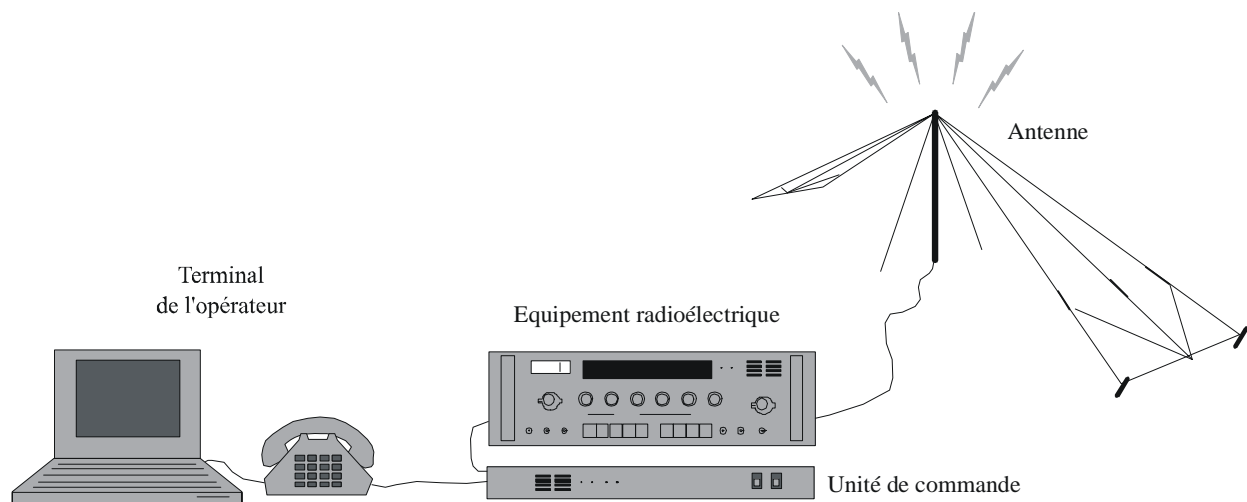
Dans le cas d'une exploitation manuelle, comme celle encore utilisée ces dernières années, l'opérateur doit régler les paramètres du système pour optimiser la qualité des radiocommunications à ondes décamétriques. Il lui faut pour ce faire contrôler les conditions de l'ionosphère, suivre la variabilité de la propagation et choisir les paramètres d'exploitation (c'est-à-dire principalement la fréquence) pour assurer la meilleure propagation possible du signal. La main-d'oeuvre, l'expérience et les qualifications requises font donc des radiocommunications à ondes hectométriques et à ondes décamétriques une cible de choix pour l'automatisation et l'adaptativité. Les techniques d'automatisation employées actuellement permettent d'alléger la tâche de l'opérateur grâce à des sous-systèmes assurant la gestion des fréquences, l'établissement de la liaison, le maintien de la liaison, etc. Elles peuvent contribuer à abaisser le niveau de compétences et de responsabilités exigé d'un opérateur ou d'un agent de communication. Avec l'automatisation, le système radioélectrique devient alors en apparence un système d'«aiguillage direct de communication sur le meilleur canal», alors qu'il s'agit d'un dispositif de communication multicanal qui effectue de nombreuses fonctions sous-jacentes.

3.2.1 Description générale

La description ci-après présente un ensemble de fonctions communes à la plupart des types de systèmes mis au point. Qualifier ces fonctions de «communes» ne signifie pas nécessairement qu'elles ont été mises en œuvre de la même manière et qu'elles permettent donc une intercommunication. Cela signifie simplement que ces systèmes présentent le même type de fonctionnalités. On trouvera une description plus détaillée dans la Recommandation UIT-R F.1110 – Systèmes radioélectriques adaptatifs pour des fréquences inférieures à 30 MHz environ.

Une station adaptative, définie ici comme pouvant fournir une liaison radioélectrique à l'opérateur, se compose des éléments suivants.

FIGURE 1
Station adaptative type



Rap 2061-01

Dans un système adaptatif, l'unité de commande a pour principales fonctions d'assurer la gestion des fréquences et l'évaluation de la qualité des liaisons, la préparation et l'établissement de liaison, ainsi que le maintien et la déconnexion de liaison.

3.2.2 Gestion des fréquences et évaluation de la qualité des liaisons

Toutes les fréquences potentiellement disponibles pour une liaison spécifique sont stockées par le système dans un groupe de fréquences. Certains systèmes adaptatifs peuvent utiliser une certaine fréquence pour l'émetteur et une autre fréquence pour le récepteur, alors que d'autres peuvent utiliser la même fréquence à l'émission et à la réception. Certains systèmes adaptatifs utilisent l'agrégation de liaisons en vertu de laquelle un sous-ensemble de fréquences disponibles est stocké dans un groupe de fréquences pour l'appel, alors que les fréquences restantes servent uniquement pour le trafic; le choix des fréquences de trafic pour une liaison est coordonné à l'aide des fréquences d'appel. En règle générale, cinq à dix fréquences sont stockées dans un groupe de fréquences, mais certains systèmes peuvent en stocker et en utiliser jusqu'à plusieurs centaines.

En l'absence de trafic, une station explore les fréquences du groupe en s'attardant sur chacune d'elles pendant une période suffisamment longue pour pouvoir détecter un appel entrant. Certains systèmes procèdent simultanément à une analyse passive du canal en mesurant le niveau de brouillage ou de bruit sur chaque fréquence.

Les informations relatives à l'évaluation de la qualité d'une liaison sont recueillies une fois la liaison déconnectée. Elles servent à choisir les fréquences de trafic appropriées entre les stations d'un réseau. S'il passe peu de trafic sur le réseau, une fonction de sondage automatique peut être activée pour évaluer la qualité des liaisons. L'une des stations émet alors à intervalles réguliers un signal de sondage spécial consécutivement sur chaque fréquence du groupe de fréquences. Toutes les autres stations du réseau qui détectent ce signal de sondage mettent à jour leur grille d'évaluation de la qualité de liaison.

3.2.3 Sondage

Le signal de sondage est transmis de manière unilatérale et unidirectionnelle à intervalles périodiques sur des canaux non occupés. Pour la mise en œuvre, un temporisateur est ajouté au contrôleur afin de déclencher périodiquement les signaux de sondage (si le canal est libre). Le sondage n'est pas une technique bilatérale interactive comme l'interrogation. Toutefois, si une connectivité est établie à partir d'une station grâce à l'écoute de son signal de sondage, cela signifie

en fait qu'il existe une forte probabilité (sans garantie) de connectivité bilatérale qui peut donc être réalisée facilement dans le récepteur. L'information relative au signal (adresse) est, au minimum, communiquée à l'opérateur et, pour les stations dotées de connectivité et avec des mémoires d'analyse de la qualité des liaisons (LQA), l'information est stockée et utilisée ultérieurement pour la connexion. Si une station a effectué des transmissions récentes sur des canaux qui doivent être sondés, il ne sera pas forcément nécessaire de les sonder de nouveau jusqu'à la fin de l'intervalle de sondage, qui redémarre après les dernières transmissions. De plus, si un réseau (ou groupe) de stations est interrogé, leurs réponses peuvent servir de signaux de sondage pour l'autre réseau (ou groupe) de stations de réception. Toutes les stations peuvent être à même d'effectuer des sondages périodiques sur des canaux libres prédéterminés. Selon les besoins du système, l'opérateur ou le contrôleur peut activer de manière sélective le mécanisme de sondage et régler l'intervalle entre les sondages.

Lorsqu'elles sont disponibles et qu'elles ne sont pas assignées ou contrôlées directement par l'opérateur ou le contrôleur, les stations affichent automatiquement et à titre temporaire les adresses de toutes les stations soumises à l'écoute, avec une alerte qui peut être sélectionnée par l'opérateur.

La structure de la sonde est semblable à celle de l'appel de base; il suffit néanmoins d'envoyer l'identification de la station d'émission. Les systèmes de sondage en mode asynchrone ALE (établissement automatique de la liaison) de deuxième génération (2G) et de troisième génération (3G), utilisent une transmission élargie pour garantir que les récepteurs à exploration s'attardent sur le canal actif au moins une fois pendant la transmission. Le sondage est facultatif dans les systèmes ALE 3G en mode synchrone et lorsque cela est nécessaire, les transmissions de sondage ALE 3G en mode synchrone durent moins d'une seconde.

3.2.4 Préparation et établissement de liaison

Une liaison est établie grâce à l'utilisation d'un téléphone ordinaire, de réseaux pour données ou via le terminal de l'opérateur. Lorsqu'une station reçoit l'ordre d'établir une liaison, elle choisit la fréquence supposée être la plus appropriée dans le groupe de fréquences. Le récepteur est alors réglé sur cette fréquence et l'unité de commande mesure le niveau d'énergie RF sur cette même fréquence. Si ce niveau dépasse un certain seuil, on suppose que la fréquence est occupée par un autre utilisateur et elle est rejetée. Le contrôleur testera une deuxième fréquence appropriée. S'il n'est pas possible de trouver une fréquence utilisable, un compte rendu d'«échec» est envoyé à l'opérateur, sinon un appel est lancé.

Lorsqu'une station appelée détecte un appel, elle répond automatiquement et signale l'appel à son opérateur. La station appelante confirme la réception de la réponse. Des messages peuvent alors être transmis ou la liaison peut être transférée aux opérateurs pour fonctionner en téléphonie.

3.2.4.1 Systèmes ALE 2G

S'il existe de multiples stations et que l'on veut choisir la meilleure fréquence dans des réseaux constitués de multiples stations de base, le système choisit en général la meilleure paire de fréquences/stations de base pour chaque liaison avec un nœud mobile. Deux méthodes sont possibles: c'est l'entité appelante ou encore l'entité appelée qui choisit.

Dans le premier cas, si le nœud mobile établit l'appel, il consulte sa base de données locale sur les mesures et classe les paires de canaux/stations. Les appels sont alors établis vers des stations précises sur différentes fréquences selon un ordre descendant jusqu'à la réussite de l'opération. Lorsque l'appel est établi à partir du côté fixe, une base de données unifiée sert à acheminer les appels vers le nœud mobile via la station de base en choisissant les meilleurs canaux vers ce nœud.

Dans le second cas, le nœud mobile dirige son appel vers le réseau dans son ensemble et les stations de base comparent la qualité du signal reçu pour déterminer la station qui doit répondre.

Dans le cas d'un fonctionnement point à point, il n'est pas possible de choisir la station à appeler et les fréquences sont classées tout simplement dans l'ordre des tentatives d'établissement de liaison.

Rien ne garantit que la fréquence la plus appropriée soit utilisée dans chaque cas. Les mesures récentes permettent de fixer l'ordre dans lequel les canaux sont testés mais le véritable canal à utiliser sera déterminé en fonction des conditions actuelles de propagation, d'occupation et de brouillage. Le système s'efforce d'établir une liaison sur la meilleure fréquence mais accepte la première liaison utilisable.

S'agissant de l'efficacité d'accès aux canaux, le système ALE 2G écoute avant d'émettre. Lorsque le réseau ALE 2G est surchargé, son débit se stabilise à un niveau de saturation au lieu de diminuer lorsque la charge augmente.

Les systèmes utilisent divers algorithmes pour classer les canaux qui serviront à établir des appels ALE. On recherche en général un bon canal même si celui-ci n'est pas nécessairement le meilleur canal.

3.2.4.2 Systèmes ALE 3G

Les systèmes ALE 3G ont été spécialement conçus pour faire face à des volumes importants de trafic et représentent une amélioration par rapport aux systèmes ALE 2G en termes d'utilisation efficace du spectre. Ces systèmes utilisent un protocole synchrone dans les intervalles entre les canaux avec des canaux d'appel et de trafic séparés. Les canaux de trafic peuvent être utilisés à des débits avoisinant 100% de la capacité, alors que l'utilisation des canaux d'appel varie en fonction de l'application mais est généralement inférieure à celle des canaux de trafic. Tout comme dans les services cellulaires et les services de radiocommunication à ressources partagées, il faut un nombre moins important de canaux d'établissement de l'appel par rapport aux canaux de trafic et l'on obtient un meilleur rendement en mode partagé que lorsque les appels et le trafic sont combinés sur les mêmes fréquences.

Pour ce qui est de la sélection du meilleur canal dans les systèmes ALE 3G, la communication est établie sur le premier canal d'appel utilisable de l'ensemble présélectionné de canaux synchrones. Le trafic est ensuite acheminé sur la fréquence que les participants négocient au cours de l'établissement de l'appel mais qui ne se trouve pas nécessairement dans la même bande que celle utilisée pour le canal d'établissement de l'appel. Pendant l'acheminement du trafic, le maintien de la liaison du système ALE 3G peut être réévalué périodiquement et il est possible de modifier la fréquence pour maintenir une qualité de fonctionnement appropriée.

3.2.4.3 Vitesse d'exploration

3.2.4.3.1 Système ALE 2G

Les vitesses d'exploration se situent généralement entre deux et dix canaux par seconde (avec des temps de pause de 100 à 500 ms par canal) et il est possible d'avoir des vitesses d'exploration plus élevées. Les récepteurs qui détectent la signalisation d'un système ALE 2G prolongent le temps de pause jusqu'à 784 ms par canal en s'efforçant d'établir une synchronisation avec le signal d'entrée.

3.2.4.3.2 Système ALE 3G

L'agrégation de liaisons est une option des systèmes ALE 3G. Lorsqu'ils ne participent pas à l'un des protocoles ALE 2G ou ALE 3G, les systèmes ALE 3G explorent en permanence les canaux d'appel assignés pour écouter les appels ALE 2G et ALE 3G. Ils abandonnent l'état d'exploration lorsqu'ils reçoivent ou établissent un appel.

L'exploration des canaux par les récepteurs ALE 3G en mode synchrone se fait à une vitesse synchronisée de 1,35 ou 5,4 s/canal. Le gestionnaire de réseau peut assigner des stations à des

groupes d'exploration, chacun d'eux procédant à une écoute sur un canal différent pendant une pause d'exploration, conformément à la formule suivante:

$$D = ((T / 5,4) + G) \text{ mod } C$$

où:

- D: nombre correspondant au canal d'exploration
- T: secondes écoulées à partir de minuit (temps réseau)
- G: nombre correspondant au groupe d'exploration
- C: nombre de canaux dans la liste d'exploration.

A noter que l'on obtient ainsi des numéros de canaux compris entre 0 et C-1.

Les systèmes ALE 3G utilisant le mode asynchrone ALE 3G explorent les canaux d'appel assignés à une vitesse d'au moins 1,5 canal/s. Pour des vitesses de balayage de 10 canaux/s, le temps de pause correspondant de 100 ms peut être porté jusqu'à 667 ms, si nécessaire, pour évaluer les signaux reçus. Si aucun préambule de salve ALE 3G n'a été détecté pendant un laps de temps de 667 ms, le système peut reprendre l'exploration. Les systèmes ALE 3G comportent des mécanismes qui maintiennent la synchronisation entre les bases des temps de toutes les stations d'un réseau. Lorsqu'un système ALE 3G fonctionne en mode synchrone, la différence entre l'instant le plus reculé et l'instant le plus récent applicable aux stations ne doit pas dépasser 50 ms. Dans les réseaux asynchrones, la gamme admissible des temps réseau est déterminée par le niveau actuel de protection d'établissement de liaison, le cas échéant.

Un moyen de synchronisation externe est prévu pour fixer le temps local à partir de sources comme un système mondial de radiorepérage (GPS) ou un récepteur GLONASS. La base de temps interne ne peut différer de plus de 1 ms par rapport à la source externe, immédiatement après l'actualisation du temps. La variation de la base de temps dépasse en général un millionième.

En l'absence de source externe de synchronisation, les systèmes ALE 3G peuvent maintenir la synchronisation en utilisant des protocoles de gestion de synchronisation pendant la transmission.

Le sondage est normalement inutile dans les systèmes ALE 3G. Dans les réseaux synchrones on peut utiliser les données des canaux de propagation pour retarder le début d'un appel et, partant, réduire l'occupation des canaux d'appel. Toutefois, en mode d'exploration synchrone, ces données n'ont que peu d'effet sur le temps de latence pour l'établissement de liaison, sauf si l'on retire les canaux non utilisables de la liste d'exploration. Lorsqu'un réseau synchrone contient de multiples stations de «serveur» assurant une diversité géographique aux stations «client» qui appellent un groupe de serveurs, les serveurs doivent procéder à un sondage pour créer une base de données sur les mesures de propagation dans les stations client, l'objectif étant de sélectionner le meilleur serveur pour un appel. Un sondage synchrone se compose d'une seule unité de données de protocole (PDU) de notification. Dans les réseaux ALE 3G en mode asynchrone, le sondage peut se révéler utile, si l'on ne peut obtenir de données sur la propagation par d'autres moyens.

3.2.5 Maintien et déconnexion de liaison

Si la liaison est sous le contrôle d'une unité de commande, par exemple quand elle achemine des messages de texte ou de données, elle peut s'adapter à l'évolution de l'état de la liaison. A supposer, par exemple, que la liaison se dégrade, un changement de fréquence pourra être déclenché automatiquement.

Tout opérateur ou unité de commande peut déconnecter la liaison. Dans ce cas, l'unité de commande envoie les commandes nécessaires pour que les stations déconnectent la liaison méthodiquement. Les stations reprennent ensuite l'exploration des fréquences du groupe de fréquences.

3.3 Caractéristiques de la forme d'onde

3.3.1 Forme d'onde ALE 2G

3.3.1.1 Introduction

La forme d'onde ALE 2G est conçue pour rester dans les limites de la bande passante audio des équipements de radiocommunication BLU normalisés. Cette forme d'onde permet la mise en place d'une capacité de modem numérique robuste et à faible débit, pour usage polyvalent, notamment l'appel sélectif et la transmission de données. Dans le présent paragraphe, qui a pour objet de définir la forme d'onde, il est question des aspects suivants: tonalités et leur signification, base de temps et vitesses et enfin, degré d'exactitude.

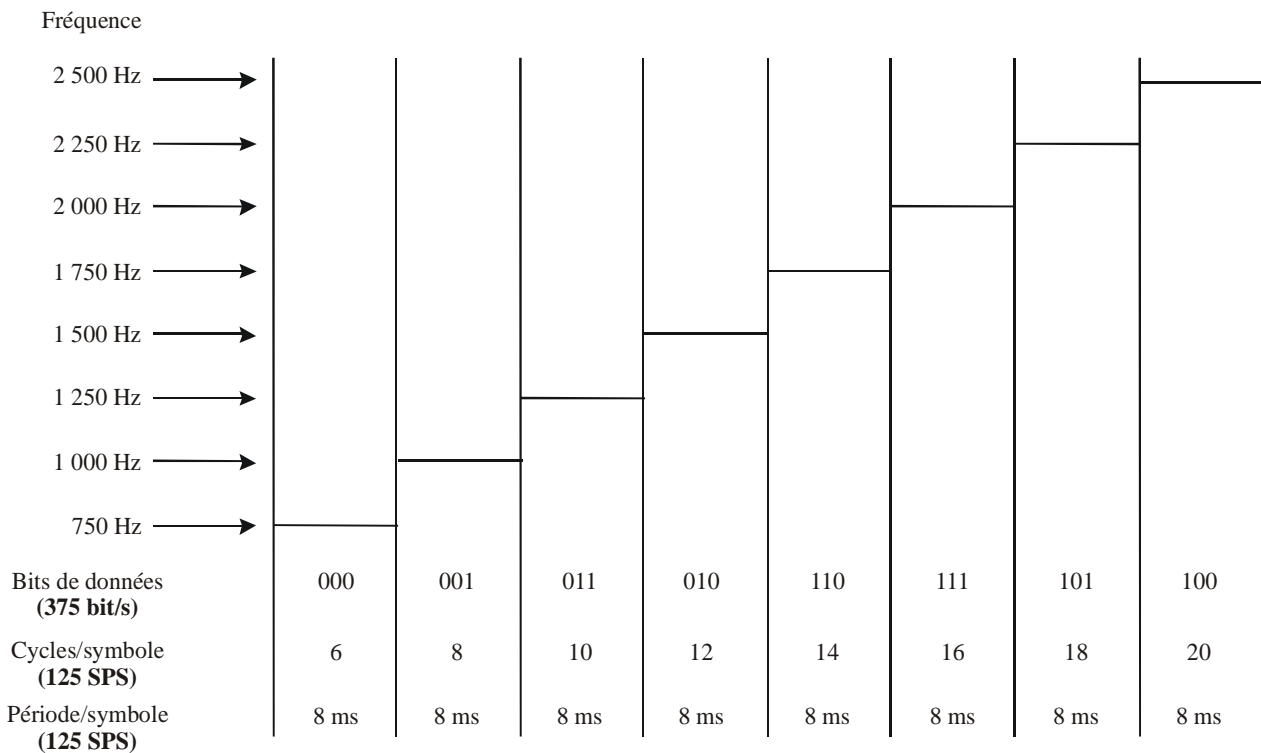
3.3.1.2 Tonalités

La forme d'onde correspond en général à une modulation par déplacement de la fréquence (MDF), avec huit tonalités orthogonales, à raison d'une tonalité (ou symbole) à la fois. Chaque tonalité représente trois bits de données, comme suit (bit de plus faible poids (LSB) à droite):

750 Hz	000
1 000 Hz	001
1 250 Hz	011
1 500 Hz	010
1 750 Hz	110
2 000 Hz	111
2 250 Hz	101
2 500 Hz	100

La Fig. 2 décrit la disposition des huit tonalités MDF dans la bande passante, leur durée en secondes et en cycles ainsi que l'assignation des bits pour utilisation dans la signalisation ALE. Il convient de noter que l'assignation des bits est organisée de telle façon que les erreurs de démodulation d'une tonalité n'entraînent qu'une seule erreur binaire.

FIGURE 2
Modulation MDF octovalente pour une forme d'onde ALE 2G



Note – Les transitions de symboles sont à phase continue.

Rap 2061-02

3.3.1.3 Mot ALE 2G

Dans les transmissions ALE 2G, l'unité fondamentale est le mot ALE. Chaque mot ALE contient 24 bits de données de protocole, comprenant généralement un préambule de 3 bits (identifiant le type de mot ALE), suivi des 21 bits de l'indicatif d'appel ou d'autres données de fonctionnement ALE. Le codage FEC qui est appliqué à chaque mot ALE pour en accroître la fiabilité, s'accompagne d'un codage Golay de 1/2 et d'une triple redondance. Le temps de transmission de chaque mot ALE codé est de 392 ms. Les transmissions ALE 2G les plus courtes contiennent trois mots et sont fréquentes dans les prises de contact ALE 2G. Les temps de transmission plus longs qui sont utilisés pour l'établissement de liaison comprennent notamment une phase d'appel d'exploration de l'ordre de 10 s. Le temps de transmission ALE 2G le plus long possible (qui est rarement utilisé) dure jusqu'à 20 mn.

3.3.1.4 Formes d'onde pour données ALE 2G

Pour transmettre des données sur des canaux à ondes décimétriques, on utilise une série de modulation de données dont les modulations à tonalité parallèle (MROF) et à tonalité série (MDP et MAQ). Les modulations à tonalité série sont actuellement les plus courantes pour un fonctionnement dans des canaux nominaux de 3 kHz.

3.3.2 Suite de formes d'onde ALE 3G

Une suite de formes d'onde par salves variables est utilisée pour intégrer les protocoles ALE 3G: ALE (ou établissement de la liaison ou encore LSU), gestion du trafic (TM), maintien automatique de la liaison (ALM), liaison de données à faible latence (LDL) et liaison de données à haut débit (HDL).

3.3.2.1 Modulation

La forme d'onde ALE 3G se caractérise par de brèves salves avec modulation par déplacement de phase. Des variations de cette forme d'onde par salves sont également utilisées pour la gestion de liaison et la transmission de données ALE 3G. Les caractéristiques de la famille de formes d'onde ALE 3G sont résumées dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 1
Exemple de caractéristiques d'une forme d'onde 3G type

Forme d'onde	Utilisée pour	Durée de la salve	Charge utile	Codage FEC	Entrelacement	Format de données	Taux de codage effectif ⁽¹⁾
BW0	Unités PDU ALE 3G	613,33 ms 1 472 symboles MDP	26 bits	Taux 1/2, $k = 7$ convolutif (pas de bits de justification)	Bloc 4×13	Fonction orthogonale de Walsh de 16 bits	1/96
BW1	Unités PDU pour gestion du trafic; unités PDU pour accusé de réception HDL	1,30667 s 3 136 symboles MDP	48 bits	Taux 1/3, $k = 9$ convolutif (pas de bits de justification)	Bloc 16×9	Fonction orthogonale de Walsh de 16 bits	1/144
BW2	Unités PDU pour données de trafic HDL	$640 + (n \times 400)$ ms $1\ 536 + (n \times 960)$ symboles MDP, $n = 3, 6, 12,$ ou 24	$n \times 1881$ bits	Taux 1/4, $k = 8$ convolutif (7 bits de justification)	Aucun	32 inconnues/ 16 connues	Variable: 1/1 à 1/4
BW3	Unités PDU pour données de trafic LDL	$373,33 + (n \times 13,33)$ ms $32n + 896$ symboles MDP, $n = 32 \times m,$ $m = 1, 2, \dots, 16$	$8n + 25$ bits	Taux 1/2, $k = 7$ convolutif (7 bits de justification) ⁽²⁾	Bloc convolutif	Fonction orthogonale de Walsh de 16 bits	Variable: 1/12 à 1/24
BW4	Unités PDU pour accusé de réception LDL	640,00 ms 1 536 symboles MDP	2 bits	Aucun	Aucun	Fonction orthogonale de Walsh de 4 bits	1/1920

⁽¹⁾ Tient compte uniquement du codage avec correction d'erreur directe (FEC) et par fonctions de Walsh mais pas des données connues ou des bits de justification d'un codeur convolutif.

⁽²⁾ Dans ce cas, le nombre de bits de justification dépasse le nombre minimal requis pour vider le codeur convolutif. Le nombre de bits codés devient donc un multiple de quatre comme l'exige le format de modulation par fonctions de Walsh.

On peut utiliser d'autres formes d'onde, dont la forme d'onde pour modem à tonalité série et la forme d'onde pour débit élevé de données, afin d'acheminer des données et la signalisation vocale numérisée sur des liaisons de circuit établies à l'aide des protocoles ALE 3G et TM.

3.3.2.2 Combinaison de codes

Les protocoles de liaison de données ALE 3G utilisent une technique adaptative de pointe appelée combinaison de codes pour augmenter la valeur de chaque salve d'énergie envoyée via le canal à ondes décimétriques. Lorsqu'une trame de données contient des erreurs qui ne peuvent être corrigées, les décisions douces relatives à chaque symbole reçu sont conservées dans le récepteur. Les retransmissions de la trame acheminent des bits de correction d'erreur supplémentaires qui sont combinés *de manière analogique* dans le récepteur avec l'énergie du signal reçu précédemment de façon à donner plus de poids, dans la fonction de combinaison de codes, aux symboles qui arrivent avec un rapport S/N supérieur. On peut ainsi procéder à une réduction mesurable du taux d'erreur des trames pour un rapport S/N donné et augmenter la possibilité pour les systèmes ALE 3G d'acheminer des données via des canaux avec un rapport S/N faible et des brouillages importants.

3.4 Techniques visant à augmenter la vitesse des données

Il est possible de recourir à la structuration en bande des canaux, fondée sur l'utilisation de plusieurs canaux de 3 kHz.

3.4.1 Fonctionnement en bandes latérales indépendantes

Il existe aujourd'hui des modems qui transmettent simultanément les données en de multiples bandes latérales indépendantes. Ces modems contiennent des modulateurs MDP/MAQ pour chaque canal audio mais utilisent un seul codeur de correction d'erreur directe dont le train de bits de sortie est réparti sur les différents canaux de transmission. Lorsque ces canaux se trouvent sur des fréquences contiguës, le rapport S/N des canaux a tendance à être semblable, bien que les erreurs de canaux ne soient pas parfaitement corrélées. Par conséquent, il est possible d'améliorer légèrement la sortie en recourant à la combinaison en diversité.

Les modems fonctionnant en bandes latérales indépendantes offrent actuellement des débits pouvant atteindre 32 kbit/s dans deux canaux de 3 kHz (nominaux) et 64 kbit/s dans quatre canaux.

3.4.2 Fonctionnement dans des canaux non contigus

Lorsqu'on ne dispose pas d'un nombre suffisant de canaux contigus pour prendre en charge les demandes de données, il est nécessaire d'utiliser des canaux non contigus. Dans ce cas, les valeurs du rapport S/N du canal peuvent être très différentes, de sorte que la distribution d'un seul train de bits codé entre tous les canaux n'est pas la solution optimale. Au lieu de cela, on produit des trains de bits codés pour chaque ensemble de canaux. Le contrôle de flux est indépendant pour chaque ensemble de canaux si bien que le débit total de données est maintenu près du maximum possible pour les fréquences utilisées.
