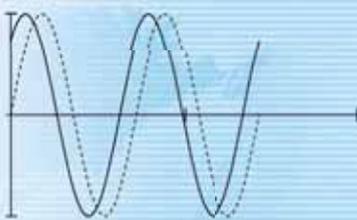
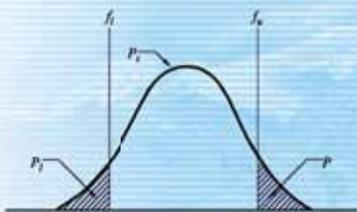


Manuel

CONTRÔLE DU SPECTRE RADIOÉLECTRIQUE — SUPPLÉMENT



SECTEUR DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UIT

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radio-communication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Pour tout renseignement sur les questions de radiocommunication

Veillez contacter:

UIT
Bureau des radiocommunications
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

Téléphone:	+41 22 730 5800
Téléfax:	+41 22 730 5785
E-mail:	brmail@itu.int
Web:	www.itu.int/itu-r

Pour commander les publications de l'UIT

Les commandes ne sont pas acceptées par téléphone. Veuillez les envoyer par télécopie ou par courrier électronique (E-mail).

UIT
Division des ventes et du marketing
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

Télécopie:	+41 22 730 5194
E-mail:	sales@itu.int

La Librairie électronique de l'UIT: www.itu.int/publications

AVANT-PROPOS

Le présent supplément du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre radioélectrique (édition de 2002) vise à fournir en temps opportun des informations mises à jour sur plusieurs thèmes avant la publication de la prochaine édition complète du Manuel. Il contient une révision complète et autonome du Chapitre 3 (Equipped de contrôle et automatisation des opérations de contrôle), de la partie 5.1 (Contrôle des émissions des engins spatiaux) du Chapitre 5 et de l'Annexe 1 (Planification du système de contrôle et appels d'offres) du Manuel.

Le présent supplément a été élaboré par le Groupe du Rapporteur établi à cette fin par la Commission d'études 1 des radiocommunications. J'adresse mes remerciements au Rapporteur, aux Rapporteurs et Corapporteurs chargés d'élaborer les chapitres en question, ainsi qu'aux collaborateurs, aux participants et à tous ceux qui ont apporté un soutien important et collaboré avec un grand dévouement aux travaux du Groupe du Rapporteur afin de mener à bonne fin l'élaboration du supplément.

Valery Timofeev

Directeur du Bureau des radiocommunications

INDEX

	<i>Page</i>
AVANT-PROPOS.....	iii
CHAPITRE 3 – EQUIPEMENT DE CONTROLE ET AUTOMATISATION DES OPERATIONS DE CONTROLE.....	1
CHAPITRE 5 – SYSTEMES DE CONTRÔLE SPÉCIFIQUES ET PROCÉDURES CORRESPONDANTES.....	87
5.1 – Contrôle des émissions des engins spatiaux.....	87
ANNEXE 1 – PLANIFICATION DU SYSTEME DE CONTROLE ET APPELS D'OFFRES..	159

CHAPITRE 3

EQUIPEMENT DE CONTRÔLE ET AUTOMATISATION DES OPÉRATIONS DE CONTRÔLE

	<i>Page</i>
3.1 Introduction.....	3
3.1.1 Généralités	3
3.1.2 Influence de l'environnement de brouillage	4
3.1.3 Interface homme-machine.....	5
3.1.3.1 Principes fondamentaux	5
3.1.3.2 Actions et effets	6
3.1.3.3 Règles d'identification et de rétroaction des organes de commandes	6
3.1.3.4 Interface informatique.....	7
3.2 Antennes de contrôle et antennes de mesure.....	7
3.2.1 Généralités	7
3.2.2 Configurations adéquates des antennes.....	8
3.2.2.1 Opérations de contrôle liées aux antennes équidirectives.....	8
3.2.2.2 Tâches de contrôle liées aux antennes directives	11
3.2.2.3 Récapitulatif concernant le choix des antennes.....	12
3.2.3 Antennes pour ondes myriamétriques, kilométriques, hectométriques et décamétriques.....	14
3.2.3.1 Antennes équidirectives pour ondes myriamétriques, kilométriques et hectométriques	14
3.2.3.2 Généralités concernant les antennes en ondes décamétriques	15
3.2.3.3 Types d'antennes pour ondes décamétriques.....	16
3.2.4 Antennes pour ondes métriques, décimétriques et centimétriques.....	20
3.2.4.1 Antennes équidirectives pour ondes métriques et décimétriques.....	20
3.2.4.2 Antennes directives pour ondes métriques et décimétriques	24
3.2.4.3 Antennes pour les fréquences au-dessus de 3 000 MHz	24
3.2.5 Choix de l'emplacement des antennes.....	27
3.2.6 Antennes pour stations de contrôle mobiles.....	31
3.2.7 Antennes pour stations transportables et portables	34
3.2.8 Lignes de transmission et systèmes de répartition	36
3.2.8.1 Lignes de transmission.....	36
3.2.8.2 Systèmes de répartition	36
3.3 Récepteurs de contrôle des émissions	41
3.3.1 Généralités	41
3.3.2 Récepteurs analogiques.....	41

	<i>Page</i>
3.3.3 Récepteurs numériques	43
3.3.4 Synthétiseurs de fréquences pour récepteurs	45
3.3.5 Spécifications types des récepteurs de contrôle	45
3.4 Radiogoniométrie	48
3.4.1 Généralités	48
3.4.2 Antennes.....	49
3.4.3 Equipement	49
3.4.4 Nombre de récepteurs	50
3.4.4.1 Systèmes à un seul canal	50
3.4.4.2 Systèmes multicanaux (un canal de référence et un ou plusieurs canaux d'échantillonnage commutés).....	51
3.4.4.3 Systèmes à N -canaux (N = nombre de canaux de réception = nombre d'antennes).....	52
3.4.5 Traitement du signal.....	53
3.5 Equipements supplémentaires et distincts.....	53
3.5.1 Appareils de mesure des fréquences	53
3.5.2 Appareils de mesure des champs	54
3.5.3 Equipement d'analyse du spectre et de mesure de la largeur de bandes	54
3.5.4 Equipement de contrôle automatique de l'occupation du spectre	55
3.5.5 Equipement d'enregistrement.....	56
3.5.5.1 Supports d'enregistrement.....	56
3.5.5.2 Equipement d'enregistrement large bande	58
3.5.6 Appareils de mesure de la modulation	59
3.5.7 Appareils pour l'identification.....	60
3.6 Automatisation du contrôle des émissions.....	61
3.6.1 Introduction.....	61
3.6.2 Automatisation des opérations de contrôle	62
3.6.2.1 Niveaux d'automatisation.....	63
3.6.2.2 Automatisation des stations.....	63
3.6.3 Réseaux de contrôle informatisé	78
3.6.3.1 Introduction.....	78
3.6.3.2 Systèmes nationaux informatisés intégrés	79
3.6.3.3 Exemple d'un système automatisé pour ondes décimétriques, métriques et décimétriques .	82
3.6.4 Equipement pour la présentation des résultats et logiciels des systèmes automatisés	84

3.1 Introduction

3.1.1 Généralités

L'équipement installé dans une station de contrôle des émissions doit être approprié aux mesures qui sont faites dans cette station. Ces mesures découlent des tâches qui ont été confiées à la station, lesquelles dépendent des objectifs du contrôle des émissions dans le pays (voir à ce propos les § 1.3 et 2.3). La nature et la qualité des mesures détermineront les types d'équipements nécessaires.

Une station de contrôle appelée à prendre part au système de contrôle international doit être en mesure d'effectuer les mesures avec une précision conforme aux normes techniques applicables aux stations de contrôle et énoncées dans les Recommandations UIT-R pertinentes. Dans la mesure où elles s'appliquent, ces Recommandations sont rappelées aux § 3.3 à 3.5. D'autres caractéristiques des équipements doivent satisfaire aux critères minima indiqués dans la section correspondante des § 3.3 à 3.5. En particulier il faut veiller à assurer la linéarité recommandée des récepteurs de mesure et des antennes actives (voir le § 3.1.2) et à tenir compte des effets de l'environnement, par exemple les effets des structures métalliques environnantes.

Une station de contrôle doit être dotée d'un équipement minimum: récepteurs, antennes et système d'antenne pour la gamme de fréquences à laquelle on s'intéresse. Une antenne directive rotative peut fournir des informations approximatives en matière de relèvements radiogoniométriques. Il faut aussi prévoir un minimum de moyens pour la mesure des fréquences et des champs; pour ce faire, on peut utiliser un récepteur d'étalonnage et une antenne.

Ce système pourrait être complété par un contrôleur d'opération ayant pour fonction d'automatiser certaines mesures fondamentales, et par un radiogoniomètre pour obtenir des relèvements en azimut. La plupart des stations de contrôle ont recours à l'automatisation pour libérer les opérateurs des mesures fastidieuses de longue durée, par exemple les mesures pour déterminer le degré d'occupation du spectre.

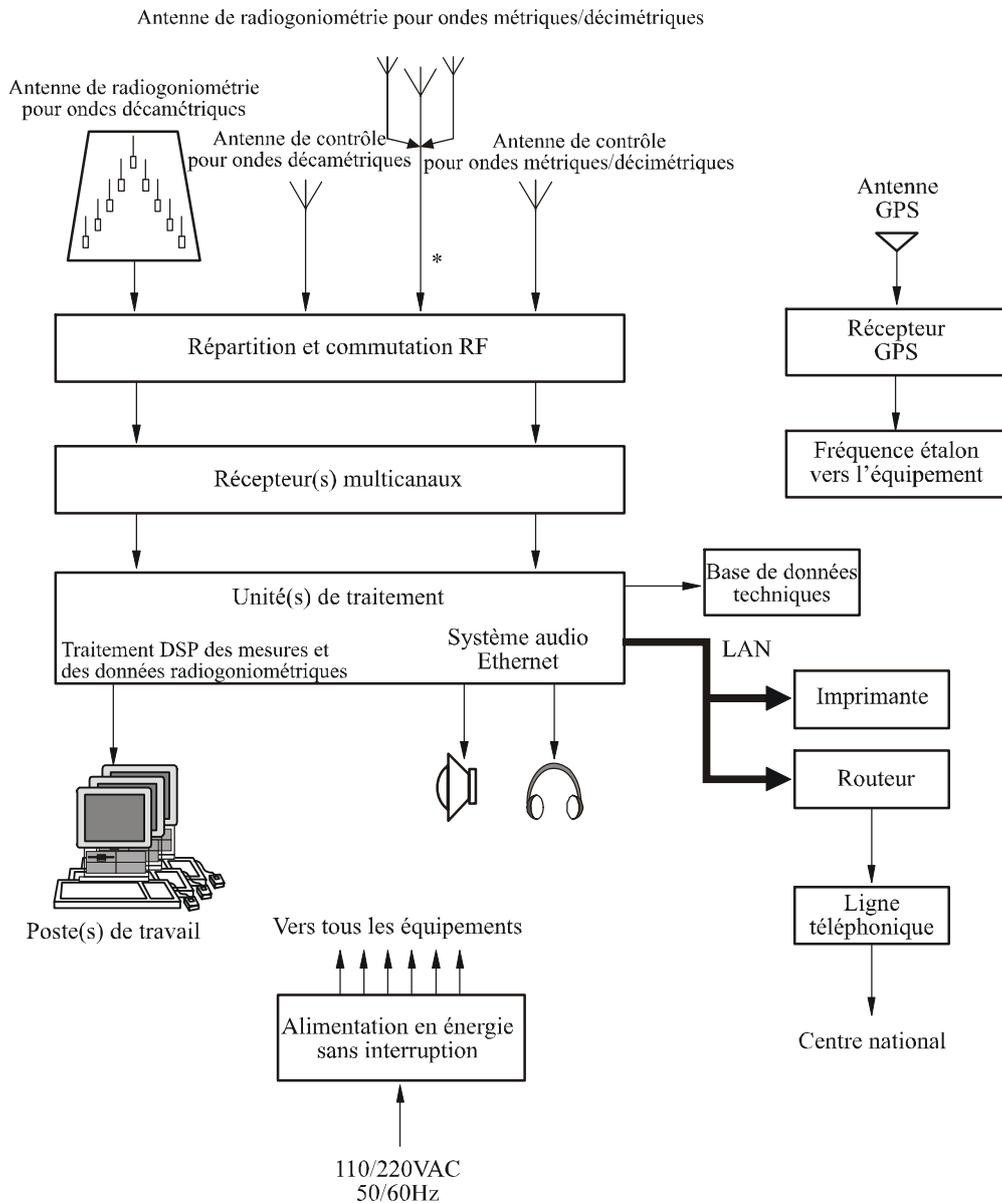
Les systèmes de contrôle les plus élaborés sont constitués par une hiérarchie de stations de contrôle nationales, régionales, décentralisées et mobiles, mises en réseau en temps réel pour permettre la commande intégrée d'une multiplicité de stations à partir d'une seule console d'exploitation. Les systèmes de ce type ont un fonctionnement orienté sur les ordinateurs et les réseaux, avec utilisation de logiciels performants qui libèrent les opérateurs des tâches fastidieuses et accélèrent considérablement les mesures. Une telle structure a aussi pour effet d'augmenter le taux d'utilisation des équipements, en automatisant les travaux de base, par exemple la recherche des émetteurs fonctionnant sans licence, à des moments où l'on n'a pas besoin des appareils pour d'autres tâches.

La Figure 3.1 est un schéma fonctionnel d'une station de contrôle intégrée moderne avec un équipement minimum. La station utilise des récepteurs couvrant la gamme 9 kHz-3 000 MHz pour effectuer des mesures de base: fréquence, champ, analyse de la modulation et radiogoniométrie. L'unité de contrôle permet d'effectuer des mesures, en fonction du temps, du degré d'occupation du spectre. Une base de données contenant des informations sur l'octroi de licence et des informations techniques ou une interface directe avec la base de données sur le système de gestion du spectre sont fournies. Cette base de données techniques contient des informations techniques sur les stations sous licence et sur leurs paramètres, ce qui permet à une station intégrée d'identifier les fréquences sur lesquelles fonctionnent les émetteurs qui ne sont pas consignés dans la base de données et qui, par conséquent, ne sont pas vraisemblablement assujettis à licence ainsi que les émetteurs qui ne sont pas exploités avec les paramètres indiqués dans la licence d'exploitation.

Il convient de noter que la précision globale des systèmes de contrôle des émissions dépend non seulement des spécifications des différents éléments tels que récepteurs et antennes. Les paramètres pertinents comme la linéarité, la sensibilité, la précision en matière d'azimut et de champ peuvent aussi dépendre du type de câble et de la longueur des câbles reliant les éléments du système ainsi que des conditions environnementales.

FIGURE 3-1

Schéma fonctionnel d'une station de contrôle intégrée



* Possibilité de connexion directe à l'unité de traitement

Spec-3-01

3.1.2 Influence de l'environnement de brouillage

Idéalement, les stations de contrôle devraient être installées sur des sites où les opérations de contrôle ne sont pas brouillées par des émetteurs radioélectriques à proximité ou par des lignes haute tension ou des liaisons hertziennes passant au-dessus du site. Par ailleurs, une fois le site choisi et surtout une fois les opérations de contrôle engagées, le site doit être protégé (planification des fréquences).

Etant donné qu'il n'est pas toujours possible de respecter ce principe, les antennes et les récepteurs des stations de contrôle du spectre sont exploités dans des conditions de brouillage en général beaucoup plus strictes que celles associées à des antennes de réception et des récepteurs de communication classiques. La fréquence de travail, l'emplacement, la hauteur de l'antenne, l'azimut, etc., d'un récepteur du service fixe sont choisis spécialement, au moment de l'attribution des fréquences, de façon à protéger correctement le

récepteur en question (en choisissant une fréquence appropriée et en prévoyant un espacement géographique entre les stations radioélectriques sur la base, notamment, des paramètres donnés de l'antenne et du récepteur) vis-à-vis des brouillages d'émetteurs d'autres liaisons radioélectriques. Tout est donc fait pour maintenir cette protection vis-à-vis de toutes les nouvelles assignations de fréquence.

Les antennes des stations de contrôle du spectre devraient par contre être installées sur des hauteurs, en des endroits dégagés pour que l'on puisse recevoir les signaux du plus grand nombre possible d'émetteurs contrôlés, sur une zone de service étendue et pour tous les azimuts. Il arrive souvent que les stations de contrôle soient situées dans des villes, à proximité de puissants émetteurs – en particulier ceux utilisés pour la radiodiffusion sonore et télévisuelle – avec de grandes antennes ou que de tels émetteurs soient installés à proximité de stations de contrôle existantes. En pareil cas, on se soucie peu ou pas du tout de respecter les critères en matière de fréquence ou d'espacement géographique qui sont un élément essentiel de la planification des fréquences pour les installations de radiocommunication. Il en découle que les antennes des stations de contrôle et les récepteurs doivent généralement opérer sous des conditions de contrôle de brouillage beaucoup plus rigoureuses que celles des installations de radiocommunication. D'où la nécessité de critères particuliers pour ce qui est de la protection intrinsèque des récepteurs et des antennes actives contre les effets des brouillages potentiels.

Il s'agit d'abord de paramètres tels que la sélectivité et la linéarité du récepteur (points d'interception du deuxième et du troisième ordre), rejet de la fréquence intermédiaire et de la fréquence image, dynamique du récepteur et linéarité (points d'interception du deuxième et du troisième ordre) des antennes actives et protection de ces antennes vis-à-vis des brouillages (seuil de dégradation). Les facteurs précités conditionnent dans une large mesure la capacité des équipements de la station de contrôle du spectre à effectuer des mesures et des relèvements radiogoniométriques dans des conditions de brouillage grave et non maîtrisé. Si, parce qu'ils sont insuffisamment protégés, en raison du non-respect des exigences indiquées aux § 3.2 et 3.3, l'antenne et/ou le récepteur sont brouillés, les mesures de certains (ou de tous les) paramètres de l'émetteur et les opérations de radiogoniométrie peuvent être entachées d'erreurs importantes; en d'autres termes les données ne seront pas fiables ou pourront tout simplement ne pas être obtenues. Par conséquent, lorsqu'on utilise des antennes ou des récepteurs ayant des caractéristiques inadéquates, les sommes importantes dépensées pour mettre en place les stations et les réseaux de contrôle du spectre risquent d'être gaspillées. Habituellement, le brouillage se traduit par des phénomènes d'intermodulation et/ou de blocage. Ils sont examinés au § 3.3.2.

Au vu de ce qui précède, il est recommandé d'éviter d'utiliser, pour les besoins du contrôle du spectre, des récepteurs normalisés qui ne respectent pas l'ensemble des spécifications énoncées aux § 3.2 et 3.3.

Les résultats des mesures et des opérations de radiogoniométrie sur le site sont aussi beaucoup influencés par la présence d'autres antennes et de structures métalliques environnantes (voir le § 3.2.5).

3.1.3 Interface homme-machine

Pour l'exécution des travaux dans les stations de contrôle des émissions, il est souvent nécessaire de faire fonctionner les équipements, notamment les récepteurs, manuellement et de recourir au mode interactif pour la manœuvre des systèmes. Par ailleurs, il faut respecter certaines directives concernant l'interface homme-machine, s'agissant du fonctionnement des systèmes automatiques de mesure et d'identification (voir le § 3.6). Des directives générales sont données dans la Publication CEI 447/4.93: Interface homme-machine (IHM) - Principes de manœuvre.

3.1.3.1 Principes fondamentaux

L'application des principes relatifs à la manœuvre, à la disposition et à la séquence d'actionnement des organes de commande doit se faire de façon non ambiguë, notamment dans les stations de contrôle où les opérateurs sont appelés à effectuer des travaux variés avec des équipements d'origine différente. Il faut tenir compte de la vitesse d'exécution requise, des aspects ergonomiques et du niveau nécessaire de prévention contre les actions non intentionnelles.

Les organes de commande doivent être identifiés sans ambiguïté, il devra être possible d'exécuter une commande uniquement par une action intentionnelle sur un organe de commande prévu à cet effet (cela limite l'utilisation des organes à deux fonctions) et la méthode de dialogue utilisée doit tenir compte des aspects ergonomiques de la tâche.

Pour éviter les erreurs des opérateurs, il est recommandé d'appliquer les mesures suivantes:

- définition de priorités dans les commandes, et
- simplification de la séquence de mise en œuvre des organes de commande (par exemple au moyen d'automatismes).

S'agissant de la disposition, les organes de commande seront groupés logiquement, en fonction de leur corrélation opérationnelle ou fonctionnelle. On pourra appliquer un ou plusieurs des principes de regroupement suivants:

- par fonction ou relation;
- par séquence d'utilisation;
- par fréquence d'utilisation;
- par priorité.

3.1.3.2 Actions et effets

Dans la mesure du possible, il convient que l'action nécessaire d'un organe de commande soit corrélée à l'effet final recherché, soit par le sens de la manœuvre de l'organe soit par les positions relatives des organes de commande. Les effets finals se divisent en effets croissants et effets décroissants.

Il existe fondamentalement deux méthodes différentes pour effectuer les actions opposées. On peut utiliser:

- un seul organe de commande avec deux sens de manœuvre (par exemple, volant et bouton de réglage d'accord);
- un groupe de deux organes de commande (par exemple boutons-poussoirs) ayant chacun un seul sens de manœuvre.

Les boutons de réglage d'accord ont fait la preuve de leur utilité, notamment pour régler la fréquence d'un récepteur ou pour commander le volume. Ils facilitent la correction de la fréquence lorsqu'on écoute le signal audio tout en réglant le volume. Les deux boutons doivent être suffisamment espacés l'un de l'autre pour que l'on puisse les manœuvrer avec les deux mains.

3.1.3.3 Règles d'identification et de rétroaction des organes de commande

Des informations ou une rétroaction visuelles, sonores ou tactiles contribuent à améliorer l'interface homme-machine. La réaction de l'organe de commande ou l'effet qu'il produit doit être immédiat. Tout retard peut être la cause d'actions erronées de l'utilisateur. Exemples:

- On peut utiliser une diode électroluminescente (DEL) pour indiquer qu'un commutateur a été mis sur MARCHE (couleur de la DEL: de préférence ambre ou verte).
- Chaque modification d'un réglage (par exemple, fréquence, largeur de bande, affaiblissement) doit être indiquée immédiatement sur un écran d'affichage.
- Les indications affichées devraient être lisibles aussi bien à la lumière solaire que dans un local obscurci.
- Dans la plupart des cas, un retour d'information (rétroaction) sonore autre que celui provenant du haut-parleur est à proscrire, car il peut engendrer des brouillages mutuels avec le signal audio.
- Il convient de monter un haut-parleur sur le panneau du récepteur. Ce haut-parleur peut être mis hors circuit par le jack téléphonique.
- Un affichage spectral panoramique facilite le réglage d'accord de la fréquence et l'orientation lorsque la réception est perturbée par des brouillages. La solution optimale est un affichage en temps réel, avec la possibilité de mémorisation en numérique pour l'obtention d'un maintien maximum. Si l'on ajoute un maintien minimum, il est facile de repérer des signaux intermittents dans des émissions continues.

- Lorsqu'on accorde la fréquence par échelons successifs, il est apparu extrêmement utile de le faire avec un bouton de réglage d'accord fonctionnant avec verrouillage magnétique; cela donne une sensation tactile à chaque échelon et s'oppose à tout dérèglement d'accord, dû par exemple à des vibrations. Par ailleurs, en associant le verrouillage magnétique à un système avec volant, on obtient un réglage d'accord rapide.
- Le traitement numérique de l'information correspondant aux échelons devrait accélérer l'opération lorsque la vitesse d'accord augmente. Un système combiné avec un jeu de clés permet le réglage d'accord quasi continu avec le bouton de réglage ainsi que le réglage d'un canal à un autre par utilisation de deux organes de commande (voir plus haut).
- Il y a avantage à avoir une réaction analogique avec réglage d'accord manuel au moyen, par exemple, d'un hypsomètre et d'un mesureur d'accord, surtout quand on ne dispose pas d'une image spectrale panoramique. Un appareil de mesure analogique permet, par exemple, d'orienter une antenne dans la direction correspondant à la réception du signal maximale.

3.1.3.4 Interface informatique

Au lieu de mettre en œuvre chaque appareil avec sa propre interface d'utilisateur différente des autres, on peut créer une telle interface au moyen d'ordinateurs, de logiciels et d'équipements asservis (voir le § 3.6). Cette interface d'usager permet l'accès aux commandes de tous les appareils selon des modalités similaires, ce qui réduirait le travail de formation professionnelle des opérateurs. Des interfaces de cette nature utilisent des menus et des boîtes de dialogue, ou des représentations graphiques telles que des icônes et des symboles. Cette technique est particulièrement puissante si l'opérateur peut l'adapter spécifiquement à des tâches à caractère pratique, ce qui donne de la souplesse dans les opérations d'adressage et les méthodes de traitement.

3.2 Antennes de contrôle et antennes de mesure

3.2.1 Généralités

La fonction des antennes de réception est de fournir à l'entrée du récepteur un signal utile aussi fort que possible, tout en affaiblissant en même temps le bruit et les signaux brouilleurs qui se superposent au signal à recevoir. Les caractéristiques particulières d'une antenne de station de contrôle des émissions seront donc déterminées dans une large mesure en fonction de chaque utilisation envisagée. Lorsqu'il s'agit de choisir une antenne de station de contrôle des émissions, il faut tenir compte des propriétés des signaux à recevoir, des paramètres à observer, des caractéristiques de l'emplacement où l'antenne sera implantée et de toute source de brouillage pouvant se présenter.

Pour obtenir les meilleurs résultats, il convient que la polarisation des antennes corresponde à celle du front d'onde du signal à recevoir et que les impédances de la ligne de transmission et du circuit d'entrée du récepteur soient adaptées de manière que le maximum d'énergie reçue soit transféré jusqu'au récepteur. Pour le contrôle général des émissions ou pour la détermination de l'occupation du spectre des fréquences radioélectriques, les antennes omnidirectionnelles se sont révélées efficaces. Pour l'observation d'une émission particulière sur une fréquence utilisée en partage avec d'autres stations, il peut être souhaitable d'employer une antenne à effet directif permettant d'affaiblir une ou plusieurs émissions brouilleuses, ou de renforcer les signaux de l'émission désirée. Une unité mobile peut aussi être utile pour séparer des fréquences utilisées en partage lorsqu'on se rapproche en conduisant de l'antenne rayonnant le signal considéré. Pour certaines catégories d'observations, par exemple, les mesures de champ, il est préférable d'utiliser une antenne dont les propriétés de réponse en fréquence soient prévisibles avec précision et restent constantes dans le temps. Une unité mobile avec des antennes étalonnées permet de mesurer le champ moyen dans une zone donnée. Etant donné qu'aucune antenne ne réunit toutes les propriétés requises pour recevoir efficacement tous les types de signaux, les stations de contrôle des émissions sont généralement et nécessairement pourvues d'un certain nombre d'antennes de types différents.

Dans ce qui suit, on donne la description de divers types d'antennes convenant à des applications spécifiques, selon la bande de fréquences des émissions à contrôler.

3.2.2 Configurations adéquates des antennes

Les propriétés des ondes électromagnétiques, notamment la longueur d'onde, la résonance, et la propagation du signal et du bruit, aident à choisir les antennes en fonction des éléments ci-après:

- la directivité et le gain, qui sont les principaux paramètres techniques des antennes. Ces dernières peuvent se diviser en deux groupes: les antennes équidirectives (à diagramme horizontal essentiellement circulaire) et les antennes directives. Les antennes équidirectives peuvent servir à effectuer des opérations de contrôle générales lorsque la position de l'émetteur n'est pas connue (taux d'occupation, balayage), alors que les antennes directives peuvent être utilisées pour des tâches spécifiques (mesures techniques) lorsqu'une plus grande sensibilité est requise;
- les bandes de fréquences myriamétriques, kilométriques, décamétriques, métriques, décimétriques ou centimétriques;
- la taille et le poids, qui peuvent être pris en compte lors du choix d'une antenne, selon le type de station de contrôle: fixe, mobile, transportable ou portable.

3.2.2.1 Opérations de contrôle liées aux antennes équidirectives

Les antennes équidirectives conviennent aux opérations de contrôle suivantes:

- recherche d'un émetteur inconnu;
- mesure de l'occupation du spectre;
- balayage de bandes ou de fréquences;
- radiogoniométrie;
- missions automatiques.

Les antennes équidirectives sont également adéquates pour les opérations ci-après:

- mesures techniques (mesures du champ, de la largeur de bande et de la fréquence), lorsque le facteur d'antenne est connu;
- contrôle d'un émetteur mobile;
- identification et analyse de services de réseaux mobiles ou cellulaires.

3.2.2.1.1 Bandes d'ondes myriamétriques/kilométriques/hectométriques/décamétriques

Pour ces bandes de fréquences, la longueur d'onde est très longue et il n'est pas pratique d'avoir des antennes dont la taille est de l'ordre d'un quart de longueur d'onde, ce qui donnerait une sensibilité d'antenne maximale. Des antennes actives pourraient être utilisées, mais elles ont une linéarité plus faible en raison de l'intermodulation.

Stations fixes:

Les limitations de taille et de poids sont plus faibles pour les équipements de contrôle fixes, qui peuvent donc recourir à des antennes à plus haute performance. Les stations de contrôle fixes devraient être installées en zone rurale, loin des villes, et lorsque des terrains adéquats sont disponibles pour recevoir toutes les antennes nécessaires.

Les stations de contrôle fixes utilisant les ondes myriamétriques/kilométriques/hectométriques/décamétriques sont très importantes pour l'analyse des signaux longue distance et des émetteurs de grande puissance, y compris le contrôle près des frontières ou dans de grands pays, la radiogoniométrie et la localisation avec une seule station (SSL, *single station location*), lorsqu'une seule station peut mesurer les angles d'élévation et d'azimut et utiliser des informations ionosphériques pour localiser un émetteur.

Les antennes équidirectives appropriées pour ces stations comprennent:

- un système d'antenne assurant une réception équidirective à polarisation verticale dans la gamme de fréquences des ondes courtes (2 à 30 MHz). Ce système peut être constitué d'une grande antenne telle qu'une antenne à large bande en cône renversé ou de plusieurs antennes unipôles coniques dont les gammes de fréquences se chevauchent, ou un système d'antenne actif;

- au moins un système actif équidirectif donnant les polarisations verticale et horizontale, ou possibilité de recevoir avec diversité de polarisation, en couvrant la gamme de fréquences 9 kHz-30 MHz, surtout si on est limité par l'espace disponible ou par des considérations d'ordre économique;
- un réseau d'antennes de radiogoniométrie à grande distance à grande ouverture dont le diamètre peut varier entre 50 et 300 m, pour fournir des relèvements de direction. Les antennes pourraient être équidirectives ou directives. D'autres stations de contrôle pourraient fournir des relèvements supplémentaires et l'emplacement de l'émetteur peut être déterminé par triangulation (gamme de fréquences allant de quelques centaines de kilohertz jusqu'à 30 MHz environ.).

Stations mobiles:

Le diamètre d'antenne est la principale limitation pour les stations de contrôle mobiles fonctionnant dans les bandes d'ondes myriamétriques/kilométriques/hectométriques/décamétriques. Ces stations permettent d'obtenir:

- des résultats de mesures lorsqu'elles se déplacent à proximité de l'émetteur. Par exemple, alors qu'une station de contrôle fixe peut ne pas être à même d'effectuer une mesure précise car le rapport S/N (signal/bruit) est trop faible, une station de contrôle mobile peut se rapprocher de l'émetteur pour accroître ce rapport;
- une ligne de relèvement (LoB, *line of bearing*) supplémentaire, en association avec une station de contrôle fixe, pour améliorer la précision de la localisation.

Le diamètre des antennes en limite considérablement le choix:

- antennes unipolaires courtes (antennes fouets);
- antennes doublets (à alimentation centrale);
- boucles magnétiques;
- antennes actives.

3.2.2.1.2 Bandes d'ondes métriques/décimétriques

Le diamètre d'antenne est moins critique dans ces bandes (sauf pour les bandes d'ondes métriques inférieures où les dimensions de l'antenne influent directement sur la sensibilité). Les antennes fixes et mobiles ont des caractéristiques analogues, la principale différence étant leur position et la possibilité de les placer au sommet d'un mât.

Les types d'antennes équidirectives utilisés dans ces bandes comprennent les antennes doublets, coniques ou biconiques. Les antennes directives peuvent aussi être utilisées, notamment pour les systèmes de radiogoniométrie.

Stations fixes:

Un des principaux avantages d'une station de contrôle fixe par rapport à une station mobile est qu'elle offre la possibilité d'élever l'antenne au sommet d'un mât fixe élevé pour accroître la visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) afin de contrôler des émetteurs plus éloignés. Si ces antennes sont utilisées dans des villes, il est important d'essayer de minimiser les trajets multiples à cause de la réflexion des bâtiments.

Les antennes équidirectives sont utiles pour le contrôle général à proximité de la station fixe et pour couvrir de grandes superficies, en particulier en ce qui concerne les tâches automatiques. Des antennes équidirectives plus grandes sont également nécessaires pour obtenir une meilleure sensibilité dans la partie inférieure des ondes métriques.

Si une station fixe est située à l'intérieur ou à proximité d'une zone métropolitaine, un système d'antenne de contrôle équidirectif polyvalent à gain moyen, à polarisation verticale, et un autre à polarisation horizontale peuvent être nécessaires dans cette gamme de fréquences. On peut améliorer légèrement la sensibilité en

utilisant un système d'antenne log-périodique rotatif à haut gain, à polarisation croisée (verticale et horizontale) pour la ou les gammes de fréquences à surveiller. Il est en général plus rentable d'augmenter la hauteur d'une antenne équidirective car la propagation en ondes métriques/décimétriques est en visibilité directe.

Stations mobiles:

Dans les bandes d'ondes métriques/décimétriques, les antennes équidirectives, coniques ou biconiques se prêtent bien à une utilisation mobile:

- Une taille et un poids peu importants, conjugués à des bonnes performances, signifient qu'il existe un bon compromis en ce qui concerne l'installation sur un véhicule.
- Les antennes permettent d'effectuer un contrôle et un raliement radiogoniométrique pendant que le véhicule se déplace.
- Le faible poids des antennes permet de les placer au sommet d'un mât érigible, ce qui améliore la zone de couverture et réduit au minimum l'influence des obstacles bas.
- Les antennes permettent de procéder à un contrôle en collaboration avec des stations fixes. Par exemple, lorsque les stations de contrôle fixes interceptent un signal à faible rapport S/N , la station mobile peut donner de meilleurs résultats en se rapprochant de l'émetteur.
- Les antennes permettent d'effectuer un contrôle lorsque des stations de contrôle fixes ne peuvent pas être déployées. Comme les ondes décimétriques exigent plutôt une propagation en visibilité directe, la couverture est souvent impossible avec les stations de contrôle fixes.

Ces stations de contrôle sont utiles pour le contrôle des réseaux cellulaires:

- la petite taille des cellules favorise l'utilisation des stations de contrôle mobiles;
- les niveaux de signal reçus n'exigent pas des antennes très sensibles.

Stations portables/transportables:

Ces stations de contrôle présentent les mêmes avantages que ceux des stations mobiles. Les antennes portables et transportables peuvent aussi être utilisées pour les tâches suivantes:

- contrôle à partir du sommet des bâtiments. Les stations de contrôle mobiles sont souvent perturbées par les trajets multiples et les stations portables peuvent apporter une solution pour en atténuer l'effet;
- contrôle à partir d'un endroit situé à la campagne, ce qui permet de placer la station de contrôle à un niveau élevé ou en un lieu éloigné qu'un véhicule mobile ne peut pas atteindre;
- mesures effectuées à partir d'un lieu déterminé ou d'un bâtiment (école, hôpital).

3.2.2.1.3 Bandes d'ondes centimétriques

Dans cette bande, certaines antennes équidirectives ont un gain médiocre, et l'affaiblissement de propagation exige l'utilisation d'antennes à gain élevé; ainsi, dans cette bande, les antennes de contrôle utilisées sont souvent de grande directivité; pour être utiles, les antennes équidirectives et fixes doivent se trouver dans le faisceau principal du signal.

Les antennes équidirectives mobiles sont généralement utilisées uniquement pour les fréquences inférieures des bandes d'ondes centimétriques (fréquences pouvant aller jusqu'à 6 GHz environ). Toutefois, elles sont souvent utilisées pour les tâches suivantes:

- interception, analyse et mesure du faisceau direct d'une liaison hertzienne, l'antenne de contrôle se trouvant près de l'émetteur;
- analyse de réseaux cellulaires.

3.2.2.2 Tâches de contrôle liées aux antennes directives

Les antennes directives sont utiles pour les tâches suivantes:

- mesures d'émetteurs connus, pour améliorer le gain en direction du signal et ensuite améliorer le contrôle du signal de faible niveau ou améliorer le rapport S/N ;
- mesures techniques, lorsque la directivité est nécessaire, pour obtenir de meilleures mesures en améliorant le rapport S/N et en réduisant les trajets multiples ou les brouillages;
- contrôle dans les bandes d'ondes centimétriques, lorsque la propagation exige des antennes à gain élevé.

Les systèmes de rotation des antennes directives doivent être très précis dans les ondes centimétriques. Il faut du temps pour tourner l'antenne afin de l'orienter dans la direction d'arrivée. Par conséquent, les antennes directives ne sont pas adaptées à un balayage rapide et à la mesure du taux d'occupation.

3.2.2.2.1 Bandes d'ondes myriamétriques/kilométriques/décamétriques

Ces bandes nécessitent des antennes directives de grande taille, qui sont utiles uniquement sur des sites fixes où de grands espaces d'installation sont disponibles.

Stations fixes:

Un des principaux objectifs des antennes directives fonctionnant dans ces bandes est d'augmenter la sensibilité ou le rapport S/N . Ces antennes sont utilisées essentiellement pour contrôler les signaux au niveau international ou national.

Les antennes directives adaptées à ces stations sont notamment les suivantes:

- Un système d'antenne assurant une réception très directive, à polarisation verticale, dans les secteurs avoisinant tous les points du compas dans la gamme de fréquences des ondes courtes. On peut aussi utiliser un réseau d'antennes log-périodique unique en étoile, avec six antennes-rideaux, ou encore un ensemble de réseaux de cadres à visée bidirectionnelle disposés en rayons.
- Un système d'antenne assurant une réception très directive, à polarisation horizontale dans tous les azimuts, dans la gamme de fréquences des ondes courtes. On peut aussi utiliser un grand rideau d'antennes log-périodique câblé rotatif, à polarisation horizontale, qui présente l'inconvénient de nécessiter jusqu'à 60 secondes ou plus pour effectuer une rotation en azimut, ou encore un réseau de six antennes-rideaux permettant d'assurer une couverture de 360° en azimut, sur six faisceaux de 60° .
- Un réseau d'antennes de radiogoniométrie à grande distance à grande ouverture dont le diamètre peut varier entre 50 et 300 m, pour fournir des relèvements de direction. Les antennes peuvent être équidirectives ou directives.

3.2.2.2.2 Bandes d'ondes métriques/décimétriques

Les antennes directives peuvent améliorer les mesures techniques en réduisant le bruit et le brouillage tout en augmentant la couverture et le rapport S/N pour les tâches générales de contrôle et de radiogoniométrie. Elles peuvent se trouver sur un système de rotation ou faire partie de réseaux fixes d'antennes directives couvrant toutes les directions, notamment des réseaux d'antennes disposés en cercle tournés vers l'extérieur. Les réseaux fixes comportant des éléments directifs ou équidirectifs conviennent pour les systèmes radiogoniométriques fonctionnant en ondes métriques/décimétriques.

Stations fixes:

Dans une station de contrôle fixe, la taille et le poids sont moins importants que dans une station mobile, et les antennes directives complètent adéquatement les antennes équidirectives.

Stations mobiles:

Les antennes directives installées sur une station de contrôle mobile présentent les mêmes avantages que ceux d'une station fixe, mis à part l'inconvénient de requérir l'installation et la maintenance d'une antenne rotative dans un environnement mobile. Une antenne équidirective installée sur un mât qui peut être surélevé pour améliorer la réception constitue une excellente alternative à une antenne rotative. Par ailleurs, une plus grande sensibilité n'est pas exigée sur un véhicule, qui peut se déplacer pour augmenter le rapport S/N et améliorer la réception.

3.2.2.3 Bandes d'ondes centimétriques

En raison de l'affaiblissement de propagation à ces fréquences, les antennes directives conviennent bien aux ondes centimétriques grâce à leur gain élevé. Leur principal inconvénient est la directivité du signal d'incidence, ce qui signifie que la mesure doit être faite sur le faisceau principal des signaux.

Stations fixes:

On utilise les stations de contrôle fixes pour des tâches particulières dans le contrôle des signaux en ondes centimétriques. Ces stations ne sont d'aucune utilité pour les liaisons hertziennes, les liaisons montantes des satellites et les réseaux cellulaires. Elles ne sont nécessaires que pour le contrôle des liaisons descendantes des satellites. De grandes antennes directives doivent être utilisées dans une station fixe pour le contrôle des signaux des liaisons descendantes des satellites. Elles peuvent avoir des paraboles de 10 mètres, qui offrent un niveau de sensibilité élevé.

Stations mobiles, transportables et portables:

Les mesures effectuées au-dessus de 3 GHz exigent souvent l'utilisation d'une station mobile pour que l'antenne puisse être déployée dans le faisceau du signal ou à proximité. Les stations de contrôle mobiles, transportables et portables permettent l'utilisation de petites antennes, dont le diamètre peut aller jusqu'à 1 mètre.

Ces antennes ont pour objectif:

- d'intercepter et d'analyser des liaisons hertziennes (trajet direct ou lobes secondaires des antennes d'émission);
- d'analyser les liaisons montantes des satellites en rapprochant la station de contrôle de l'antenne émettrice;
- de traiter des signaux radiogoniométriques au moyen de la directivité de l'antenne. Dans les ondes centimétriques, la mesure peut donner des résultats précis avec une antenne parabolique.

Deux principaux types d'antennes (antennes cornets ou antennes paraboliques) sont utilisés dans ces bandes pour les stations de contrôle mobiles:

- Les antennes cornets ont des gains moins élevés et, par conséquent, une plus faible sensibilité. Toutefois, leur directivité est moindre, ce qui peut être plus approprié pour des signaux inconnus.
- Les antennes paraboliques présentent le meilleur gain et sont donc plus sensibles. Cela étant, leur grande directivité exige que la direction de l'émetteur ou de la source du signal soit bien connue, ou qu'un balayage automatisé soit mis en œuvre pour localiser la source. En conclusion, les antennes cornets se prêtent bien au contrôle général dans les basses fréquences des ondes centimétriques ($f < 18$ GHz). Seules les antennes paraboliques sont adaptées aux fréquences supérieures où l'affaiblissement sur le trajet est important.

3.2.2.3 Récapitulatif concernant le choix des antennes

Le choix des antennes devrait permettre de mettre en œuvre de nouvelles techniques de traitement numériques comme celle des antennes intelligentes qui permettent aux antennes équidirectives de présenter des propriétés directives. Le Tableau 3-1 donne des indications générales pour le choix des antennes utilisées pour les diverses tâches de contrôle.

TABLEAU 3-1

Choix des antennes en fonction des opérations de contrôle et des bandes de fréquences

	Ondes myriamétriques/hectométriques/décamétriques					
	Applications de contrôle				Applications de radiogoniométrie	
	Antennes omnidirectives		Antennes directives			
	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables
Antennes-cadres	X	X	X ⁽¹⁾		X	X
Antennes unipolaires	X	X	X ⁽¹⁾		X	X ⁽²⁾
Antennes doublets	X	X	X ⁽¹⁾		X	X
Antennes coniques/biconiques	X					
Antennes log-périodiques par secteur	X					
Antennes log-périodiques			X			
	Ondes métriques/décimétriques					
	Applications de contrôle				Applications de radiogoniométrie	
	Antennes omnidirectives		Antennes directives			
	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables
Antennes unipolaires	X	X	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X	X
Antennes doublets	X	X	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X	X
Antennes coniques/biconiques	X	X	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X	X
Eventails			X	X	X	X
Antennes log-périodiques			X	X ⁽³⁾		
	Ondes centimétriques					
	Applications de contrôle				Applications de radiogoniométrie	
	Antennes omnidirectives		Antennes directives			
	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables	Fixes	Mobiles/ transportables
Antennes paraboliques			X	X		
Antennes cornets			X	X		
Antennes log-périodiques			X	X	X	X
Antennes obliques	X ⁽⁴⁾	X				
Antennes doublets					X	X

X⁽¹⁾: Utilisées comme réseau avec synthèse de faisceaux analogique ou numérique.

X⁽²⁾: Bandes d'ondes hectométriques/décamétriques uniquement.

X⁽³⁾: La hauteur de l'antenne est plus importante que la directivité; il est plus facile de surélever une petite antenne omnidirective qu'une antenne directive, de sorte qu'un dispositif log-périodique transportable est plus pratique qu'un dispositif mobile.

X⁽⁴⁾: Couverture limitée car il s'agit d'une station fixe.

3.2.3 Antennes pour ondes myriamétriques, kilométriques, hectométriques et décamétriques

3.2.3.1 Antennes équidirectives pour ondes myriamétriques, kilométriques et hectométriques

Dans les bandes d'ondes myriamétriques, kilométriques et hectométriques, les longueurs d'onde sont tellement grandes (par exemple, 10 000 m pour une fréquence de 30 kHz) qu'il est nécessaire d'utiliser des antennes dont la longueur est limitée à une petite fraction de la longueur d'onde. Etant donné que les émissions dans ces bandes sont essentiellement polarisées verticalement, les antennes couramment utilisées pour la réception sont des antennes verticales. Une antenne verticale simple qui représente seulement un faible pourcentage du quart de la longueur d'onde a une impédance très réactive et de valeur élevée. A moins d'utiliser un dispositif d'accord ou d'adaptation d'impédance, une antenne de ce genre est généralement d'un mauvais rendement en ce qui concerne le transfert de l'énergie jusqu'au récepteur. En pratique, on abaisse quelque peu l'impédance de l'antenne verticale par l'addition d'une charge capacitive à sa partie supérieure.

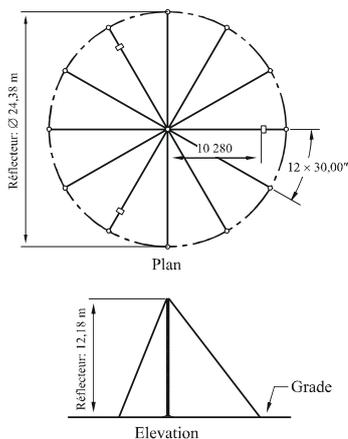
Lorsque les dimensions de l'antenne sont matériellement réduites à un faible pourcentage de la longueur d'onde, ce qui est le cas pour les ondes myriamétriques et kilométriques, une antenne active fournira, en général, un rapport S/N très supérieur à celui que l'on obtiendrait en reliant directement l'antenne au récepteur sans insertion d'un dispositif actif d'adaptation d'impédance. Pour empêcher l'intermodulation et la transmodulation dans les circuits actifs, il convient d'envisager l'utilisation des données techniques suivantes:

Le facteur d'antenne $20 \log(E/U)$ devrait être compris entre	15 dB et 25 dB
Le point d'interception du second ordre (sortie d'antenne) ne devrait pas être inférieur à	50 dBm
Le point d'interception du troisième ordre (sortie d'antenne) ne devrait pas être inférieur à	25 dBm
Le champ admissible pour une transmodulation de 10 dB ne devrait pas être inférieur à	10 V/m
La valeur efficace maximale admissible du champ brouilleur (seuil d'endommagement dans la protection contre la foudre) ne devrait pas être inférieure à	20 kV/m à 100 kHz et 200 kV/m à 10 kHz

Plusieurs constructeurs proposent des antennes actives à haute performance qui répondent à ces spécifications. Dans le cas de champs locaux élevés, qui sont fréquents dans les bandes des ondes hectométriques ainsi qu'en modulation de fréquence et dans les bandes attribuées à la télévision, même les spécifications ci-dessus applicables aux antennes actives ne conviennent pas et il faut avoir recours à une antenne passive, par exemple une antenne unipolaire de 12 m de hauteur (Fig 3-2).

FIGURE 3-2

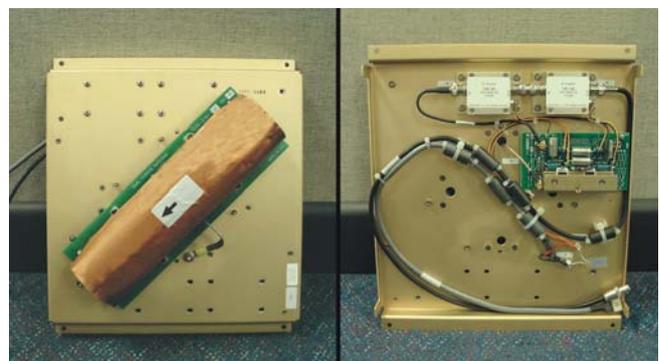
Antenne de réception passive type pour les ondes myriamétriques, kilométriques, hectométriques et décamétriques (9 kHz-30 MHz)



Spec-3-02

FIGURE 3-3

Antenne active compacte



Spec-3-03

Une antenne active compacte utile pour les besoins du contrôle du spectre ou de la radiogoniométrie est par exemple une paire de petits cadres magnétiques actifs croisés; la Figure 3-3 illustre une vue du haut et du bas de cette paire de cadres. Cette antenne peut être assez petite (boîtier d'environ 30 cm de côté et 10 cm de hauteur) assurant une couverture entre 300 kHz et 30 MHz, mais elle a la sensibilité et la précision de radiogoniométrie en azimut d'une antenne beaucoup plus grande (par exemple un réseau d'antennes fouets de 3 m de haut).

Chaque antenne-cadre se compose d'une bobine à plusieurs spires placées sur un bâtonnet de ferrite à haute perméabilité. La bobine est blindée électrostatiquement et les bornes sont raccordées à un transformateur pour que l'antenne soit moins sensible aux perturbations du champ électrique locales et pour améliorer par conséquent la précision en radiogoniométrie. Le transformateur assure une adaptation d'impédance, un rejet en mode commun et une transformation symétrique/asymétrique.

Des antennes actives couvrant les bandes des ondes myriamétriques, kilométriques, hectométriques et décimétriques (9 kHz à 30 MHz) peuvent également être construites pour la polarisation horizontale ainsi que pour la polarisation verticale, comme le montre la Figure 3-4. Elles présentent deux connecteurs de sortie, un pour la polarisation verticale et un pour la polarisation horizontale. Elles couvrent les bandes 9 kHz – 80 MHz en polarisation verticale et 600 kHz-40 MHz polarisation horizontale.

FIGURE 3-4

Antenne active pour polarisation horizontale et verticale



Spec-3-04

3.2.3.2 Généralités concernant les antennes en ondes décimétriques

Dans les bandes des ondes décimétriques, les ondes radioélectriques sont réfléchies par les couches de l'ionosphère présentes entre 100 et 300 km au-dessus de la Terre. Le rayonnement maximum de l'antenne doit être dirigé vers les couches réfléchissantes de l'ionosphère aux angles d'élévation et d'azimut voulus, de manière à assurer la couverture des emplacements souhaités.

Par exemple, si l'émetteur est situé à 350 km de la station de contrôle, le rayonnement de l'antenne sera maximal lorsque l'angle d'élévation est proche de 60° pour que la réflexion ait lieu au-delà de 300 km dans la couche ionosphérique supérieure. Dans ce cas, le trajet du rayon depuis la station de contrôle jusqu'à l'ionosphère puis vers l'émetteur forme un triangle pour ainsi dire équilatéral dont la base est une droite entre la station de contrôle et l'émetteur; ce trajet simple à une seule réflexion est appelé trajet à un seul bond. Plus la distance augmente, plus l'angle d'élévation ou l'angle d'incidence pour le trajet à un seul bond diminue; l'angle d'incidence du rayon pour un trajet à un seul bond peut descendre jusqu'à 3° environ pour les trajets les plus longs. Un angle d'incidence minimum de 3° est courant lorsqu'il y a des collines avoisinantes, d'autres obstacles et dans les cas où il y a obstruction pour de très faibles angles d'incidence. En général, le trajet jusqu'au récepteur comporte plusieurs bonds; par exemple, il y a deux bonds lorsqu'il y a réflexion par le sol à mi-distance entre l'émetteur et la station de contrôle et les signaux sont réfléchis deux fois par la couche ionosphérique. Il peut y avoir uniquement ou simultanément un trajet à un seul bond et un trajet à deux bonds. Lorsqu'il y a deux ou plus de deux trajets simultanément, il y a propagation par trajets multiples.

On n'a généralement pas besoin d'une antenne de réception très efficace car les niveaux du bruit artificiel et du bruit radioélectrique atmosphérique dans les bandes des ondes décimétriques sont modérés. Par exemple, on souhaitera peut-être utiliser une antenne à polarisation verticale pour des raisons de couverture du diagramme de rayonnement et on acceptera un affaiblissement de l'antenne de quelques dB car un tel affaiblissement n'aura, en général, pas d'effet important sur la sensibilité du système de réception.

Pour la réception, il est beaucoup plus important d'utiliser des antennes ayant un gain directif élevé afin que le signal capté par l'antenne soit plus élevé que le niveau de bruit. Dans l'hypothèse où la densité de puissance de bruit reçue est égale dans toutes les directions, ce qui est habituellement le cas, la puissance de bruit totale reçue par l'antenne est indépendante de la directivité de l'antenne. Par conséquent, le rapport signal reçu/bruit est meilleur si l'on améliore la directivité de l'antenne de réception.

Une station de contrôle donnée peut utiliser plusieurs antennes pour assurer la couverture requise plus ou moins étendue. On peut choisir d'utiliser en combinaison une antenne équidirective à courte portée avec un angle d'incidence élevé et plusieurs antennes directives de moyenne à longue portée. Il se peut aussi que la superficie de l'emplacement de la station de contrôle soit limitée et qu'il faille utiliser un petit nombre d'antennes du même type pour assurer le meilleur service, quelle que soit la portée. Plusieurs types d'antennes pour stations au sol sont présentés dans ce paragraphe; elles peuvent être utilisées pour une station de contrôle du spectre. Tout émetteur de forte puissance (>1 kW) fonctionnant en ondes décamétriques devrait être distant d'au moins 5 à 10 km de la station de contrôle pour qu'il y ait une bonne isolation entre émetteurs et récepteurs en ondes décamétriques et pour que le niveau de bruit radioélectrique sur le site de réception soit faible. Les antennes pour les ondes décamétriques devraient couvrir les fréquences comprises entre 2 et 30 MHz.

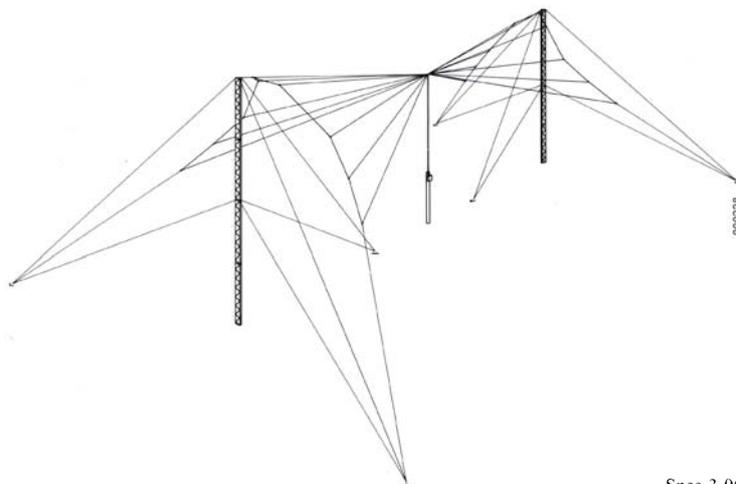
3.2.3.3 Types d'antennes pour ondes décamétriques

Antenne doublet horizontale large bande (voir Figure 3-5)

Les meilleures antennes à petite ou moyenne zone de couverture en ondes décamétriques sont des antennes à polarisation horizontale ou circulaire dont le rayonnement crête se produit au voisinage du zénith. L'onde de sol rayonnée par une antenne à polarisation verticale en ondes décamétriques est affaiblie par les pertes au sol et n'est en règle générale pas reçue au-delà d'environ 100 km sur la terre ferme et d'environ 300 km sur les océans. Toutes les antennes à polarisation verticale rayonnent peu dans la direction verticale et ne conviennent pas pour le contrôle de l'onde ionosphérique à très courte distance dans les bandes des ondes décamétriques. Une antenne doublet large bande à polarisation horizontale est un type d'antenne qui peut couvrir une zone entre environ 3 et 12 MHz avec un diagramme de rayonnement assez équidirectif. Ces antennes sont relativement petites; un exemple d'antenne doublet à polarisation horizontale est installée sur deux tours de 22 m de haut et a besoin d'une superficie au sol de 66 m sur 38 m; c'est une bonne antenne à utiliser dans le cas d'un site de réception ou d'émission limité. Le gain de ce type d'antenne est généralement de 5 dBi, voire plus. Pour des valeurs de gain notablement plus élevées, des antennes log-périodiques à polarisation horizontale peuvent être conçues afin d'assurer une couverture de faible portée avec un diagramme de rayonnement assez équidirectif pour les basses fréquences, ainsi qu'une couverture de moyenne ou de longue portée et un comportement directif pour les fréquences supérieures.

FIGURE 3-5

Antenne doublet large bande à polarisation horizontale - Zone de couverture petite à moyenne



Antenne log-périodique rotative à polarisation horizontale

En installant sur des mâts des antennes doublets log-périodiques à polarisation horizontale, il est possible d'obtenir des gains encore plus élevés (jusqu'à 12 dBi selon la hauteur des mâts). Ces antennes directives ont généralement une ouverture à mi-puissance de 60° à 70° . A l'aide d'un système de rotation, on peut les tourner pour couvrir tous les angles d'azimut (voir Figure 3-6).

FIGURE 3-6

Exemple d'antenne à polarisation horizontale équipée d'un système de rotation pour le contrôle des bandes 2-30 MHz



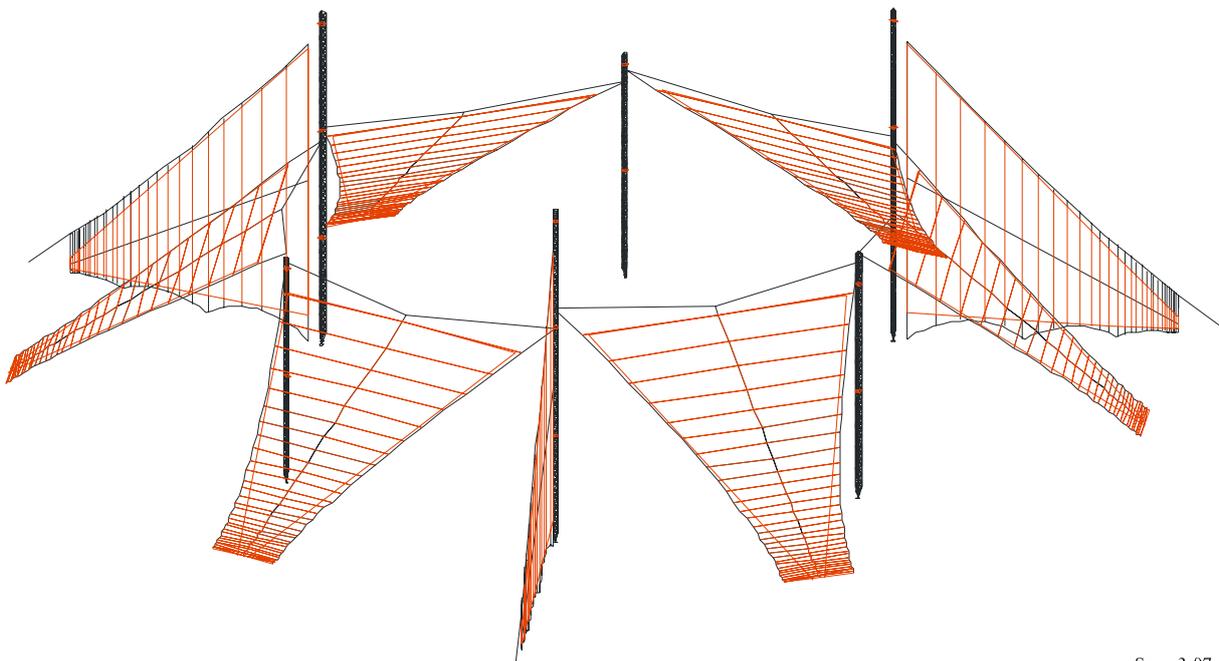
Spec-3-06

Réseau d'antennes log-périodique en étoile

Un réseau d'antennes log-périodique en étoile peut fournir des faisceaux directs à polarisation verticale ou horizontale, ou les deux. Un réseau à polarisation verticale peut être composé de six antennes-rideaux ayant chacune une ouverture à mi-puissance d'environ 60° et espacées de 60° autour d'un pylône central (jusqu'à 60 m de haut). Un réseau à polarisation horizontale peut comprendre six antennes-rideaux horizontales qui partagent six pylônes, ce qui assurerait aussi une couverture azimutale de 360° sur six faisceaux de 60° . Un réseau à double polarisation est illustré à la Figure 3-7; cet exemple particulier comprend six antennes à polarisation horizontale et trois à polarisation verticale.

FIGURE 3-7

Exemple de réseau d'antennes log-périodique en étoile



Spec-3-07

Antenne log-périodique équidirective à polarisation circulaire (voir Figure 3-8)

Une antenne log-périodique à polarisation circulaire permet d'assurer une couverture équidirective sur l'ensemble de la gamme des ondes décamétriques. Elle a l'avantage de pouvoir assurer à partir d'une seule et même structure des communications courte à moyenne distance. Aux basses fréquences, l'antenne rayonne aux angles d'élévation élevés pour une couverture courte distance et aux fréquences élevées l'angle d'incidence est plus faible pour la réception sur de longues distances. Cette antenne est installée sur une tour et se compose de deux ensembles de réseaux d'antennes doublet log-périodiques orthogonaux, chaque doublet étant un V inversé à alimentation centrale raccordé aux lignes d'alimentation le long des côtés de la tour. La tour a 28 m de haut et a besoin d'une surface carrée de 94 m de côté. Le gain de l'antenne est de 5 dBi.

FIGURE 3-8
Antenne équidirective log-périodique à polarisation circulaire
(zone de couverture petite à moyenne)

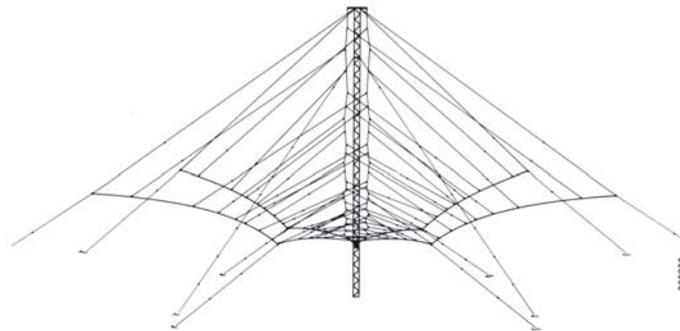
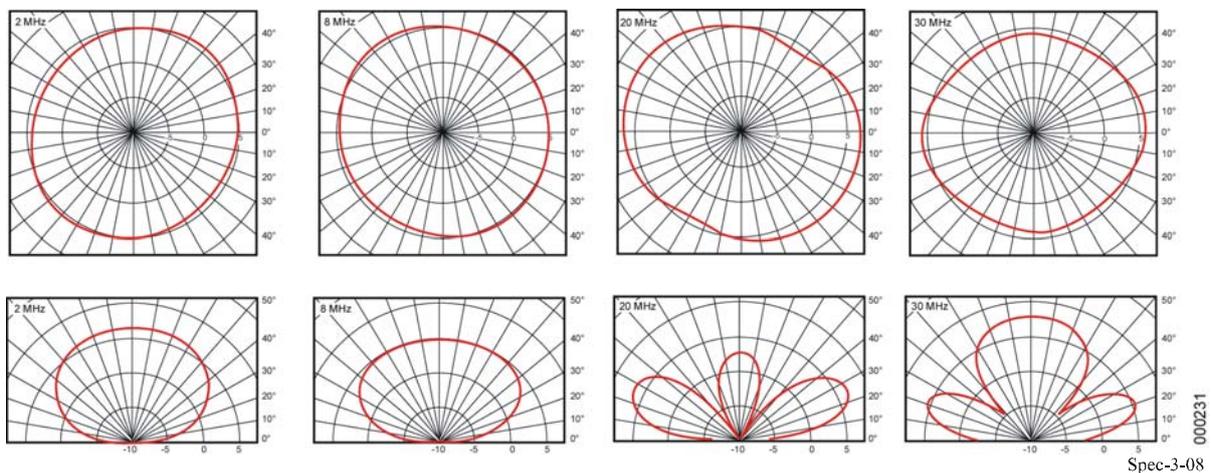


Diagramme en azimut à l'angle d'élévation du maximum du faisceau (gain en dBi)



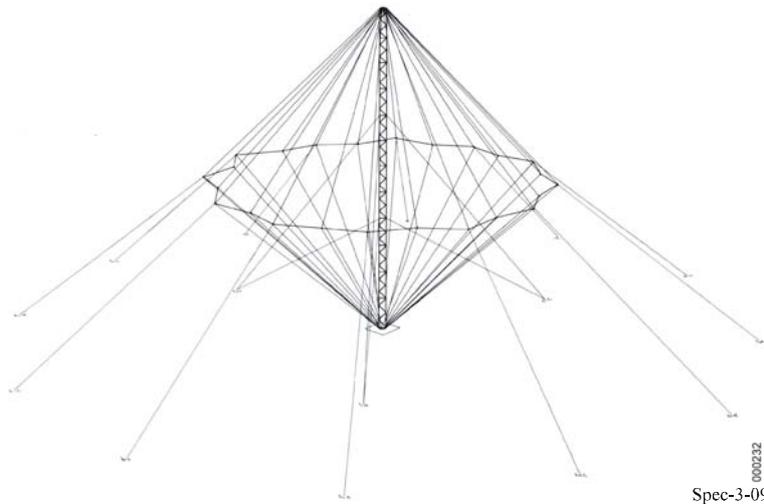
Spec-3-08

Antenne équidirective unipolaire large bande à polarisation verticale

Cette antenne est une antenne équidirective large bande qui peut être utilisée pour recevoir une onde de sol de courte portée et une onde ionosphérique de moyenne à longue portée. La Figure 3-9 illustre une antenne unipolaire large bande à polarisation verticale type. Cette antenne utilisée pour la bande de fréquences 3-30 MHz a une hauteur de 25 m et un diamètre de 52 m. Une antenne unipolaire large bande à polarisation verticale et une antenne log-périodique à polarisation circulaire ont pratiquement le même gain aux basses fréquences, pour de petits angles d'incidence; toutefois, l'antenne log-périodique à polarisation circulaire est supérieure aux fréquences plus élevées.

FIGURE 3-9

Antenne équidirective large bande à polarisation verticale - zone de couverture moyenne à grande



Réseaux d'antennes-cadres

Des antennes «électriquement minuscules», à faible efficacité, comme les antennes-cadres, peuvent être utilisées avantageusement pour de nombreuses applications de réception dans les bandes des ondes décimétriques. Le bruit dû au peu d'efficacité de l'antenne a le même effet que d'autres sources de bruit sur le rapport S/N . Lorsque le bruit extérieur est plus important que le bruit imputable au peu d'efficacité de l'antenne (et à l'électronique interne, s'il y en a), une antenne est dite «limitée par le bruit extérieur». Le bruit interne d'une telle antenne est relativement peu important étant donné que la source de bruit extérieur prédominante détermine le rapport S/N du système. Lorsque le bruit extérieur est relativement important, les petites antennes de réception fonctionnent aussi bien que des antennes grandeurs nature parfaitement efficaces.

L'antenne-cadre de base est un grand tube d'aluminium à faible inductance. Elle est alimentée en son point médian supérieur via un réseau d'adaptation passif large bande. Un avantage des antennes-cadres par rapport aux doublets est leur faible impédance d'entrée. Les performances d'une antenne-cadre sont comparativement peu affectées par des éléments conducteurs comme les arbres, les bâtiments ou la neige. De plus, étant donné que la résistance de rayonnement d'antennes électriquement minuscules est faible, les effets mutuels sont en général négligeables, ce qui permet de configurer les antennes-cadres en réseaux divers dont les performances sont adaptées aux besoins de réception particuliers.

Le diagramme en azimut d'une antenne-cadre est un diagramme en huit à l'horizon, de plus en plus équidirectif aux angles d'arrivée élevés et pour ainsi dire indépendant de l'azimut aux angles d'arrivée de plus de 50° . Les signaux provenant de plusieurs antennes-cadres peuvent être combinés en phase, ou «synthétisés par un faisceau». Le diagramme résultant est directif, avec une orientation correspondant à une des directions du réseau. Le gain du diagramme directif est maximum à un certain angle inférieur au zénith. Si on augmente le nombre d'antennes-cadres, on augmente le gain et la directivité. Ce diagramme directif est utile pour le contrôle du spectre, mais si on utilise un réseau d'antennes-cadres pour la radiogoniométrie, on n'a pas à combiner les différents éléments pour pouvoir mesurer séparément la réponse de chaque élément.

On réalise la synthèse des faisceaux en regroupant les câbles d'alimentation de chaque élément dans un réseau vers un dispositif de retard/combineur, ou unité de synthèse des faisceaux, situé au centre physique du réseau. Pour la formation de faisceaux unidirectionnels, les signaux de chaque élément sont retardés au moyen de câbles coaxiaux ou de lignes à retard, de longueurs appropriées puis additionnés dans un combineur. Pour la formation de faisceaux bidirectionnels, les signaux sont scindés, puis appliqués à deux ensembles distincts de lignes à retard, puis additionnés dans deux combineurs séparés.

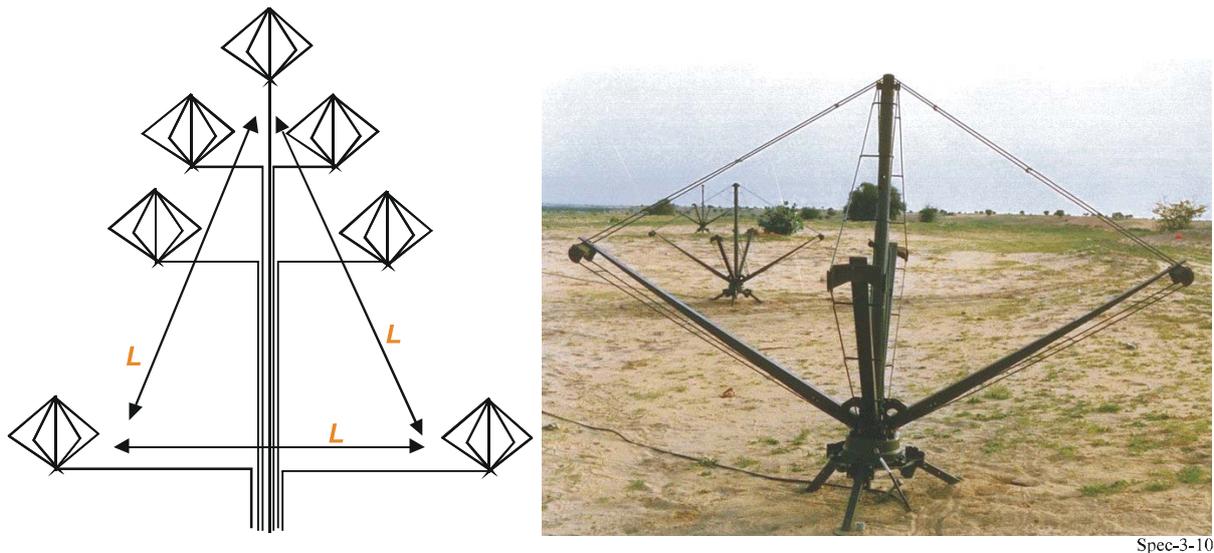
Plusieurs petits réseaux sont souvent combinés en rosettes. Une rosette classique se compose de trois bras bidirectionnels uniformément espacés en azimut, avec un centre commun. Chaque bras se compose de huit boucles. Cette antenne à trois bras et 24 boucles peut produire six faisceaux, un tous les 60° d'azimut.

Antenne-cadre croisée

Un autre type d'antenne-cadre comprend deux cadres actifs perpendiculaires, qui peuvent être de 2 m de haut. Cette antenne-cadre croisée peut être utilisée de manière autonome ou dans un réseau d'antennes, au moyen d'un dispositif de commutation et d'un système de radiogoniométrie fondé sur le principe de l'interférométrie. Le réseau comprend sept ou neuf éléments d'antenne, notamment une antenne de référence, installés sur les deux côtés d'un triangle équilatéral ou dans une configuration circulaire d'une ouverture de 200 m environ. Une diminution de l'ouverture entraîne une réduction de la précision de la radiogoniométrie. On trouvera à la Figure 3-10 un exemple de réseau d'antennes.

FIGURE 3-10

Réseau d'antennes-cadres croisés (1-30 MHz)



Spec-3-10

A la différence d'une antenne unipolaire, cette antenne peut prendre en charge toutes les polarisations. Un commutateur à l'intérieur de l'antenne permet de choisir l'un ou l'autre des deux ports de l'antenne-cadre croisée, selon la polarisation retenue. L'antenne, à laquelle est appliqué le principe de la radiogoniométrie fondée sur l'interférométrie, peut effectuer des mesures radiogoniométriques sur ondes ionosphériques et en propagation à visibilité directe; elle présente des performances supérieures à celles des antennes de type U-Adcock qui se limitent uniquement à la polarisation verticale et à l'incidence rasante, inconvénient majeur en ondes décimétriques car toutes les polarisations sont présentes dans cette gamme de fréquences. Le principe de la radiogoniométrie fondée sur l'interférométrie permet d'effectuer des mesures de localisation avec une seule station (SSL), alors qu'avec le principe de Watson Watt, l'angle d'élévation ne peut pas être mesuré et la localisation avec une seule station est donc impossible.

3.2.4 Antennes pour ondes métriques, décimétriques et centimétriques

Les conditions de propagation des ondes métriques et décimétriques limitent généralement leur réception aux distances correspondant à peu près au trajet en visibilité directe. Afin d'accroître l'étendue de la zone de couverture, les antennes à ondes métriques et décimétriques sont habituellement installées au sommet d'un pylône situé près du bâtiment de la station de contrôle. De cette manière, les pertes dans les lignes coaxiales, lesquelles peuvent être élevées en ondes métriques et décimétriques, sont réduites au minimum.

3.2.4.1 Antennes équidirectives pour ondes métriques et décimétriques

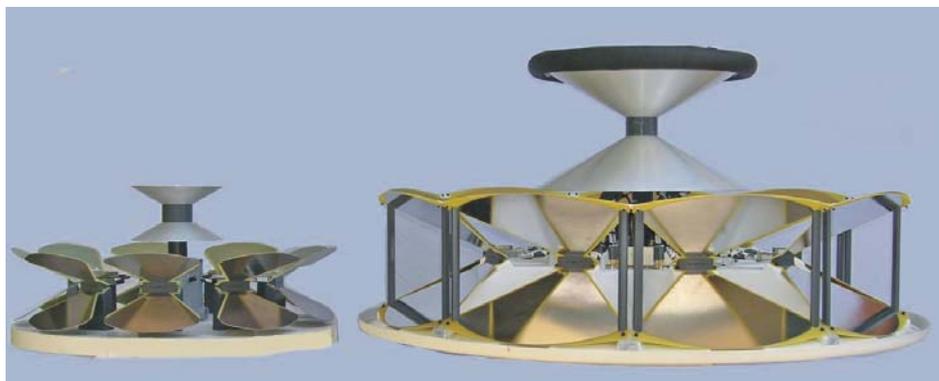
Un exemple d'antenne utilisée dans les ondes métriques et décimétriques est l'antenne biconique omnidirective large bande, illustrée à la Figure 3-11 a). Cette antenne peut être fournie avec un éventail à neuf éléments, également illustré dans la figure, pour assurer une couverture en radiogoniométrie. Deux tailles d'antenne sont montrées. Le plus petit système à gauche est suffisamment compact et léger pour être utilisé dans une configuration portable, ou peut être placé sur le toit d'une voiture de tourisme type dans ce qui ressemble à un bagage pour constituer une station de contrôle mobile invisible. Le plus grand système à

droite est disponible en version à polarisation verticale, à polarisation horizontale ou les deux (c'est le système à polarisation verticale qui est montré); la version à double polarisation a des sorties distinctes pour chaque polarisation. Les deux configurations assurent une très bonne couverture sur une gamme de fréquences de 150:1 (20 à 3 000 MHz), la plus petite étant légèrement moins sensible à des fréquences inférieures à 100 MHz.

La combinaison de l'antenne biconique et de l'éventail à neuf éléments peut être utilisée pour le contrôle et la radiogoniométrie sur l'ensemble de la gamme des ondes métriques et décimétriques pour les applications fixes et mobiles; toutefois, pour améliorer la sensibilité et la précision sur les sites fixes, on peut utiliser la plus grande antenne illustrée à la Figure 3-11 a) et un deuxième réseau plus large, composé d'une antenne-réseau doublet verticale à cinq éléments en ondes métriques (voir Figure 3-12 a)).

FIGURE 3-11

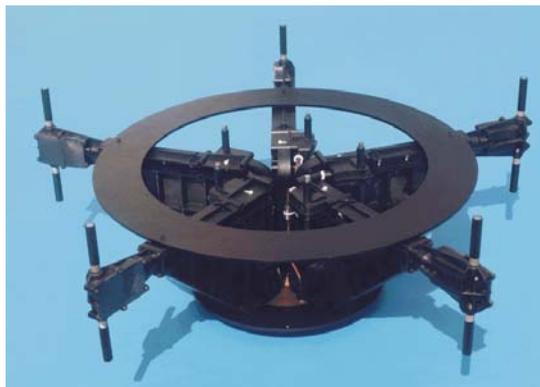
Exemples d'éléments d'antenne pour ondes métriques/décimétriques (enceintes enlevées)



($D = 0,8 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$)

($D = 1,3 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$)

a)



($D = 1,1 \text{ m} \times 0,44 \text{ m}$)

b)



(Hauteur: 0,8 m environ)

c)

Spec-3-11

Les Figure 3-11 b), 3-11 c), 3-12 b) et 3-12 c) montrent d'autres antennes utilisées pour le contrôle et la radiogoniométrie dans la gamme des ondes métriques/décimétriques. La Figure 3-12 c) illustre une antenne-réseau doublet verticale à neuf éléments en ondes métriques.

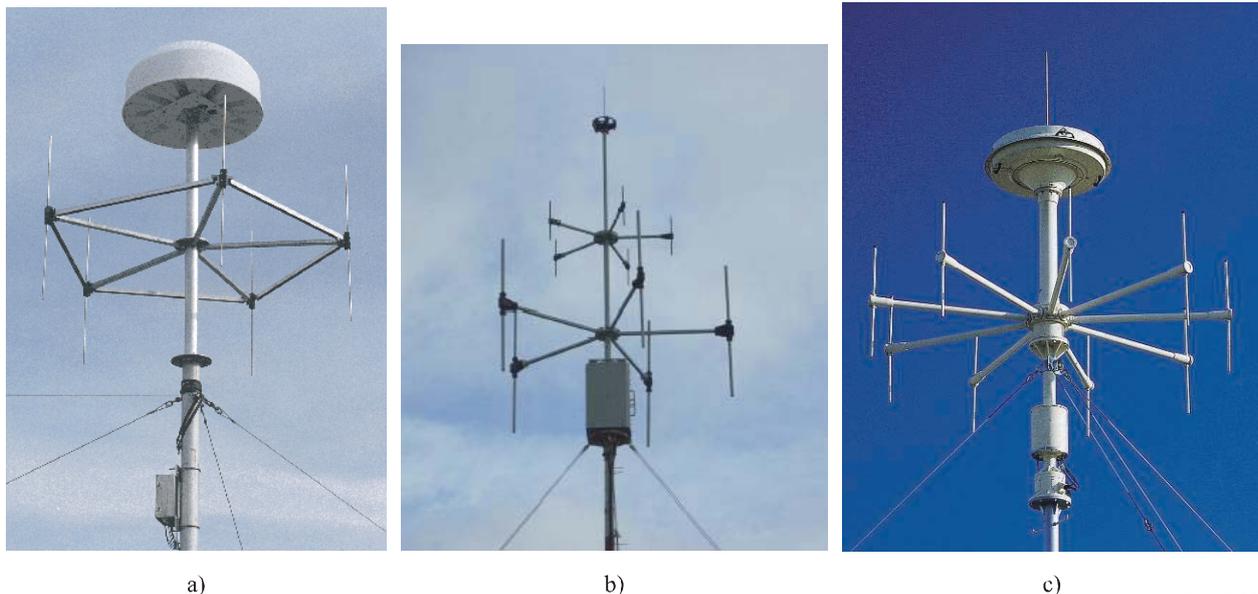
Pour obtenir des performances optimales dans le cas d'applications nécessitant une grande dynamique (bonne sensibilité et faible distorsion), l'antenne devrait utiliser des éléments passifs avec un commutateur RF et des préamplificateurs actifs. Grâce à l'utilisation d'éléments passifs, l'antenne n'aura pas de réponses parasites, les diagrammes et les caractéristiques de gain/de phase pour la précision en radiogoniométrie sont conformes et il n'y a pas de distorsion (intermodulation ou harmoniques), problème courant avec les antennes actives. Un exemple de cette antenne est donné à la Figure 3-12 b); trois ensembles indépendants d'antennes doublets sont disposés selon une structure pentagonale et permet de couvrir la gamme de fréquences 20-3 000 MHz avec une polarisation verticale.

Ce type d'antenne est conçu pour assurer la meilleure résistance aux intempéries et aux éclairs. La protection contre les éclairs est primordiale pour les antennes radiogoniométriques fonctionnant en ondes métriques/décimétriques, qui par définition devraient être installées le plus haut possible dans la zone à surveiller, ce qui les expose directement aux éclairs. L'antenne montrée à la Figure 3-12 b) comprend un boîtier métallique résistant qui contient le matériel de contrôle et de radiogoniométrie et qui protège donc ce matériel. Les tubes structuraux assurent la mise à la masse pour les charges électriques reçues par le parafoudre installé au sommet de l'antenne.

Il faudrait tenir compte du fait que les antennes actives peuvent présenter des réponses parasites car elles produisent des distorsions (intermodulation et harmoniques), une plus faible moyenne des temps entre défaillances et des performances variables avec le vieillissement, mais elles présentent aussi des avantages tels qu'une portée plus large et un gain plus élevé pour une taille plus petite et un poids plus faible. Il faudrait également examiner l'usage prévu et le lieu d'installation de sorte que les avantages et inconvénients de chaque technique soient correctement pris en compte.

FIGURE 3-12

Exemples de réseaux d'antennes pour ondes métriques et décimétriques (20-3 000 MHz)



A titre d'exemple, on pourrait examiner l'installation d'une station de contrôle de zone urbaine utilisant un large spectre. Une telle installation pourrait être souhaitable pour contrôler les émissions de faible niveau qui pourraient ne pas être détectables à partir de stations même très sensibles et de sites théoriquement parfaits situés hors du centre urbain. En raison des niveaux RF élevés observés dans les centres urbains, les performances et l'efficacité des antennes actives et des dispositifs de commutation large bande utilisés dans les stations de contrôle pourraient être fortement réduites sur ces sites, d'où une demande plus forte d'utilisation d'antennes passives, voire de filtres et de systèmes plus sélectifs en matière de bande, de manière à éviter les brouillages.

Cela étant, les antennes passives ont une sensibilité médiocre sauf si elles sont grandes et conçues pour être utilisées dans plusieurs bandes qui sont optimisées pour des gammes de fréquences relativement étroites. En

conséquence, la structure des antennes peut être complexe, difficile à installer et à entretenir. S'il y a des préamplificateurs RF à dynamique très élevée et des circuits de commutation RF après les éléments passifs, l'antenne peut couvrir une large gamme de fréquences et offrir une bonne sensibilité. Cela est possible si les éléments d'antenne passifs et l'amplificateur RF actif fonctionnent avec la même impédance; il est alors possible de construire les préamplificateurs et les commutateurs offrant une dynamique très élevée et un fonctionnement large bande.

Les circuits de commutation et de préamplification RF à dynamique élevée devraient être intégrés dans l'antenne pour éviter la nécessité d'un câblage RF adapté en phase entre l'antenne et le reste du système lorsque le système est utilisé pour la radiogoniométrie et pour assurer une amplification de ligne à proximité de la source du signal afin de compenser les affaiblissements de câble qui sinon feraient augmenter le facteur de bruit et nuiraient, par voie de conséquence, à la sensibilité. Le préamplificateur RF utilisé dans l'antenne devrait avoir des caractéristiques de fonctionnement RF bien meilleures que celles du récepteur auquel il est connecté car il doit couvrir l'ensemble des bandes d'ondes métriques et décimétriques alors que dans le cas du récepteur les filtres de présélection limitent la quantité d'énergie du signal RF que les circuits d'entrée RF du récepteur doivent traiter.

On trouvera à la Figure 3-13 un autre exemple d'antenne utile, à savoir une antenne doublet large bande coaxiale pour ondes métriques/décimétriques qui présente des performances optimales dans la gamme de fréquences 80-2 000 MHz. L'antenne à polarisation verticale fonctionne en mode coaxial dans les fréquences inférieures et en mode guide d'ondes équidirectif dans les fréquences supérieures.

Comme indiqué plus haut, des systèmes d'antenne actifs peuvent réduire au minimum la taille des antennes pour ondes métriques/décimétriques. La Figure 3-14 représente un système d'antenne actif à large bande dont les éléments constitutifs sont des doublets actifs ayant une grande dynamique et une sensibilité élevée. L'antenne verticale est un doublet actif alimenté au centre, pour la gamme de fréquences 20-1 300 MHz. L'antenne horizontale couvre de 20 à 500 MHz et a la configuration d'un tourniquet composé de deux doublets actifs à large bande réunis par un hybride qui donne un diagramme de rayonnement presque omnidirectif. Ces petites antennes actives conviennent parfaitement aux systèmes de contrôle à large bande, y compris pour la distribution des signaux à de nombreux récepteurs; en effet, le système de distribution sera plus simple s'il fonctionne avec une seule antenne pour la totalité de la gamme de fréquences.

FIGURE 3-13

Doublet large bande pour ondes métriques/décimétriques



Spec-3-13

FIGURE 3-14

Système d'antenne actif pour ondes métriques/décimétriques



Spec-3-14

Une autre solution technique efficace pour améliorer les caractéristiques des antennes de contrôle équidirectives pour ondes métriques/décimétriques consiste à installer sur les antennes des convertisseurs de signaux radioélectriques à fréquences intermédiaires (convertisseurs FI) au lieu d'amplificateurs [Ashikhmin et autres, 2006], [Rembovsky et autres, 2006].

Dans ce cas, on améliore les caractéristiques des antennes en réduisant au minimum la longueur du câble pour ondes décimétriques, étant donné que ce dernier est la principale source de bruit lors du transfert des signaux des éléments d'antenne vers un récepteur radio. L'installation de convertisseurs FI à proximité immédiate des éléments d'antenne permet d'éliminer l'effet du câble sur l'antenne (qui, dans ce cas, transmet le signal FI) et également de transmettre le signal FI sur des distances pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Il en résulte une amélioration de la sensibilité et de la portée dynamique du système.

3.2.4.2 Antennes directives pour ondes métriques et décimétriques

Dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques, la nécessité d'avoir des antennes à faible taux d'ondes stationnaires et à diagrammes de rayonnement uniformes a conduit à la mise au point de réseaux d'éléments dont les caractéristiques d'impédance et de directivité se répètent périodiquement en fonction du logarithme de la fréquence (d'où l'appellation «log-périodique»). Le gain de ces antennes est assez moyen (couramment de 10 dBi), la directivité est bonne (le rapport de rayonnement avant/arrière est couramment de 14 dB) et le diagramme de rayonnement reste constant dans une gamme de fréquences pouvant atteindre un rapport d'environ 10:1. Le diagramme de rayonnement est habituellement large; il est à peu près le même, pour la plupart des fréquences de la gamme prévue, que celui d'une antenne formée d'un doublet, d'un élément réflecteur et d'un élément directeur. Grâce à ses caractéristiques uniformes de gain, de rayonnement et d'impédance, cette antenne se prête bien à son intégration dans des rideaux à large bande destinés à être utilisés lorsque l'on a besoin d'antennes à très haute directivité. L'antenne log-périodique peut, en particulier, être utilisée avec de bons résultats pour l'illumination des réflecteurs paraboliques pour ondes décimétriques, lorsqu'il est souhaitable que l'ouverture angulaire du lobe principal soit très étroite.

La structure d'une antenne log-périodique est, en général, constituée par une série d'éléments rayonnants alimentés par une ligne de transmission centrale le long de laquelle ils sont disposés. Les paires d'éléments constituant chaque doublet sont calculées pour que chacune possède les propriétés requises dans une bande étroite de la gamme des fréquences de fonctionnement de l'ensemble et conserve ses caractéristiques aussi constantes que possible dans sa gamme de fréquences active. Les éléments individuels se répètent à intervalles constants avec le logarithme de la fréquence. Le nombre d'intervalles dépend du gain et du taux d'ondes stationnaires, pour lesquels l'ensemble de l'antenne a été conçu.

Le chevauchement des caractéristiques des éléments du système donne naissance à une zone active contenant plusieurs éléments adjacents, laquelle se déplace progressivement le long de la structure lorsque l'on change la fréquence. Le taux d'ondes stationnaires de l'antenne dépend directement du nombre d'éléments contenus dans la zone active de l'antenne pour une fréquence particulière et du rendement de leur fonction de transfert de l'énergie entre l'onde électromagnétique et la ligne de transmission.

Un certain nombre de constructeurs sont en mesure de fournir des antennes log-périodiques complètes à large bande ou à bande étroite en vue d'utilisations particulières. Des renseignements détaillés sur les caractéristiques de construction de ces antennes se trouvent dans les publications énumérées dans la bibliographie du présent Chapitre.

3.2.4.3 Antennes pour les fréquences au-dessus de 3 000 MHz

Pour obtenir le gain d'antenne élevé qui est nécessaire pour le contrôle des émissions sur de grandes distances, on utilise le plus souvent des antennes du type «réflecteur parabolique et source d'alimentation». Le gain dépend du rapport diamètre réflecteur/longueur d'onde et du rendement d'ouverture de l'antenne.

Pour réaliser un système d'antenne optimum dans la gamme des ondes centimétriques, il faut tenir compte de plusieurs facteurs: les opérations à bande étroite ou à large bande, le contrôle ou la surveillance générale des signaux.

Dans le cas des opérations à bande étroite, un système d'alimentation à cornet ou guide d'ondes, doublet ou doublet croisé, peut être placé exactement au foyer d'un réflecteur parabolique. Il est possible d'optimiser le rapport distance focale/diamètre par référence au rendement élevé que l'on obtient en réduisant à un minimum les pertes dues à une illumination insuffisante ou à un rayonnement latéral. On aura ainsi le gain d'antenne le plus élevé possible.

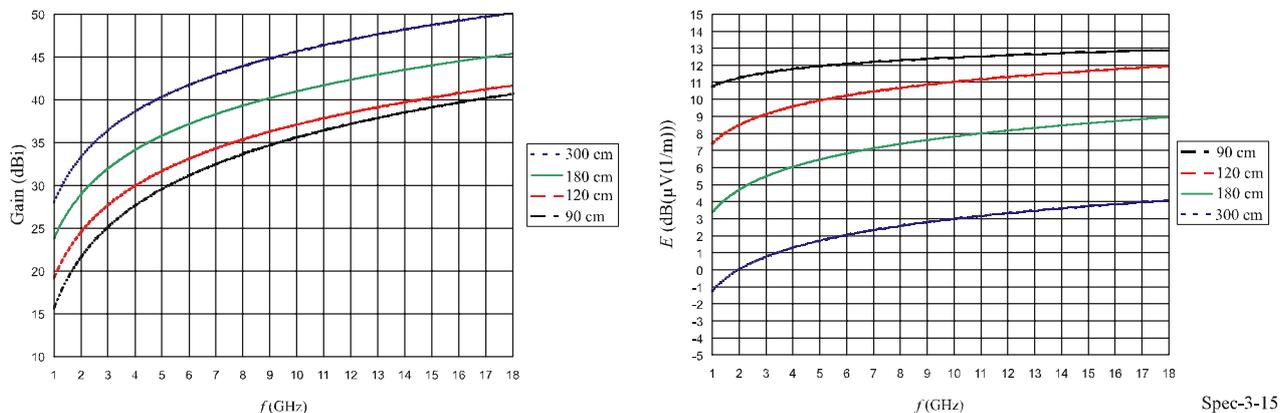
Pour le contrôle des émissions et la surveillance, on a besoin d'un gain élevé et d'une grande ouverture de faisceau pour capter le signal. En pareil cas, une méthode couramment utilisée consiste à focaliser ou à défocaliser le système d'alimentation de l'antenne à l'aide d'un dispositif mécanique entraîné par un moteur. Il est possible d'obtenir des variations de l'ouverture du faisceau allant de 1:4 à 1:10.

Pour les opérations à large bande, on a le choix entre plusieurs types d'antennes: log-périodiques à polarisation rectiligne ou double polarisation rectiligne, spirale conique ou antennes à cavité, ce dernier type principalement pour la polarisation circulaire. Les systèmes avec alimentation à large bande ne possèdent pas un centre de phase invariable: celui-ci se déplace du radiateur le plus court vers le radiateur le plus long de la structure, en fonction de la fréquence. Si la structure est positionnée dans le réflecteur pour une certaine fréquence, il se produira une défocalisation pour les autres fréquences. Il est possible de réduire à un minimum les pertes dues à la focalisation en procédant à une optimisation basée sur le calcul de paramètres supplémentaires (par exemple, rapport longueur/diamètre). Pour empêcher ces pertes, on peut recourir à une focalisation mécanique (voir plus haut).

Une autre solution consiste à choisir un réflecteur ayant un profil spécial, non rigoureusement parabolique. On aura alors un gain d'antenne qui augmentera et une ouverture de faisceau qui diminuera jusqu'à une certaine fréquence, après quoi les deux caractéristiques demeureront constantes (voir la Figure 3-15).

FIGURE 3-15

Gain et intensité de champ mesurable la plus faible pour des réflecteurs de diamètre différent avec alimentation linéaire



Spec-3-15

Les antennes pour hyperfréquences sont montées à demeure sur un trépied ou un mât, pour surveiller les signaux venant dans une direction donnée. Dans ce cas, on a un mécanisme à réglage manuel qui permet d'orienter le système d'antenne exactement dans la direction voulue. L'ouverture de faisceau des antennes peut varier de 20° à $0,05^\circ$, selon la valeur du rapport diamètre/longueur d'onde.

Pour les travaux généraux de contrôle des émissions, les systèmes d'antenne sont installés sur des supports de haute précision, à un ou deux axes. Selon le diamètre du réflecteur de l'antenne, les dimensions et le coût peuvent varier considérablement si l'on souhaite protéger le fonctionnement et assurer l'intégrité du système en présence de vents à grande vitesse. Pour les opérations de contrôle dans les systèmes de Terre, on utilise des supports mono-axe avec articulations rotatives ou avec dispositif de torsion de câbles. Ce dernier système est limité quant à l'intervalle de rotation en azimut (par exemple, 360°). L'angle d'élévation peut être réglé manuellement ou par télécommande dans un intervalle de $\pm 10^\circ$.

Pour le contrôle des émissions par satellite, des supports bi-axiaux permettent des déplacements supplémentaires allant de -10° à plus de $+90^\circ$.

Les supports motorisés sont télécommandés par des dispositifs pouvant fonctionner selon plusieurs modes différents, par exemple: vitesse variable, positions pré-réglées, exploration et sélection d'antenne. Il est prévu des interfaces d'ordinateur parallèle et série pour l'intégration des systèmes. La Figure 3-16 représente un schéma de principe type. Il est fortement recommandé d'installer des préamplificateurs à faible bruit au voisinage du système d'alimentation, afin de supprimer l'affaiblissement et le bruit supplémentaires pouvant être introduits par les câbles. Ces ensembles existent sous la forme de systèmes d'alimentation dits «alimentations actives», avec des préamplificateurs à large bande (par exemple, 1 à 18 GHz) ou avec des étages amplificateurs commutables par gammes de fréquences de 1 octave. On trouvera à la Figure 3-17 un exemple de ces alimentations.

FIGURE 3-16

Schéma fonctionnel d'une antenne hyperfréquences à faisceau orientable (1-18 GHz)

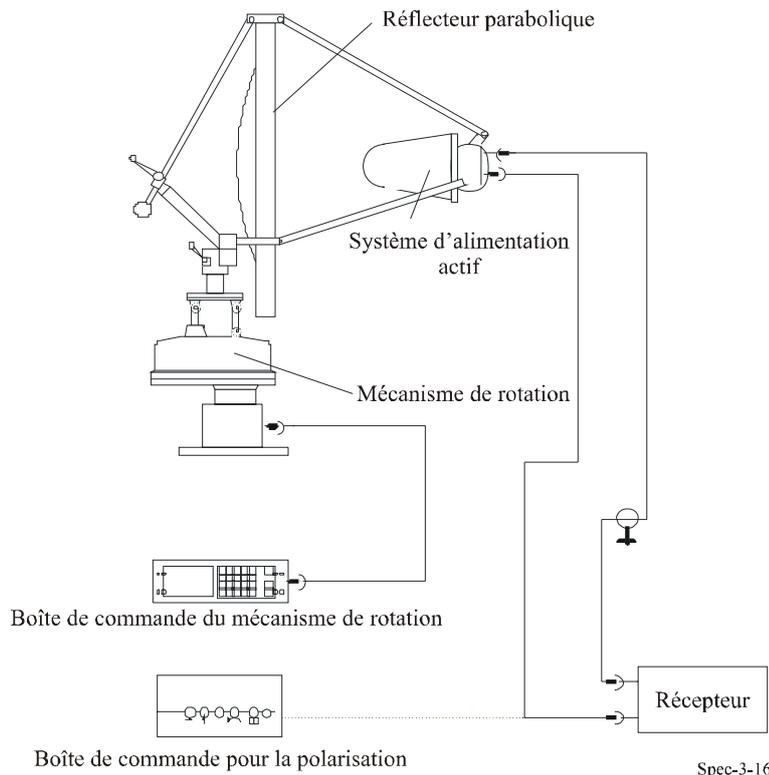


FIGURE 3-17

Exemple d'alimentation pour un système d'antenne à réflecteurs (1-18 GHz)
(coupe transversale du radôme)

Il est donc prévu également des dispositifs pour la commande à distance de la polarisation et de la gamme de fréquences. Autres fonctions: dérivation commutable, affaiblisseurs et limiteurs incorporés. Pour optimiser la performance du système, il est aussi recommandé d'installer les convertisseurs du système de réception à proximité de l'antenne.

Pour les grands réflecteurs d'antenne, le système d'alimentation n'est pas placé au foyer de la parabole mais à son sommet et le rayonnement est dévié par un réflecteur secondaire de forme hyperbolique. Le réflecteur peut aussi être attaqué en «mode décalé». Dans ce cas, l'alimentation de l'antenne occupe une position inclinée, à l'extérieur du rayonnement secondaire du réflecteur.

Pour des applications spéciales, on peut avoir recours à des réflecteurs ayant un double profil, par exemple un cylindre parabolique ou un profil en cosécante. L'ouverture du faisceau est alors différente en azimut et en élévation, du fait de l'application.

Pour les applications mobiles, lorsque l'espace sur le toit est limité, on peut utiliser des antennes équidirectives. Les antennes équidirectives obliques à polarisation rectiligne reçoivent toutes les polarisations, notamment polarisation verticale, polarisation horizontale, polarisation circulaire dextrogyre et lévogyre, et couvrent de nombreuses bandes de fréquences, généralement les bandes 1-4 GHz, 4-18 GHz, 1-18 GHz et 12-40 GHz.

Ainsi, avec trois antennes relativement petites (300 mm maximum), la totalité de la bande peut être couverte. Il est très important que ces antennes soient installées à proximité (à moins de 3 m) du récepteur pour que les pertes d'affaiblissement dans les câbles coaxiaux de connexion restent faibles.

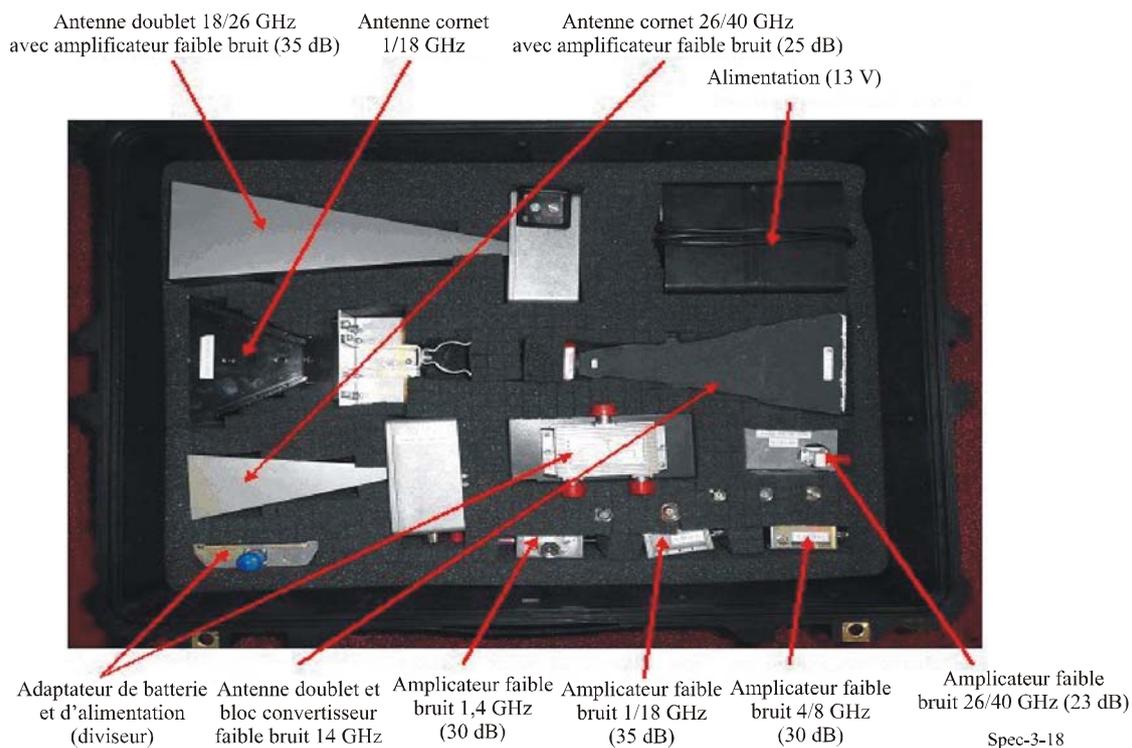
On pourrait envisager d'utiliser pour les mesures de la bande d'ondes centimétriques (1 à 40 GHz et plus) un système compact constitué de plusieurs antennes cornets et d'un seul tripode.

Dans la bande 1-18 GHz, pour éviter un bruit trop important, des filtres sélectifs devraient être utilisés et le gain des amplificateurs faible bruit (LNA) devrait être limité (moins de 20 dB). Dans la bande 18-40 GHz et plus, les résultats mesurés pourraient être améliorés au moyen de guides d'ondes. Comme ces derniers sont par définition des filtres passe-bande, des amplificateurs à gain plus élevé pourraient être utilisés.

Compte tenu de ce qui précède, un exemple type de système portable est illustré à la Figure 3-18. Il comprend une mallette portative qui contient un ensemble d'antennes cornets équipés d'amplificateurs, de filtres, d'une alimentation, de batteries et de câbles pour la réalisation de mesures dans la bande 1-40 GHz.

FIGURE 3-18

Système compact type pour des mesures en ondes centimétriques



En outre, plusieurs câbles et adaptateurs pourraient être ajoutés à la mallette, dont les dimensions sont de 600 x 500 x 230 mm et le poids à pleine charge de 16 kg seulement.

3.2.5 Choix de l'emplacement des antennes

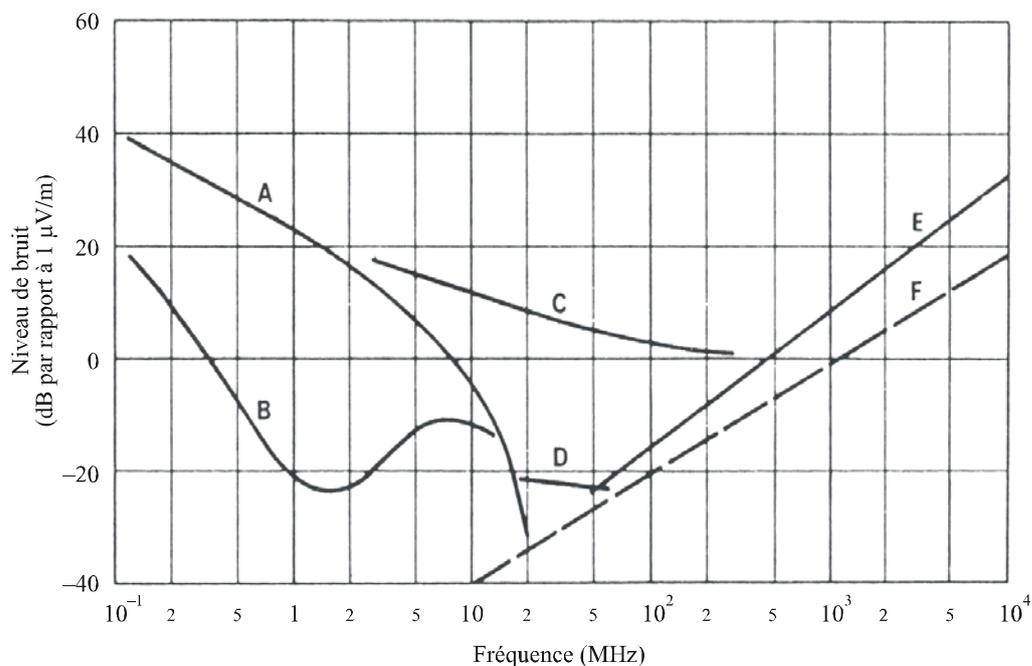
Trois facteurs essentiels sont à prendre en considération lorsque l'on procède au choix d'emplacements pour des antennes de station de contrôle des émissions: le niveau de bruit, l'influence du terrain sur la qualité de fonctionnement des antennes et les brouillages entre antennes voisines et autres structures métalliques ou objets non loin. Ces facteurs doivent tous être examinés avant de prendre une décision quant à l'emplacement convenable et au plan d'implantation des antennes. D'autres facteurs, d'ordre économique et d'ordre politique, exercent une influence sur l'emplacement et l'implantation de la station de contrôle elle-même.

Les bruits qui perturbent la réception des ondes radioélectriques peuvent être classés en deux grandes catégories: le bruit naturel et le bruit industriel.

Le bruit naturel est celui que produisent les divers mécanismes de la nature, aux environs de la Terre elle-même comme dans les systèmes célestes voisins. La composante principale du bruit naturel produit sur la Terre est la résultante des décharges électrostatiques émanant des nombreux foyers orageux presque constamment actifs sur l'ensemble du globe. Les orages sont les plus actifs dans les régions équatoriales; leur bruit rayonne en direction des pôles, fournissant ainsi des composantes de bruit atmosphérique dont l'intensité est la plus élevée à l'équateur et la moins élevée aux pôles. Des sources de bruit galactique de forte intensité existent dans les espaces célestes (notamment dans les constellations de Cassiopée et du Sagittaire); ces sources peuvent représenter une partie considérable du bruit capté par les antennes situées dans un environnement où le niveau de bruit atmosphérique est faible, par exemple aux grandes latitudes. Comme on peut le voir dans la Figure 3-19, le bruit cosmique est généralement couvert, à presque toutes les fréquences, par les bruits provenant d'autres sources; mais il peut être notable dans quelques cas, en particulier lorsque le lobe principal de l'antenne de réception est orienté vers une source cosmique puissante.

FIGURE 3-19

Niveau moyen typique de bruit dans la bande de fréquences de 6 kHz (gamme de fréquences 100 kHz à 10 GHz)



Courbes A: bruit atmosphérique, nuit
 B: bruit atmosphérique, midi
 C: grande ville, allumage de moteurs d'automobiles
 D: bruit cosmique
 E: bruit typique d'un appareil récepteur
 F: bruit thermique

Spec-3-19

Le brouillage causé par le bruit d'origine industrielle à la réception des signaux radioélectriques peut prendre des formes très diverses (voir aussi les § 2.6 et 4.3). Une des sources de brouillage les plus importantes à éviter lors du choix de l'emplacement d'une antenne est constituée par une station de radiodiffusion voisine. Même si la fréquence de travail de la station est très différente des fréquences des émissions que l'on se propose de contrôler, un brouillage appréciable peut être causé par des rayonnements non essentiels, par des harmoniques de la fréquence de la station de radiodiffusion, par des produits d'intermodulation ou d'autres effets provoqués dans le récepteur par la surcharge des étages à radiofréquence, à fréquence intermédiaire et à audiofréquence. Une désensibilisation du récepteur peut aussi se produire, même si l'on n'a pas remarqué de réponse parasite.

D'autres sources de bruit d'origine industrielle peuvent donner naissance dans les récepteurs à un niveau de bruit qui peut l'emporter sur celui des signaux radioélectriques que l'on désire recevoir. Parmi ces sources de bruit, il convient de citer les appareils de radiologie et de diathermie, les centrales et les sous-stations électriques, les lignes de transport d'énergie électrique à haute tension, les machines à souder, certains procédés de fabrication utilisés par l'industrie lourde, l'éclairage public, les fortes concentrations de trafic automobile, et même les zones résidentielles de forte densité. Les bruits industriels atteignent les récepteurs par rayonnement direct, mais aussi par conduction le long des lignes de distribution d'énergie électrique, de sorte qu'ils peuvent causer du brouillage dans des zones situées à des distances considérablement plus grandes que celles affectées par le rayonnement direct.

Après avoir choisi un emplacement répondant aux critères de brouillage, il s'agit d'examiner quelle sera l'influence du terrain sur la réception. Cet examen est particulièrement important; en effet les antennes de contrôle partagent habituellement le même emplacement avec une antenne de radiogoniométrie. Pour ce type d'antenne, il importe que le terrain soit plat, sans discontinuités et dégagé dans toutes les directions afin d'éviter les erreurs dans les azimuts d'arrivée des ondes radioélectriques. Les § 2.6 et 4.7 du présent Manuel traitent respectivement du choix des emplacements des stations de contrôle et des radiogoniomètres. Exception faite de quelques cas de stations de contrôle destinées à des observations d'un type particulier, un bon emplacement de station de radiogoniométrie est également bon pour des antennes de station de contrôle des émissions.

Lorsque plusieurs antennes indépendantes doivent être installées sur le même terrain, il convient d'examiner quels seront les effets de leurs interactions entre elles et avec des structures métalliques voisines (mâts d'antenne, haubans de mât, clôtures, tubes métalliques, escaliers et autres structures métalliques).

Celles-ci seront très prononcées entre antennes de types similaires, conçues pour fonctionner dans la même gamme de fréquences ou à peu près en concordance de résonance. Par exemple, il est conseillé de ne pas implanter deux antennes en losange à moins de 10 longueurs d'onde environ l'une de l'autre, lorsque l'une se trouve placée dans la direction du lobe de l'autre à la fréquence de travail. Pour réduire au minimum les brouillages entre des antennes de types différents, il est recommandé de réaliser le maximum de diversité par l'application d'au moins deux des techniques générales de diversité: espace, fréquence et polarisation.

Indépendamment d'autres antennes, les structures métalliques environnantes situées à des distances de moins de quelques longueurs d'onde d'une antenne peuvent fausser de façon inacceptable les caractéristiques d'antenne comme les diagrammes de rayonnement en élévation et en azimut ou le circuit d'adaptation avec les câbles d'alimentation par rapport à celles qui sont observées lorsque l'antenne est isolée. Les erreurs de mesure des paramètres d'émission découlant de cette influence peuvent dépasser de beaucoup les tolérances d'erreur spécifiées (voir le Chapitre 4).

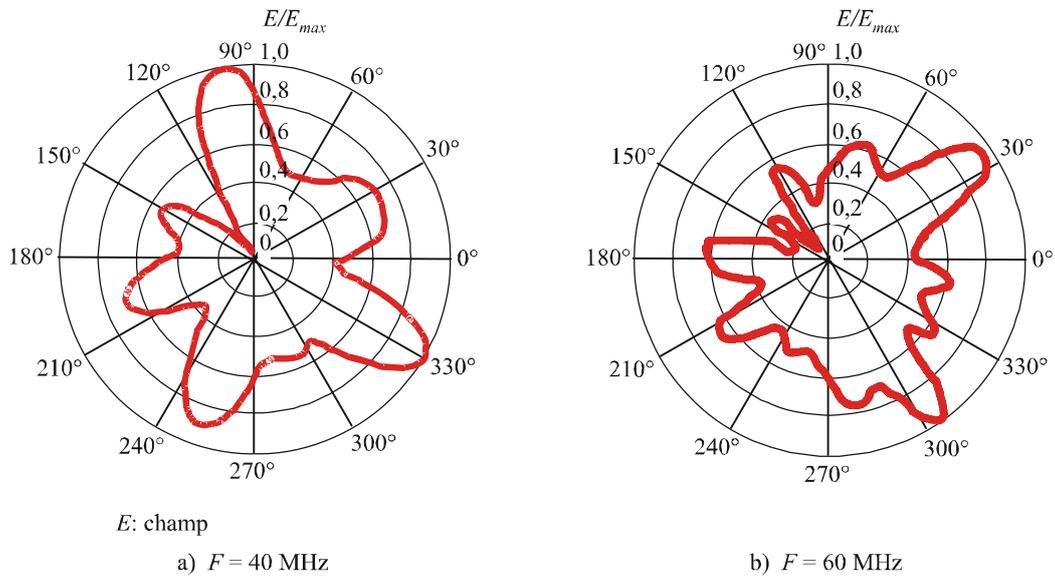
Il est possible de déterminer quantitativement l'influence d'autres antennes et structures métalliques à l'aide d'un logiciel [Kharchenko et Fomintsev, 2001], [Tanner et Andreasen, 1967], [Harrington, 1968] et [Thiele, 1973]. Les structures métalliques et autres antennes situées à plusieurs longueurs d'onde (habituellement de 4 à 8) de l'antenne considérée sont modélisées par des structures de fils métalliques préservant les proportions géométriques. A l'aide d'une méthode on calcule la distribution des courants dans tous les éléments des structures métalliques; ce modèle électrodynamique de l'antenne et de son environnement permet de déterminer les véritables caractéristiques de l'antenne en présence de diffusion, de rayonnement secondaire et de résonances produits par des structures métalliques avoisinantes.

Comme exemple [Kharchenko et Fomintsev, 2001] de l'utilisation de la technique considérée, la Figure 3-20 donne le diagramme en azimut calculé d'une antenne discône équidirective de type parapluie pour 30-80 MHz en présence de structures métalliques environnantes importantes. Ces structures comprennent d'autres antennes analogues pour la même gamme de fréquences et deux antennes discônes de type parapluie pour la gamme 80-100 MHz. Il y a aussi plusieurs antennes tiges, une clôture en métal et quelques objets métalliques.

Comme le montre clairement la Figure 3-20, les antennes environnantes et d'autres structures métalliques transforment un diagramme équidirectif (Figure 3-8) en un diagramme directif. Bien plus, les diagrammes varient dans des proportions importantes selon la fréquence, les différences pouvant atteindre 20 dB en raison de la non-linéarité. Du fait de ces variations, il est plus difficile de corriger les mesures données par l'antenne.

FIGURE 3-20

Diagramme en azimut effectif d'une antenne équidirective pour la gamme 30-80 MHz



Spec-3-20

Voici quelques recommandations concernant l'implantation des antennes par rapport aux bâtiments d'une station de contrôle des émissions, ainsi que par rapport à d'autres antennes:

Antennes-cadres pour ondes décamétriques. Elles devraient être implantées à 100 m au moins du bâtiment de réception pour éviter toute distorsion des diagrammes de rayonnement par ce bâtiment.

Antennes-réseaux large bande pour ondes hectométriques/décimétriques. Elles ne devraient pas être situées trop loin du bâtiment (100 à 200 m environ). L'espacement devrait être suffisant pour éviter l'occultation de l'antenne par les bâtiments sans toutefois introduire de pertes importantes dans la ligne d'alimentation. Une ligne coaxiale est recommandée étant donné que ces antennes sont des antennes large bande avec des caractéristiques d'impédance très contrôlées et un gain un peu plus faible que celui des antennes résonnantes.

Antennes d'émission et antennes de réception. Il convient de conserver le maximum d'espacement entre ces antennes, afin de réduire au minimum la surcharge des récepteurs causée par les signaux émis par les émetteurs locaux. Il convient d'implanter soigneusement les antennes d'émission de telle sorte que leur lobe principal et leurs lobes secondaires n'illuminent pas directement les antennes qui ne sont utilisées que pour la réception.

Antennes de radiogoniométrie. Si l'installation d'un équipement de radiogoniométrie est envisagée à la station de contrôle des émissions, il convient de tenir compte des effets éventuels dus aux composantes du rerayonnement des antennes de réception, lesquels sont susceptibles d'introduire des erreurs dans les relevements pris par le radiogoniomètre (voir § 2.7 et 4.7).

Antennes actives. Le couplage mutuel entre antennes actives est réduit à un minimum, de même que le couplage entre ces antennes et d'autres structures. Les antennes actives peuvent donc être installées plus près les unes des autres que ce n'est le cas avec les antennes passives. Elles peuvent être perturbées par des émetteurs de grande puissance et cela doit être pris en compte lors du choix de leur emplacement.

Antennes pour ondes métriques et décimétriques (au-dessus de 30 MHz). Elles devraient être situées à une hauteur suffisante sur des tours à proximité du bâtiment de réception pour réduire au minimum les pertes dans le câble coaxial et pour maximiser la zone de couverture en visibilité directe. Pour un rayon de 20 km en visibilité directe, il faut un pylône de 24 m de haut. Avec un pylône de 48 m, la couverture en visibilité directe serait d'environ 30 km.

Antennes pour les fréquences supérieures à 1 000 MHz. On installera ces antennes en des points bénéficiant d'une vue optique dégagée (par exemple, sur un bâtiment, une tour ou une crête montagneuse), surtout pour le contrôle des émissions dans le service de Terre. Les systèmes de réception seront placés à proximité de l'antenne, afin d'éviter des affaiblissements importants dans le câble coaxial.

3.2.6 Antennes pour stations de contrôle mobiles

Une station de contrôle mobile offre les mêmes fonctions qu'une station fixe dans un véhicule en déplacement qui peut aller d'un endroit à un autre. Cette configuration offre des ressources en ce qui concerne les mesures qui peuvent être facilement adaptées pour répondre à une plainte particulière ou à un autre besoin de contrôle et qui peuvent être situées sur le trajet de propagation en ligne directe du signal considéré.

La principale contrainte pour les antennes de stations de contrôle mobiles est leur taille. Etant donné qu'inévitablement on manque d'espace, ces antennes doivent être petites. Par conséquent, aux basses fréquences, les dimensions de l'antenne ne représentent qu'une très petite fraction de la longueur d'onde. On dispose d'antennes-cadres couvrant la gamme de fréquences comprise entre 9 kHz et 30 MHz, avec ou sans ferrite; compte tenu de leurs caractéristiques électriques très bien définies, elles sont tout désignées pour les mesures du champ et la radiogoniométrie des signaux de l'onde de sol. Pour les fréquences comprises entre 30 MHz et 3 GHz on dispose d'antennes équidirectives large bande qui captent les ondes à polarisation verticale ou horizontale. Les gammes de fréquences typiques sont de 20 MHz à 1 000 MHz, de 200 MHz à 3 000 MHz ou de 30 MHz à 3 GHz.

Il existe des antennes de radiogoniométrie directives très diverses pour les fréquences au-dessus de 30 MHz, en particulier les antennes Yagi à large bande ou à bande étroite, les doublets accordables, les doublets repliés, les antennes biconiques et les antennes «log-périodiques». Ces antennes peuvent couvrir des bandes de fréquences assez larges et satisfaire tous les besoins d'une station de contrôle mobile. Une antenne représentative est décrite au début du § 3.2.4.1.

La plupart des antennes pour stations mobiles sont installées à bord d'un véhicule. Toutefois, les antennes à réflecteurs pour les fréquences au-dessus de 1 000 MHz ne sont en règle générale pas installées de façon permanente à bord du véhicule, mais transportées et érigées lorsqu'on en a besoin, le véhicule étant à l'arrêt (voir Figure 3-21). Les antennes actives peuvent être utilisées dans toutes les gammes de fréquences compte tenu de leurs paramètres techniques et de leurs contraintes qui sont examinés dans le paragraphe concernant les antennes équidirectives. Des antennes actives portables (voir Figure 3-22) peuvent être utilisées pour le contrôle, les mesures du champ ou même la radiogoniométrie.

FIGURE 3-21

Antenne hyperfréquence transportable



Spec-3-21

FIGURE 3-22

Antenne directive portable



Spec-3-22

Des stations de contrôle mobiles types sont illustrées à la Figure 3-23, chacune avec une antenne extérieure montée sur un mât pneumatique.

FIGURE 3-23

Exemples de stations de contrôle mobiles



Spec-3-23

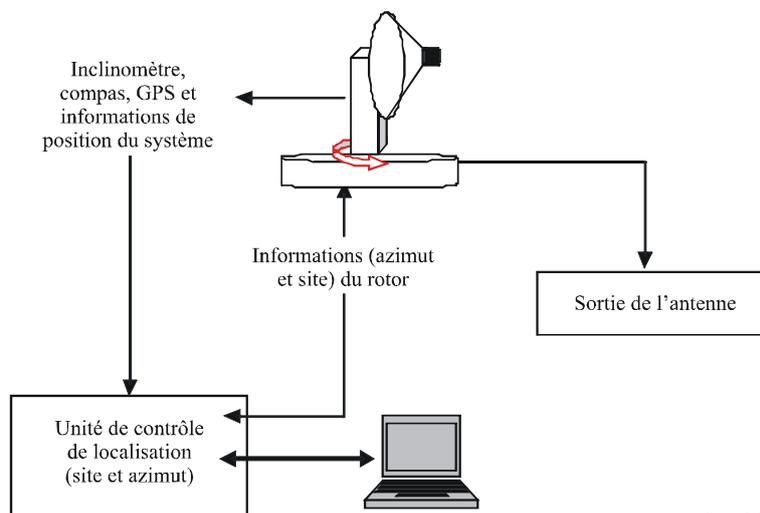
Les stations mobiles sont particulièrement importantes pour le contrôle aux hyperfréquences. Les signaux hyperfréquence se propagent habituellement dans des faisceaux très étroits, bien définis, conçus pour des communications point à point et point multipoint. Par conséquent, il est très improbable qu'une station fixe soit située suffisamment près d'un trajet hyperfréquence de façon à pouvoir intercepter un signal hyperfréquence. Compte tenu des coûts élevés et des avantages très limités, il n'est pas recommandé d'installer une unité d'interception de signaux hyperfréquence dans une station fixe; cet équipement par contre devrait être installé dans un véhicule en déplacement ou dans une station portable. Pour un véhicule spécialisé, un système complet pourrait être mis en œuvre pour effectuer des mesures dans les bandes allant de 1 à 40 GHz et plus.

Dans ce cas, illustré par un schéma fonctionnel type à la Figure 3-24, le système d'antennes comprend les éléments suivants:

- antennes;
- système de localisation automatique;
- unité de contrôle d'antennes;
- tableau des sorties d'antennes;
- unité de contrôle d'azimut et d'élévation.

FIGURE 3-24

Exemple de système de contrôle en ondes centimétriques

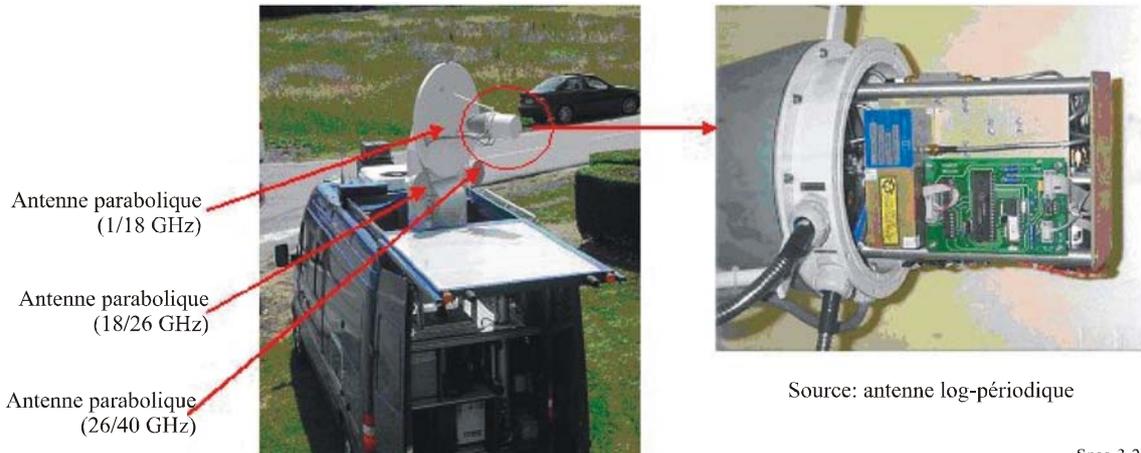


Spec-3-24

Le système d'antennes pourrait comprendre plusieurs antennes destinées à contrôler la totalité de la bande, comme le montre la Figure 3-25. De plus, pour assurer la souplesse dans les mesures en ondes centimétriques, compte tenu des différentes situations de mesures et du faible niveau des signaux en ondes centimétriques, il est utile d'ajouter, à proximité du système d'antennes, certains accessoires tels que des amplificateurs faible bruit et des filtres YIG.

FIGURE 3-25

Vue générale du système d'antennes



Spec-3-25

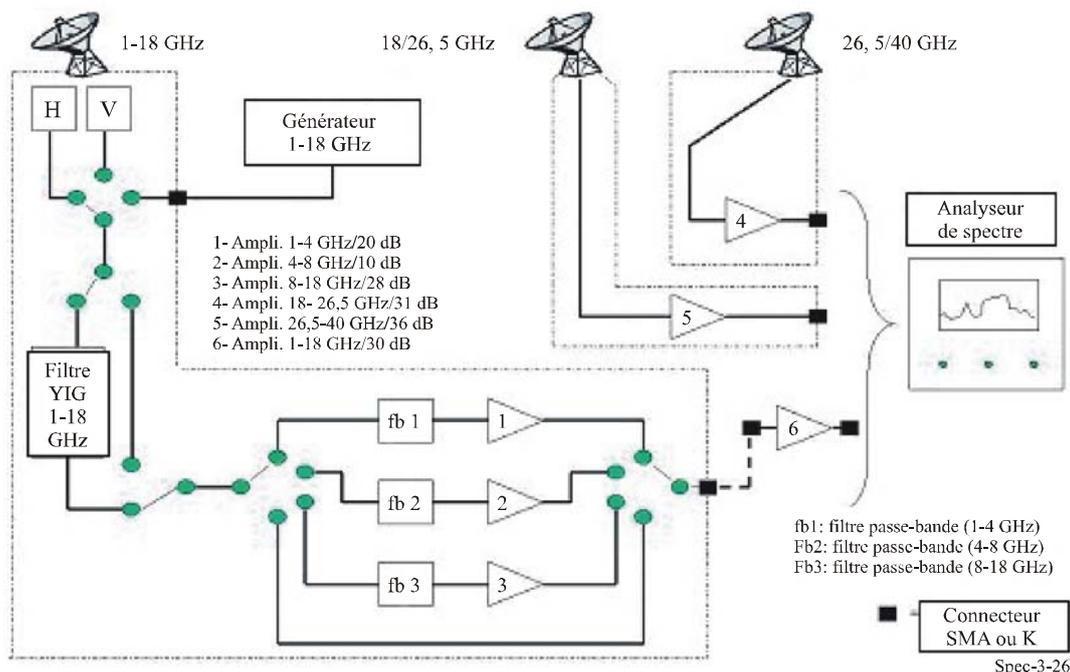
Un PC assure l'interface entre le système d'antennes et l'utilisateur.

L'unité de contrôle de positionnement assure la supervision. Elle envoie des données pour contrôler le système de positionnement et reçoit des informations de différents capteurs indiquant la situation du système et les données de référencement géographique.

Le tableau des sorties d'antenne permet à l'utilisateur de connecter différents équipements de mesure à toutes les sorties disponibles (avec ou sans amplificateurs faible bruit, filtres, etc.). On trouvera à la Figure 3-26 un schéma fonctionnel de la chaîne de mesures en ondes centimétriques.

FIGURE 3-26

Schéma fonctionnel de la chaîne de réception



Spec-3-26

3.2.7 Antennes pour stations transportables et portables

Les antennes transportables et portables sont conçues de manière à avoir un poids et une taille minimales. L'antenne illustrée sur la Figure 3-11 a) (partie gauche) est destinée à un système mobile ou transportable. Elle se transporte aisément dans un boîtier. L'antenne transportable peut être fixée au sommet d'un mât télescopique pour minimiser le temps d'installation. Elle peut aussi être montée sur des véhicules destinés aux stations semi-fixes.

Les améliorations en matière de technique et d'intégration permettent aux antennes transportables d'offrir des fonctions et des performances similaires à celles des antennes destinées aux stations fixes ou mobiles. Combinées à un récepteur intégré, ces antennes permettent à une station de devenir transportable ou portable, ce qui est particulièrement utile pour les opérations de contrôle en ville ou dans des zones difficiles d'accès. Le spectre est très dense en zone urbaine et les mesures de contrôle dans les rues ne sont pas toujours appropriées; seules les mesures faites à partir du sommet de sites prévus à cet effet, généralement des bâtiments en ville, donnent des résultats fiables. Ce contrôle exige des stations et antennes portables, compactes, de faible hauteur et légères. La configuration transportable ou portable offre des systèmes de mesure qui peuvent être aisément placés sur le trajet de propagation en visibilité directe du signal.

Voici trois exemples d'antennes/stations portables:

Type 1: Le premier type d'antenne/station portable exige une installation. L'équipement est porté sur le dos d'une personne jusqu'à un site de mesure réservé. La Figure 3-27 donne un exemple de cette antenne de radiogoniométrie, qui permet une installation rapide (en quelques minutes). L'antenne et la station de contrôle sont entièrement intégrées, y compris le récepteur, l'unité de commutation de câble et l'antenne, et transportées sur le dos. La structure de l'antenne est entièrement contenue dans un boîtier en plastique.

Type 2: Le deuxième type d'antenne portable ne nécessite pas d'installation. La station entière (antenne et récepteur) est intégrée dans un boîtier manuel, qui fonctionne pendant que l'opérateur se déplace. L'interface homme-machine est intégrée dans un assistant numérique personnel (PDA) qui permet à l'opérateur de se mouvoir librement ou dans un ordinateur portable. Une antenne radiogoniométrique est intégrée sur le côté du récepteur. Les opérations de contrôle sont effectuées par une seule personne, ses mains étant libres pour les applications manuelles portables. Une antenne radiogoniométrique pourrait être fournie pour les bandes de fréquences supérieures.

FIGURE 3-27

Exemple d'antenne portable pour ondes métriques/décimétriques



a) L'antenne est contenue dans un boîtier transportable



b) Antenne fonctionnant dans la bande 20-3 000 MHz; dans une configuration où un récepteur compact et un système radiogoniométrique sont installés

Spec-3-27

Type 3: Il existe un troisième type d'antenne portable très compact. L'antenne directive portable sert d'antenne de contrôle et de radiogoniométrie, et elle est reliée à un récepteur portatif qui fonctionne depuis le panneau frontal sans qu'un PC/PDA supplémentaire ne soit nécessaire. Les opérations de contrôle sont effectuées par une seule personne.

Un autre type d'antenne qui peut être requis pour un usage particulier est illustré à la Figure 3-28. Il s'agit d'une antenne de contrôle flexible montée sur l'enveloppe d'un ballon qui pourrait être très utile pour des événements de courte durée, par exemple, pour contrôler des événements spéciaux tels que des visites d'hommes d'Etat et des manifestations sportives.

Le ballon permet de placer l'antenne à une altitude pouvant aller jusqu'à 100 m pour détecter et mesurer un nombre maximal de signaux pertinents. La station en question est également meilleure que les stations de Terre pour intercepter un nombre maximal de signaux sans que des perturbations soient causées par des bâtiments, des forêts ou d'autres obstacles élevés, et la présence de trajets multiples.

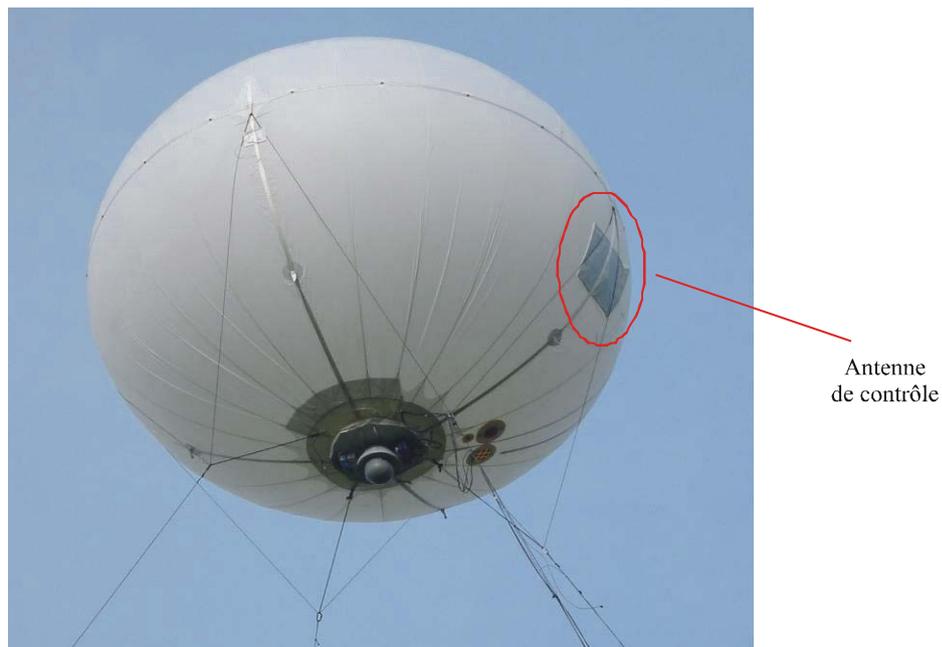
Le ballon, utilisé conjointement avec un récepteur compact (installé au sol), s'installe rapidement et facilement, et peut rapidement contrôler les bandes de fréquences métriques/décimétriques, y compris les utilisateurs non munis de licences, ainsi que les brouillages.

Pour éviter un affaiblissement de câble excessif causé par l'altitude du ballon, on utilise deux configurations:

- Un récepteur de contrôle et une unité de traitement peuvent être placés sous le ballon. Dans ce cas, deux câbles (alimentation et transmission de données) sont reliés à la station au sol.
- Un convertisseur-abaisseur peut être utilisé pour convertir le signal RF en bande de base FI. Avec une conversion analogique, un câble RF peut être utilisé si le ballon se trouve à une faible altitude. Pour une conversion numérique, une liaison optique ou de données peut être utilisée pour transférer les données vers la station au sol.

FIGURE 3-28

Exemple de ballon servant de support à une antenne flexible pour ondes métriques/décimétriques



Spec-3-28

3.2.8 Lignes de transmission et systèmes de répartition

3.2.8.1 Lignes de transmission

Les lignes de transmission utilisées dans les stations de contrôle des émissions ont pour fonction de conduire l'énergie reçue de l'antenne jusqu'au récepteur.

La ligne de transmission coaxiale est celle à laquelle on accorde la préférence pour les stations de contrôle. Cette ligne a une impédance uniforme, pour autant que les dimensions de ses différentes parties, y compris les connecteurs, soient déterminées avec soin. Les signaux transmis par des câbles coaxiaux de bonne qualité ne sont pas perturbés gravement par la présence d'autres objets. L'industrie fabrique toute une gamme de lignes coaxiales, de dimensions et de matériaux très divers. Les câbles coaxiaux que peut fournir l'industrie ont des propriétés nombreuses et variées et leur prix oscille dans de larges limites. Il existe un grand nombre de manuels, notamment ceux que publient les fabricants de câbles, dans lesquels on trouve les caractéristiques de chaque type de câble coaxial. Il est important d'utiliser un câble coaxial tressé à double blindage.

Un affaiblissement total de 3 dB peut être tout à fait acceptable dans la ligne de transmission d'une antenne de réception. L'utilisation d'un récepteur intégré à la base de l'antenne évite les longs trajets de câbles, réduit l'affaiblissement d'insertion et élimine toute nécessité de recourir à un amplificateur faible bruit dans une unité de commutation.

3.2.8.2 Systèmes de répartition

Après que l'énergie reçue par une antenne a été transmise jusqu'à un point donné, situé à l'intérieur du bâtiment de la station, il s'agit habituellement de l'aiguiller vers diverses positions de réception. Afin d'obtenir les meilleurs résultats, il convient que le système de répartition soit conçu de manière que chaque arrivée de ligne de transmission puisse être branchée sur sa destination finale, selon la nature des observations à effectuer. Il convient, en général, que la puissance du signal soit maintenue à un niveau aussi élevé que possible pour ne pas exiger une sensibilité excessive des récepteurs. Il faut, en outre, que la qualité du signal (rapport S/N) soit conservée, ou que sa dégradation soit aussi faible que possible, afin que les avantages offerts par des antennes à gain élevé et des lignes de transmission à faibles pertes ne soient pas compromis.

Les récepteurs directement connectés en parallèle sur la ligne de transmission dégradent la performance du système de contrôle, sous l'effet, par exemple, des phénomènes suivants: ondes stationnaires, répartition non définie de l'énergie et rayonnement secondaire de l'oscillateur local. Cette méthode n'est pas à recommander, il faut plutôt avoir recours à l'adaptation et à la division des signaux.

A mesure que les techniques évoluent, le nombre d'antennes d'une station de contrôle des émissions augmente, ce qui donne des systèmes de réception et de répartition complexes. Il est parfois nécessaire de recevoir des signaux d'antennes fonctionnant dans différentes bandes de fréquences avec différents récepteurs. Les techniques informatiques ont permis de faire évoluer les systèmes de répartition qui, après avoir été des modules mécaniques, sont devenus des modules numériques.

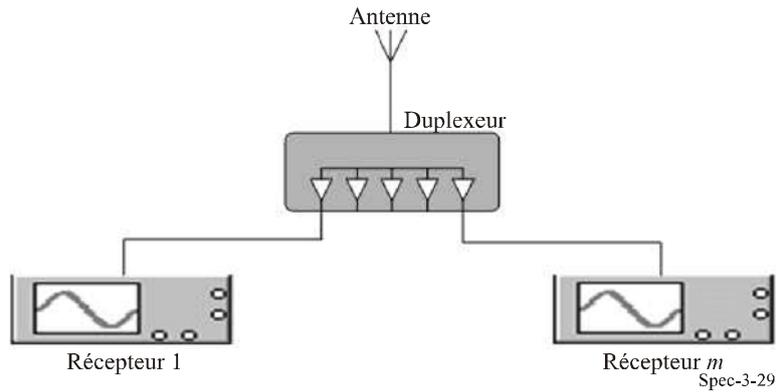
3.2.8.2.1 Principe

Les systèmes de répartition comprennent généralement un commutateur d'antenne et un duplexeur d'antenne. Des techniques de pointe sont utilisées pour combiner les deux et assurer un contrôle à distance par le biais du réseau.

3.2.8.2.1.1 Duplexeur d'antenne

Dans un système récepteur, l'équipement qui diffuse un signal d'une antenne vers un récepteur multicanaux ou plusieurs récepteurs est connu sous le nom de duplexeur. Celui-ci est le premier élément du système récepteur et devrait présenter une bonne linéarité pour réduire au minimum l'intermodulation. La Figure 3-29 montre la connectivité de l'antenne, du système de répartition et de l'équipement d'analyse.

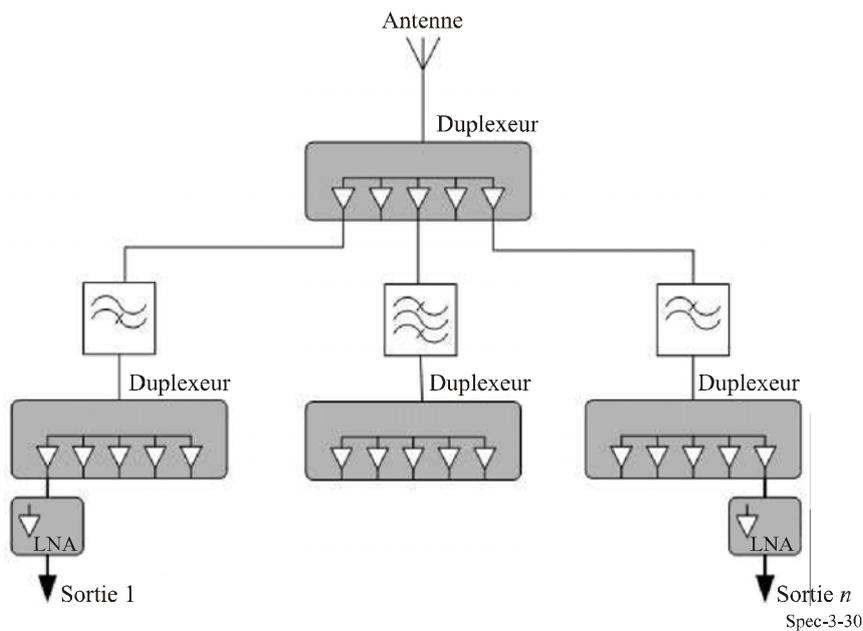
FIGURE 3-29
Exemple de système de répartition



Un duplexeur d'antenne peut comprendre plusieurs duplexeurs et des filtres qui isolent les différents trajets des signaux; un amplificateur faible bruit permet de compenser l'affaiblissement et le circuit de commande. Un schéma fonctionnel d'un duplexeur à trajets multiples est représenté à la Figure 3-30.

En raison de la non-linéarité de certains des éléments, la dégradation du facteur de bruit est inévitable dans le cas d'un duplexeur multiniveau. Par conséquent, pour maintenir la performance, des duplexeurs à deux et à trois niveaux sont largement utilisés. En général, le facteur de bruit et la linéarité se dégradent à mesure que le nombre de sorties augmente.

FIGURE 3-30
Schéma fonctionnel type d'un duplexeur à trajets multiples

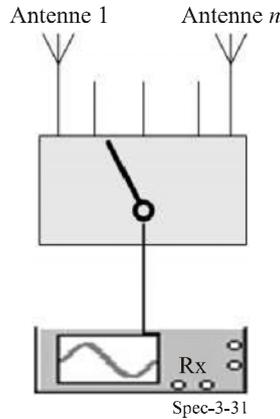


3.2.8.2.1.2 Commutateur d'antenne

Un commutateur d'antenne choisit parmi plusieurs entrées d'antenne un signal d'entrée utile pour un récepteur. Un commutateur d'antenne RF est illustré à la Figure 3-31.

FIGURE 3-31

Commutateur d'antenne type



Comme les duplexeurs d'antennes, un commutateur d'antenne comprend différents éléments pour différentes bandes de fréquences en raison de la limitation des fréquences des éléments, qu'il est nécessaire d'isoler les uns des autres. Les amplificateurs faible bruit servent parfois à compenser l'affaiblissement correspondant.

3.2.8.2.1.3 Système de répartition

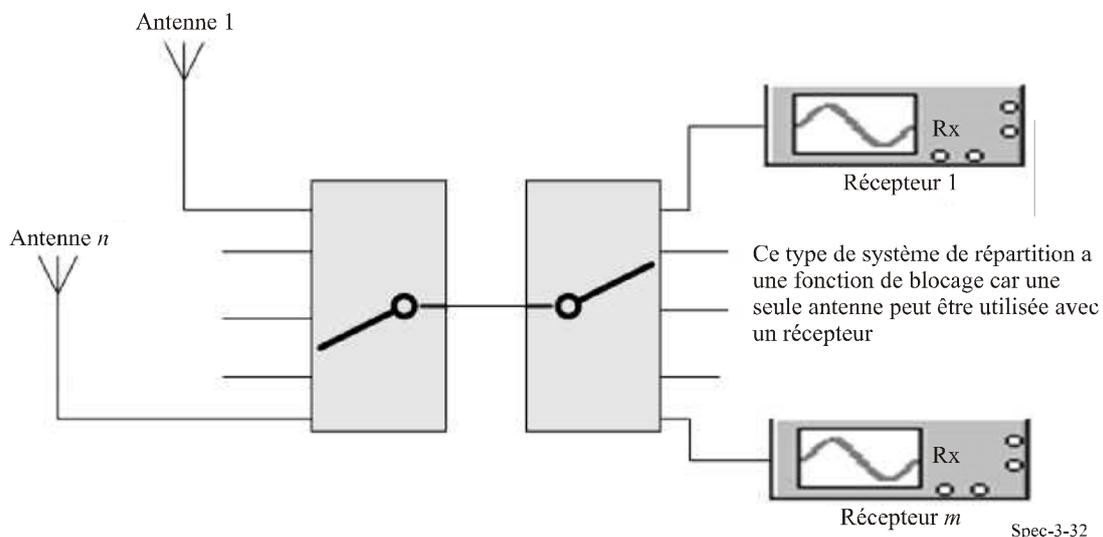
Un système de répartition de signaux RF est utilisé pour répartir les signaux provenant de différentes antennes entre différents récepteurs. Les signaux d'une antenne quelconque sont disponibles pour n'importe lequel des récepteurs; tout signal d'entrée peut être transmis à toute sortie du système de répartition.

Il y a deux types de système de répartition. L'un, connu sous le nom de système de blocage, est analogue à ce que nous voyons dans un système de commutation. Dans ce système, une seule antenne est reliée au récepteur, toute autre tentative de connexion étant bloquée. Un système de répartition de blocage type est représenté à la Figure 3-32.

L'autre type de système, qui est fondé sur une technique plus récente, permet d'établir une connexion entre plusieurs antennes et l'une quelconque d'entre elles, ou entre une antenne et plusieurs récepteurs.

FIGURE 3-32

Système de répartition avec blocage



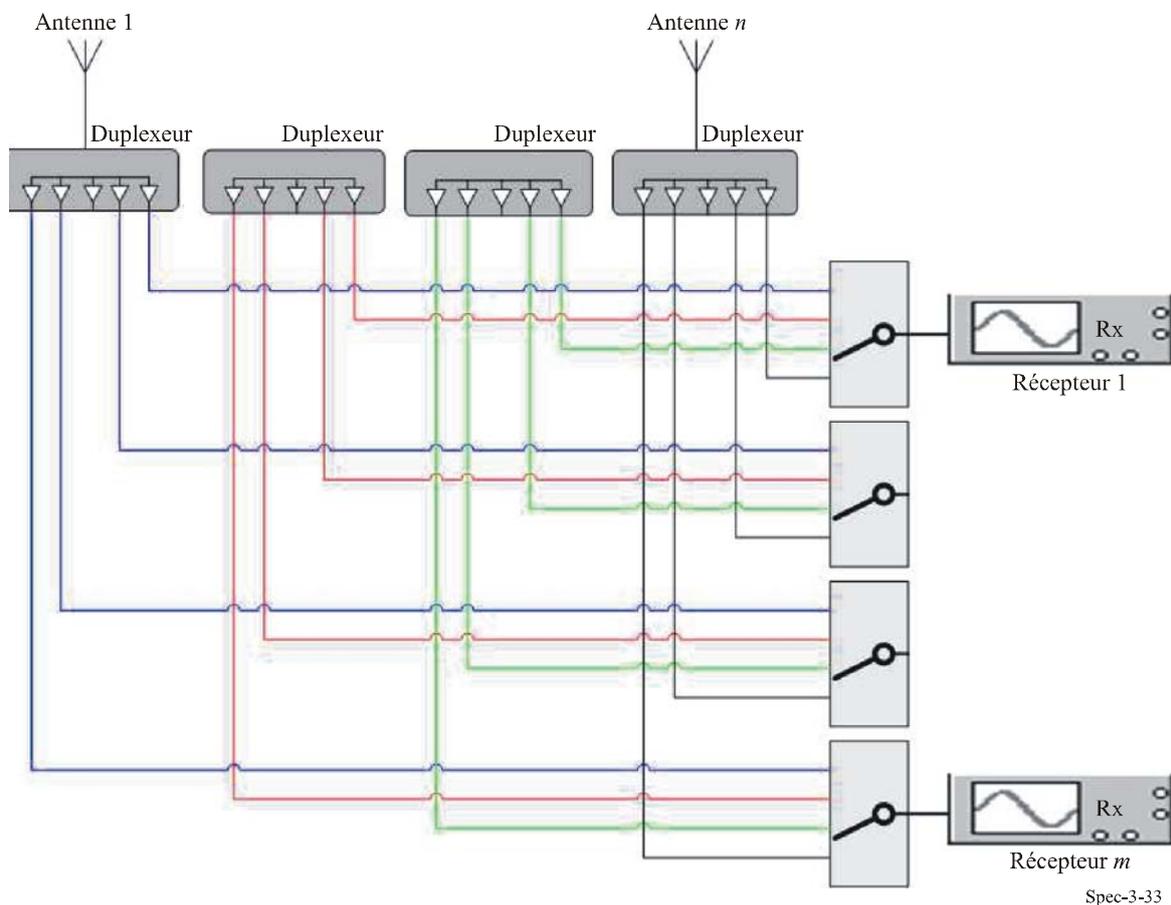
De fait, une matrice $M \times N$ idéale se compose d'un commutateur de M duplexeurs et de N antennes. Chaque antenne fournit ses sorties au duplexeur à n trajets, tandis que les sorties des n trajets du duplexeur sont connectées aux entrées du commutateur de n antennes. Chaque commutateur d'antenne fournira ses sorties aux n récepteurs. Le principe d'une matrice d'antennes sans blocage est illustré à la Figure 3-33.

Par exemple, si un récepteur x doit être relié à une antenne y , le signal de cette antenne sera divisé en m sorties par le duplexeur y et commuté sur le récepteur x par le commutateur d'antenne x .

où:

- n : nombre maximum d'antennes avec duplexeur
- m : nombre maximum de récepteurs
- x : récepteur sélectionné
- y : antenne sélectionnée.

FIGURE 3-33
Système de répartition sans blocage



Spec-3-33

3.2.8.2.2 Performances

Malgré le développement rapide des techniques de traitement numérique des signaux dans le domaine de la détection du signal, de la démodulation et de la radiogoniométrie, les techniques analogiques sont encore indispensables pour la répartition des signaux. Les performances d'un bon système de répartition devraient être optimisées dans des domaines tels que la sensibilité, la dynamique, la commutation du signal RF, la capacité de répartition et l'isolation entre les canaux. Les spécifications d'un système de répartition devraient comprendre les paramètres importants suivants:

- gamme de fréquences;
- affaiblissement d'insertion;
- isolation;
- dynamique;
- produits d'intermodulation du troisième ordre;
- facteur de bruit.

Références bibliographiques

- ASHIKHMIN, A., KOZMIN, V., KOROVIN, A. et REMBOVSKY, A. [2006] Distributed Systems of Radio Monitoring and Direction Finding. *Spetsialnaya Tekhnika*, **5** (<http://www.ircos.ru/eng/articles.htm>).
- HARRINGTON, R. F. [1968] *Field Computation by Moment Methods*. The Macmillan Company, New York, Etats-Unis d'Amérique.
- KHARCHENKO, I. P. et FOMINTSEV, S.S. [2001] Raschet kharakteristik antennikh sistem stantsii radiokontrolya na osnove matematicheskogo modelirovaniya (Calcul des caractéristiques des systèmes d'antennes de stations de contrôle des émissions sur la base de la modélisation mathématique). *Elektrosvyaz*, **9**, Moscou, Fédération de Russie.
- REMBOVSKY, A., ASHIKHMIN, A. et KOZMIN, V. [2006] *Radiomonitoring: Problems, Methods and Equipment*. Moscou, Goriachaya Liniya-Telekom press (<http://www.ircos.ru/eng/articles.htm>).
- TANNER, R.L. et ANDREASEN, M.G. [septembre 1967] Numerical Solution of Electromagnetic Problems. IEEE Spectrum.
- THIELE, G.A. [1973] *Wire Antennas in Computer Techniques for Electromagnetics*, chapitre 2. Pergamon Press, New York, Etats-Unis d'Amérique.

Bibliographie

- AISENBERG, G.Z., IAMPOLSKY, V.G. et TERESHIN, O.N. [1977] *Antenny UKV* (Antennes pour ondes décimétriques). Sviyaz, Moscou, Fédération de Russie.
- AISENBERG, G.Z., BELOUSOV, S.P., JURBENKO, E.M. et autres. [1985] Korotkovolnovye anteny (Antennes pour ondes décimétriques). *Radio i Sviyaz*, Moscou, Fédération de Russie.
- ARRL [2000] *The ARRL Antenna Book*. Newington, CT, Etats-Unis d'Amérique.
- BALANIS, C.A. [1982] *Antenna Theory*. John Wiley and Sons, Etats-Unis d'Amérique.
- BRAULT, R. et PIAT, R. [1962] *Les antennes*. Librairie de la radio, Paris, France.
- DAVIES, K. [1990] *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd, Londres, Royaume-Uni.
- JOHNSON, R.C. [1993] *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- KRAUS, J.D. [1950] *Antennas*. McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- MARKOV, G.T. et SAZONOV, D.M. [1975] *Antenny* (Antennes). Energia, Moscou, Fédération de Russie.
- THOUREL, L. [1956] *Les antennes*. Dunod, Paris, France.
- WATT, A.D. [1967] *VLF Radio Engineering*. Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.
- WEEKS, W.L. [1968] *Antenna Engineering*. McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

Recommandations UIT-R:

NOTE - Dans chaque cas, il convient de consulter la version la plus récente des Recommandations.

Recommandation UIT-R F.162 – Emploi d'antennes à effet directif dans le service fixe fonctionnant dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz environ.

Recommandation UIT-R BS.705 – Caractéristiques et diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception en ondes décimétriques.

3.3 Récepteurs de contrôle des émissions

3.3.1 Généralités

Les performances d'une station de contrôle des émissions sont directement liées à la qualité des équipements de la station, notamment les antennes, les récepteurs, les équipements de radiogoniométrie et les processeurs. Les antennes, les équipements de radiogoniométrie et de traitement sont examinés respectivement aux § 3.2, 3.4 et 3.6.2. Il faudrait un livre entier pour étudier les récepteurs de façon approfondie. On ne trouvera ici qu'un aperçu général portant sur la composition des récepteurs, la définition de leurs principales caractéristiques et les précautions de fonctionnement à prendre.

Un récepteur a pour fonction de choisir un signal radioélectrique parmi tous ceux interceptés par l'antenne à laquelle il est raccordé et de reproduire à la sortie du récepteur les informations transmises par le signal radioélectrique ou ses caractéristiques. Dans le passé, la plupart des récepteurs utilisaient des circuits exclusivement analogiques, mais la plupart des récepteurs modernes sont numériques et utilisent les techniques de traitement du signal numérique pour mettre en œuvre de nombreuses fonctions, allant simplement de la numérisation de la sortie du détecteur à celle de la bande de base complète, notamment la démodulation numérique comme celle effectuée par les systèmes radioélectriques "définis par logiciel". Les deux types de récepteurs (analogique et numérique) sont examinés ci-après.

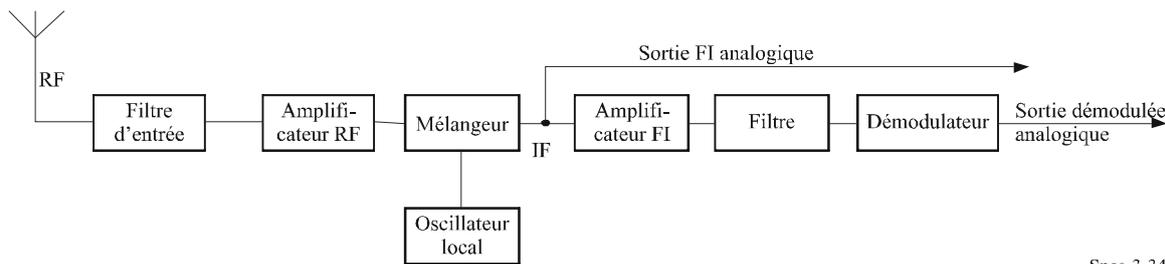
Les améliorations techniques permettent de rendre les récepteurs modernes de plus en plus compacts. La miniaturisation des oscillateurs à stabilité élevée permet de réduire les dimensions de la partie analogique d'un récepteur. Pour ce qui est des récepteurs numériques, la partie numérique devient plus puissante et compacte, grâce à l'amélioration des convertisseurs analogique-numérique, de la mémoire et des processeurs. Les interfaces sont désormais entièrement numériques.

3.3.2 Récepteurs analogiques

Le schéma fonctionnel de la Figure 3-34 montre les principales étapes du fonctionnement d'un récepteur analogique. Le filtre d'entrée, qui est généralement un banc de filtres sous octave à présélecteur ou de poursuite, permet de recevoir les signaux utiles et élimine tous les autres afin d'éviter les intermodulations dans l'amplificateur haute fréquence. Ce filtre devrait donc être accordé sur la fréquence centrale de l'émission que l'on souhaite recevoir et avoir une bande passante suffisamment large pour recevoir la totalité du spectre d'émission utile.

FIGURE 3-34

Schéma fonctionnel type d'un récepteur analogique



Spec-3-34

Le concepteur d'une station de contrôle doit donc tenir compte de la puissance des émissions qui sont vraisemblablement reçues dans la bande passante de ce filtre d'entrée; des signaux autres que celui dont on souhaite la réception risquent de générer des signaux parasites par intermodulation dans l'amplificateur RF et/ou de dégrader la sensibilité de l'amplificateur RF en raison du blocage. Pour éliminer ces effets, l'amplificateur RF doit avoir une linéarité suffisante.

Le filtre d'entrée a aussi pour fonction d'affaiblir la réception sur la fréquence image.

Par son gain, l'amplificateur RF détermine en partie la sensibilité du récepteur, mais il a aussi une autre fonction extrêmement importante: avec le filtre d'entrée, il empêche la transmission du signal de l'oscillateur local jusqu'à l'antenne qui le rayonnerait, produisant ainsi un signal radioélectrique parasite.

Il y a intermodulation entre deux signaux lorsque ces signaux traversent un circuit non linéaire tel qu'il est décrit au § 6.5. Les signaux d'intermodulation peuvent se superposer aux signaux utilisables et les brouiller. La qualité d'un récepteur, du point de vue de l'intermodulation, est caractérisée par la valeur de son point d'interception du troisième ordre qui doit être la plus élevée possible.

La sensibilité du récepteur est limitée par le bruit produit dans ses circuits d'entrée, notamment par l'amplificateur RF et le mélangeur. Cette sensibilité s'exprime également par le facteur de bruit (Tableau 3-2) qui devrait être le plus faible possible. La relation entre la sensibilité et le facteur de bruit, pour le même récepteur, dépend de la bande passante du récepteur.

Lorsqu'un récepteur est relié à une antenne, en plus de son propre bruit, s'ajoutent des bruits naturels d'origine externe: bruit atmosphérique, bruit galactique et bruit solaire ainsi que des bruits artificiels comme les brouillages d'origine industrielle, les rayonnements des appareils électroniques et les rayonnements des émetteurs, plus généralement. Le concepteur d'une station de contrôle des émissions doit donc choisir le récepteur du point de vue de sa sensibilité, en fonction des niveaux de bruit mesurés.

On notera qu'un récepteur très sensible aura des caractéristiques de fonctionnement médiocres en ce qui concerne la linéarité, c'est-à-dire l'intermodulation et le blocage. Le blocage caractérise la dégradation de la sensibilité du récepteur et peut être dû à un seul signal non désiré situé à proximité de la porteuse utile et en dehors de la bande passante du récepteur FI.

Pour cette raison, les récepteurs de contrôle comportent généralement des préamplificateurs à gain commutable ou programmable, ce qui leur permet de fonctionner en mode "sensibilité élevée" (le préamplificateur étant activé) ou en mode "linéarité élevée/faible distorsion" (le préamplificateur étant désactivé).

D'autres caractéristiques doivent être spécifiées ou analysées. Par exemple:

- les largeurs de bande des filtres à fréquence intermédiaire;
- les types de démodulation nécessaires;
- l'efficacité de la commande automatique de gain;
- l'efficacité du système automatique de réglage d'accord;
- la réponse en fréquence des circuits qui traitent les signaux démodulés;
- la précision et le degré de lisibilité des indications affichées; et
- les variations des caractéristiques en fonction de la température.

On utilise normalement deux types de récepteurs pour couvrir les gammes de fréquences comprises entre 9 kHz et 3 000 MHz, l'un pour les fréquences allant jusqu'à 30 MHz et l'autre pour les fréquences comprises entre 20 et 3 000 MHz. S'il faut couvrir une gamme de fréquences étendue (par exemple, jusqu'à 40 GHz), on peut avoir besoin d'équipements supplémentaires. Pour choisir les récepteurs, il faut tenir compte des divers types de modulation à contrôler, par exemple MA, ondes entretenues, BLU, BLI, MDF et MF et prévoir les moyens nécessaires pour la réception de ces émissions.

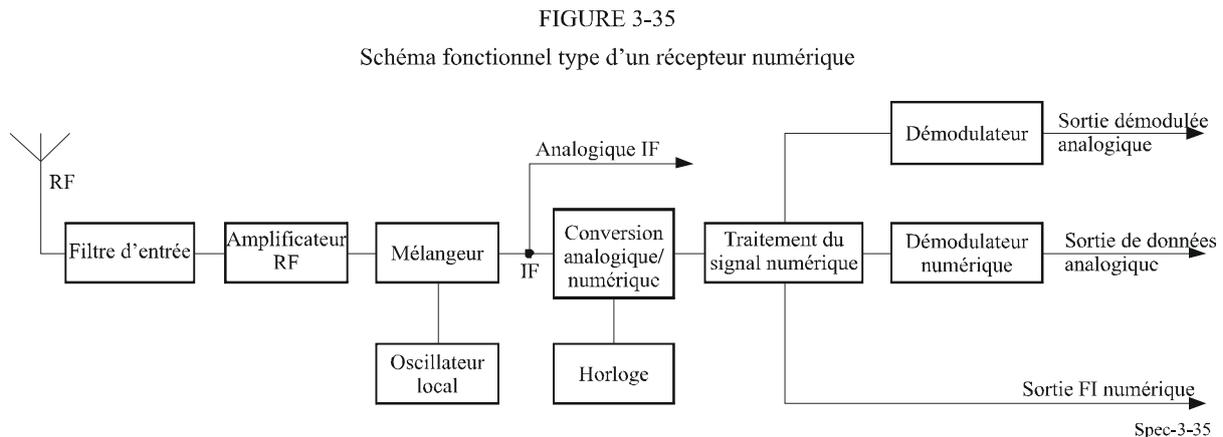
Toutes les qualités attendues des récepteurs utilisés dans une station de réception principale doivent se retrouver dans les récepteurs de contrôle des émissions, lesquels doivent avoir en plus une bonne précision de réglage des fréquences (supérieure ou égale à 1 Hz), une syntonisation rapide et un minimum de commutation entre les bandes d'ondes.

Il faut aussi prévoir le branchement de modules supplémentaires: claviers de télécopieurs, oscilloscopes, adaptateurs panoramiques, etc. La sortie FI des récepteurs doit se faire avec faible impédance, par interposition d'étages tampons. Si l'on veut une stabilité à long terme en haute fréquence, il est utile de prévoir une entrée pour un étalon de fréquence externe (voir le § 3.3.4). Il est nécessaire également de pouvoir insérer un affaiblisseur à l'entrée du récepteur, afin d'éliminer les fréquences parasites produites par des signaux de niveau élevé saturant les étages d'entrée du récepteur. On prévoira aussi des interfaces pour la télécommande et la sortie des données.

3.3.3 Récepteurs numériques

Avec l'apparition des puces permettant le traitement rapide et économique de signaux numériques ou traitement DSP (*digital signal processing*) et des convertisseurs analogique/numérique à grande dynamique, il est devenu possible de réaliser des récepteurs extrêmement performants, équipés de circuits numériques en lieu et place de circuits analogiques. Ces "récepteurs numériques" ont des caractéristiques améliorées en matière de changement de fréquence, filtrage et démodulation, d'où sélectivité et stabilité accrues et commande automatique de gain plus efficace. Ils possèdent des fonctions supplémentaires qu'on ne trouve pas dans les récepteurs analogiques: suppression adaptative du brouillage, amélioration et reconnaissance de la parole. Ces fonctions sont de la plus haute importance, surtout lorsqu'on essaie de trier et d'identifier des signaux spécifiques dans un paquet composé de nombreux signaux. Grâce à l'utilisation de circuits numériques et d'algorithmes logiciels associés, les caractéristiques de fonctionnement de ces récepteurs ne varient pas avec le temps et la température. Une des qualités les plus typiques des récepteurs numériques est leur grande souplesse d'utilisation, par exemple leur aptitude à accepter des formats de modulation complexes comme ceux qui sont mis en œuvre couramment sur les liaisons cellulaires et les liaisons de commande à grande performance. En modifiant le logiciel, il est possible d'introduire dans un circuit de type DSP une largeur de bande FI additionnelle, des modes de démodulation supplémentaires ou d'autres fonctions – opérations qui nécessiteraient des remplacements de matériel coûteux dans les récepteurs analogiques. Le traitement numérique permet la synthèse des filtres, donnant des filtres à facteur de forme extrêmement précis, tout en maintenant une réponse en amplitude très uniforme et une réponse en phase linéaire dans la bande passante souhaitée. Ce processus a pour effet de réduire à un minimum la distorsion que les filtres analogiques infligent généralement aux signaux. Il est possible également de réaliser des filtres très étroits (moins de 50 Hz) qui permettent de mesurer directement les composantes parasites des porteuses des émetteurs, par exemple le ronflement produit par les lignes de transport d'énergie.

La Figure 3-35 montre les éléments de base d'un récepteur numérique: l'étage d'accord RF, le numériseur FI, le processeur de signaux et le module de reconstitution des signaux analogiques.



La première opération de traitement importante dans un récepteur numérique est la conversion du signal RF utile en signal numérique. Cette opération est effectuée en collaboration par l'étage d'accord RF et le numériseur FI. L'étage d'accord, y compris le module de présélection analogique, transfère la partie utile du spectre RF à un module à large bande, ou pré-FI, pour traitement par le numériseur FI. Ce dernier utilise un convertisseur analogique-numérique ou convertisseur A/D (*analog-to-digital converter*), ou d'autres circuits pour numériser le signal FI provenant de l'étage d'accord RF. Le signal numérisé ainsi obtenu est utilisé par le processeur de signaux pour exécuter des fonctions telles que le filtrage, le réglage d'accord fin et la démodulation. Le signal de sortie numérique du module est alors disponible pour le traitement ultérieur et/ou l'enregistrement. Le module de reconstitution des signaux analogiques convertit les signaux de sortie numériques en analogique pour le contrôle par l'opérateur ou pour le traitement ultérieur.

Les caractéristiques du récepteur qui sont énumérées au § 3.3.2 s'appliquent aux récepteurs numériques. Les récepteurs destinés à contrôler le spectre conformément aux Recommandations UIT-R devraient assurer les fonctions suivantes:

- balayage des gains de fréquence préalablement définis;
- balayage de la mémoire de plusieurs centaines de canaux;
- contrôle audio des transmissions MF, MA, en ondes entretenues, BLU, BLI, MDA, MDF, MDP, QI et par impulsions;
- identification;
- stockage des valeurs mesurées en vue d'une utilisation ultérieure aux deux téléchargements.

Le traitement de ces différentes fonctions pour les divers signaux disponibles, avec un rapport S/N optimal, nécessite l'utilisation d'un grand nombre de largeurs de bande FI.

Les récepteurs de contrôle numérique modernes comprennent un panneau d'affichage et une unité de commande, en général un PC avec un logiciel qui fournit un tableau de commande virtuel ou une unité de commande intégrée. Le récepteur dispose d'une interface distante, ainsi que d'un LAN (Ethernet) qui assure le fonctionnement local et le fonctionnement télécommandé. Un récepteur de contrôle des émissions doit satisfaire à tous les impératifs imposés à un récepteur en ce qui concerne la mesure de fréquences et le décalage de fréquences, l'intensité de champ, la modulation, la largeur de bande et l'occupation du spectre. Pour l'occupation du spectre, le récepteur doit balayer la gamme de fréquences considérée avec une commande numérique et afficher le spectre associé.

Les récepteurs numériques peuvent être livrés séparément, mais ils sont souvent intégrés dans le système de mesure et de traitement (voir § 3.6.2). Ils comportent un certain nombre d'interfaces, par exemple: sortie FI numérique, sortie I/Q pour la radiogoniométrie, sortie FI large bande pour un affichage panoramique extérieur, sortie pour haut-parleurs externes, prise pour casque.

Au moyen d'un convertisseur abaisseur numérique, un signal choisi est mélangé à la baisse en bande de base pour faire l'objet d'autres traitements (démodulation, décodage, identification, mesure des paramètres de modulation). Grâce une série de convertisseur abaisseurs disposés en parallèle (mis en œuvre par exemple dans les technologies FPGA, DSP ou ASIC), de nombreux signaux peuvent être mélangés à la baisse et traités en parallèle. Chaque convertisseur abaisseur peut être accordé dans la gamme de fréquences couverte par les fréquences FI large bande et fonctionne comme un récepteur virtuel. Cette technique est particulièrement utile pour le traitement des signaux enregistrés dans un dispositif FI large bande numérique, le signal FI numérique étant renvoyé vers le récepteur large bande et les convertisseurs abaisseurs étant utilisés pour choisir les signaux qu'il est utile de traiter.

Cette technique de traitement permet de détecter et d'analyser des émissions de courte durée telles que les signaux de saut de fréquence. Les rafales des émetteurs à saut de fréquence sont reçues par le récepteur large bande (en direct ou en différé) et détectées au moyen d'un algorithme de détection automatique. Les convertisseurs abaisseurs permettent de mélanger à la baisse les sauts en bande de base et de les analyser (longueur exacte, largeur de bande, paramètres de modulation). Un processus d'évaluation des informations mesurées concernant toutes les rafales détectées détermine les différents types de rafales, les différentes récurrences des sauts et les ensembles de sauts (jeux de fréquences) des émetteurs. Cette analyse statistique donne des renseignements sur les cas de figure en matière de sauts comme le nombre d'émetteurs à saut de fréquence actifs et les types de méthodes de communication utilisées.

3.3.4 Synthétiseurs de fréquences pour récepteurs

Une des composantes essentielles du récepteur est le synthétiseur de fréquences. Il a pour principale fonction de fournir une source normalisée d'énergie RF dont la fréquence, le niveau de puissance et les caractéristiques de modulation sont connus avec exactitude. La précision requise pour une fréquence utilisée pour le contrôle des systèmes de réception modernes devient de plus en plus stricte et c'est la raison pour laquelle le synthétiseur doit fonctionner avec la plus grande précision et la plus grande stabilité possible.

3.3.5 Spécifications types des récepteurs de contrôle

Un récepteur de contrôle devrait généralement répondre aux spécifications ayant trait aux récepteurs pour ondes myriamétriques/kilométriques/décamétriques et métriques/décimétriques figurant dans le Tableau 3-2. Celui-ci s'applique aux récepteurs analogiques et numériques. Ces spécifications devraient aussi être considérées comme une orientation générale pour le choix d'équipements capables de présenter de bonnes performances et de fonctionner de manière fiable pour les opérations exigées par un système de contrôle. Pour certaines applications, il est possible de trouver dans le commerce un équipement plus simple qui pourrait convenir compte tenu de l'application voulue.

Certains paramètres de réception mentionnés dans le Tableau 3-2, par exemple le point d'interception du troisième ordre, le facteur de bruit et les paramètres de filtrage, sont si importants et ont une incidence si directe sur l'adéquation d'un récepteur pour certaines opérations de contrôle, que leurs procédures de spécification et de mesure sont définies dans des Recommandations UIT-R. Les résultats des mesures sont largement tributaires des procédures d'essais utilisées, les procédures normalisées permettant de comparer plus facilement et plus objectivement les produits des fabricants. La vitesse d'exploration requise pour diverses mesures, qui est décrite dans la Recommandation UIT-R SM.1839, dépend fortement du but et de l'application de la mesure; par exemple, la vitesse d'exploration du récepteur nécessaire pour détecter la présence d'une seule rafale de signaux est bien plus grande que celle d'un récepteur destiné à mesurer tel ou tel paramètre ou caractéristique du signal.

TABLEAU 3-2

Spécifications types pour les récepteurs de contrôle à usage général

Fonction	Ondes myriamétriques/kilométriques/décamétriques	Ondes métriques/décimétriques
Gamme de fréquences	9 kHz à 30 MHz	20 MHz à 3 000 MHz
Résolution de réglage d'accord	≤ 1 Hz	≤ 10 Hz
Erreur de réglage d'accord	≤ 1 ppm, ou ≤ 0,01 ppm en utilisant un positionnement mondial par satellite ¹ pour référence externe	≤ 0,1 ppm, ou ≤ 0,001 ppm en utilisant un positionnement mondial par satellite ⁽¹⁾ pour référence externe
Vitesse de réglage du synthétiseur	≤ 10 ms	≤ 5 ms
Entrée (entrée d'antenne) Taux d'ondes stationnaire	50 Ω, nominal ≤ 3	50 Ω, nominal ≤ 2,5
Présélection (les récepteurs hautement linéaires peuvent satisfaire les spécifications d'intermodulation sans présélection)	Ensemble de filtres à sous-octave ou filtre de poursuite	Ensemble de filtres à sous-octave ou filtre de poursuite
Point d'interception de 3 ^{ème} ordre	≥ 20 dBm (> 3 MHz) ⁽¹⁾	≥ 10 dBm ⁽¹⁾
Point d'interception de 2 ^{ème} ordre	≥ 60 dBm (> 3 MHz)	≥ 40 dBm
Facteur de bruit	≤ 15 dB (> 2 MHz) ⁽²⁾	≤ 12 dB ⁽²⁾
Bruit de phase de l'oscillateur local	Voir ci-après	Voir ci-après
Rejet FI	≥ 80 dB	≥ 80 dB
Rejet de l'image	≥ 80 dB	≥ 80 dB
Largeurs de bande FI (–6 dB)	Filtres internes ou externes, de préférence numériques entre 0,1 et au moins 10 kHz ⁽³⁾	Filtres internes ou externes, de préférence numériques entre 1 kHz et au moins 300 kHz ⁽³⁾
Sélectivité de 60 à 6 dB (facteur de forme)	2:1 ⁽³⁾	2:1 ⁽³⁾
Modes de détection (dans les récepteurs numériques, la démodulation peut être effectuée en DSP interne ou externe)	MA, MF, ondes entretenues, bandes latérales inférieures, bandes latérales supérieures	MA, MF, ondes entretenues, bandes latérales inférieures, bandes latérales supérieures
Gamme CAG (dans les récepteurs numériques, peut être mise en œuvre en partie en DSP interne ou externe)	≥ 120 dB	≥ 120 dB
Sorties – FI	Sortie FI numérique	Sortie FI numérique
Audio	0 dBm, 600 Ω, ou jack audio diffusion en mode continu et écouteur	0 dBm, 600 Ω, ou jack audio diffusion en mode continu et écouteur
Moniteur FI	Pour moniteur FI externe, ou flux de données numériques	Pour moniteur FI externe, ou flux de données numériques
Télécommande	LAN Ethernet ou GPIB ou RS-232	LAN Ethernet ou GPIB ou RS-232
Spectre FI (peut être réalisé en DSP)	Intégré ou externe, traitement FFT; rafraîchissement ≥ 10/s	Intégré ou externe, traitement FFT; rafraîchissement ≥ 10/s
Spectre RF (peut être réalisé en DSP)	Intégré ou externe; rafraîchissement ≥ 10/s	Intégré ou externe; rafraîchissement ≥ 10/s
Affichage du spectre RF et du spectre FI	Local ou télécommandé	Local ou télécommandé
Compatibilité électromagnétique	CEI 61000-4-2, –3, –4 CISPR 11, groupe 1, classe B	CEI 61000-4-2, –3, –4 CISPR 11, groupe 1, classe B
Gamme des températures de fonctionnement	0° à 45° C	0° à 45° C
Humidité relative	95% sans condensation	95% sans condensation
Vibration	CEI 68-2-6	CEI 68-2-6

⁽¹⁾ Procédures de mesure selon la Recommandation UIT-R SM.1837.⁽²⁾ Procédures de mesure selon la Recommandation UIT-R SM.1838.⁽³⁾ Procédures de mesure selon la Recommandation UIT-R SM.1836.

Bruit de phase

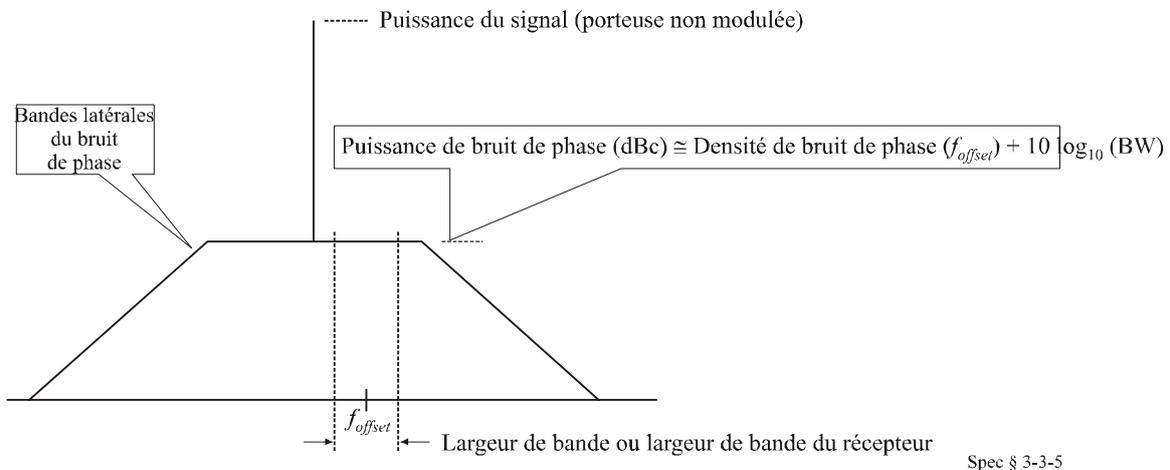
La performance d'un récepteur en matière de bruit de phase influe directement sur la capacité à traiter des signaux rapprochés de différentes amplitudes. Le bruit de phase peut aussi empêcher une démodulation précise. Il module les signaux reçus en augmentant leur largeur de bande. Deux signaux adjacents dont les spectres peuvent ne pas se chevaucher à l'entrée du récepteur peuvent se brouiller mutuellement dans le récepteur, une fois modulés par le bruit de phase du récepteur.

Le bruit de phase a un effet multiplicateur et est donc défini comme étant une densité de bruit par rapport à une porteuse (dBc/Hz); plus le signal est puissant, plus le bruit de phase l'est aussi. Le bruit de phase produit l'effet le plus marqué sur les signaux rapprochés de puissances inégales.

Le signal le plus puissant aura une plus grande puissance dans les bandes latérales du bruit de phase et, partant, une incidence plus forte sur la détection ou la démodulation du signal adjacent plus faible que ce n'est le cas dans le sens contraire. Pour les signaux puissants, le bruit de phase limite la dynamique du récepteur.

La densité du bruit de phase est généralement définie à des décalages de fréquences fixes tels que 10 kHz ou 100 kHz. Elle est en principe la plus forte à de faibles décalages de fréquences. Pour cette raison, les prescriptions relatives au bruit de phase sont en grande partie déterminées par les types de signaux à surveiller. Elles sont plus strictes pour les signaux à bande étroite que pour les signaux à large bande, de sorte que les spécifications applicables au récepteur dépendront principalement de la porteuse (ou sous-porteuse) la plus étroite à contrôler.

A supposer que le spectre du bruit de phase soit relativement plat sur la largeur de bande, on peut estimer la dynamique à proximité d'un signal important de la manière suivante:



Spec § 3-3-5

Exemple d'application de l'équation ci-dessus:

Largeur de bande ou largeur de bande du récepteur	Bruit de phase	$f_{décalage}$	Puissance de bruit de phase
25 kHz	-100 dBc/Hz	10 kHz	-56 dBc

Le décalage de fréquence et les largeurs de bande requises influent sur la puissance du bruit de phase. Les applications en ondes décimétriques peuvent exiger des largeurs de bande plus étroites alors qu'en ondes décimétriques, il se peut que les largeurs de bande doivent être plus grandes.

Références bibliographiques

Textes de l'UIT-R:

NOTE – Dans chaque cas, il convient de consulter la version la plus récente des Recommandations.

Recommandation UIT-R SM.331 – Bruit de fond et sensibilité des récepteurs.

Recommandation UIT-R SM.332 – Sélectivité des récepteurs.

Recommandation UIT-R SM.1836 – Procédure d'essai pour mesurer les propriétés du filtre FI des récepteurs de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.1837 – Procédure d'essai pour mesurer le niveau du point d'interception de troisième ordre (IP3) des récepteurs de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.1838 – Procédure d'essai pour mesurer le facteur de bruit des récepteurs de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.1839 – Procédure d'essai pour mesurer la vitesse d'exploration des récepteurs de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.1840 – Procédure d'essai pour mesurer la sensibilité des récepteurs de contrôle des émissions à l'aide de signaux analogiques modulés.

Rapport UIT-R SM.2125 – Paramètres et procédures de mesure des récepteurs et des stations de contrôle du spectre dans les bandes des ondes décimétriques, métriques et décimétriques.

3.4 Radiogoniométrie

3.4.1 Généralités

L'identification d'une station d'émission inconnue peut être facilitée s'il est possible de déterminer l'emplacement de l'émetteur par triangulation en localisation avec une seule station (SSL, *single station location*) à l'aide d'un équipement de radiogoniométrie. Pour déterminer cet emplacement de façon plus précise, il faut que des relèvements soient effectués par plusieurs stations radiogoniométriques situées en des points géographiques adéquats. Les conditions idéales pour déterminer une position (point d'intersection des lignes de relèvement) sont celles où trois stations radiogoniométriques – qui ne sont pas situées forcément dans le même pays – travaillent en coopération. Dans une station de contrôle dotée des moyens nécessaires pour effectuer des relèvements, un opérateur expérimenté trouvera des informations qui lui permettront d'identifier les émissions avec un niveau de confiance plus élevé.

Le degré de complexité de l'équipement radiogoniométrique dépend de la précision requise et des conditions locales (voir § 4.7). L'antenne de radiogoniométrie doit être installée à l'écart des bâtiments, des antennes, des lignes téléphoniques et de distribution d'énergie, et autres points élevés. En conséquence, elle devra ne pas être placée au voisinage immédiat de la station de contrôle des émissions, ou, peut-être, installée à part dans un endroit d'où elle puisse être télécommandée.

La précision des relèvements dépend des facteurs suivants (qui ne sont pas classés par ordre d'importance):

- ouverture de l'antenne (voir § 3.4.2);
- configuration de l'antenne, notamment le nombre d'éléments d'antenne, leur organisation en bandes de fréquences, leur directivité et d'autres facteurs;
- type d'équipement radiogoniométrique;
- nombre de canaux de réception;
- nature de l'emplacement;
- intensité du signal et rapport S/N ;
- temps d'intégration;
- conditions de propagation;
- niveau du brouillage.

Dans la gamme des ondes décimétriques (1-30 MHz), le système SSL permet de déterminer la position d'un émetteur avec un seul radiogoniomètre qui mesure l'élévation ainsi que l'angle d'azimut d'arrivée. En traitant les données fournies par le goniomètre (azimut, élévation, position) et en tenant compte des prévisions de la propagation ionosphérique, on peut faire une estimation de la distance qui sépare l'émetteur de la station radiogoniométrique. Le système SSL permet par conséquent d'effectuer la localisation dans les cas où il n'est pas possible de mettre en place un système complet de localisation par radiogoniométrie et triangulation, pour des raisons d'ordre géographique, de calendrier et de disponibilité ou bien lorsque le signal considéré ne peut pas être reçu par plusieurs stations.

Pour plus de renseignements, on se reportera à la Recommandation UIT-R SM.854 – Radiogoniométrie et détermination de la localisation dans les stations de contrôle, et au § 4.7.

3.4.2 Antennes

L'antenne de radiogoniométrie est l'une des composantes les plus importantes d'un équipement de radiogoniométrie car elle définit dans une large mesure la précision de radiogoniométrie. L'ouverture du réseau d'antenne (D/λ ; D = diamètre du réseau d'antenne, λ = longueur d'onde du signal reçu) joue un rôle très important pour déterminer la précision du relèvement. Les antennes de radiogoniométrie caractérisées par $D/\lambda > 1$, dites antennes à grande ouverture, surmontent les problèmes dus à la propagation par trajets multiples et à d'autres effets de propagation, au bruit, aux brouillages, à l'irrégularité de l'emplacement et à d'autres sources d'erreur, offrant un rapport S/N plus élevé, des erreurs de radiogoniométrie plus faibles, une plus grande immunité contre les réflexions, une sensibilité plus élevée et un temps d'intégration plus court pour un niveau de précision donné que les antennes à ouverture étroite ($D/\lambda < 0,5$). Toutes les méthodes de radiogoniométrie ne permettent pas d'utiliser des antennes à grande ouverture, mais dans les cas où elles peuvent être utilisées, elles donnent les résultats de radiogoniométrie les plus précis.

Chaque antenne de radiogoniométrie se compose d'un certain nombre d'éléments (au minimum 3). Selon la méthode de radiogoniométrie, il existe diverses configurations du réseau d'antenne de radiogoniométrie. Les antennes à plus large ouverture ont généralement plus d'éléments qui remplissent l'ouverture et évitent les ambiguïtés; l'erreur de probabilité introduite par le bruit aléatoire tend à diminuer d'une quantité égale à la réciproque de la racine carrée du nombre d'éléments. Dans la bande des ondes décimétriques, on utilise couramment des antennes-réseaux linéaires en "L" ou en "X" et dans la gamme des ondes métriques et décimétriques, on utilise essentiellement des antennes-réseaux circulaires. Selon la méthode de radiogoniométrie utilisée, il est possible de couvrir une gamme de fréquences étendue avec une seule antenne-réseau ou bien il faut partager cette gamme de fréquences en un certain nombre de sous-gammes.

On fait en général la distinction entre antennes de radiogoniométrie pour applications fixes et antennes pour applications mobiles. Le type d'éléments d'antennes dépend de la gamme de fréquences et de l'application: dans la gamme des ondes décimétriques, on utilise des réseaux d'antennes unipolaires ou d'antennes-cadres croisées pour les systèmes fixes alors que pour les applications mobiles, les antennes utilisent soit des cadres soit des éléments en ferrite (voir § 3.2.3.1). Dans la gamme des ondes métriques et décimétriques, on utilise essentiellement des réseaux d'antennes doublets ou d'éventails (voir § 3.2.4.1).

3.4.3 Equipement

L'équipement de radiogoniométrie peut être intégré à l'équipement de mesure dans une station de contrôle des émissions (voir § 3.6.2) ou peut être constitué par des unités distinctes. Pour les unités portables, voir § 3.2.7. La gamme de fréquences couverte par un équipement de radiogoniométrie ne dépend pas seulement de l'antenne, mais aussi des récepteurs qui font partie de l'équipement. Concrètement, il y a un équipement de radiogoniométrie pour les ondes hectométriques/décimétriques (par exemple, entre 0,3 et 30 MHz) et un équipement pour les ondes métriques/décimétriques (par exemple, 20 à 3 000 MHz).

Le nombre de récepteurs peut varier de 1 à n où n est le nombre des éléments qui constituent une antenne-réseau de radiogoniométrie, ce nombre dépendant également de la méthode de radiogoniométrie. Les systèmes à récepteurs multiples ont besoin d'un temps d'intégration moindre et/ou d'un rapport S/N moins élevé pour offrir une précision donnée et ils ont donc un temps de réaction plus rapide que les systèmes à un seul canal. Si l'on utilise plus de récepteurs, tous les récepteurs doivent être syntonisés sur un seul et même oscillateur. Dans les récepteurs modernes, la fréquence intermédiaire est traitée sous forme numérique. Caractéristique très importante, la sélectivité du récepteur permet d'éviter toute interaction entre deux signaux adjacents. L'un des récepteurs devrait offrir la possibilité de démoduler le signal modulé reçu.

Pour certaines méthodes de radiogoniométrie, il faut étalonner les récepteurs, le système de répartition RF et les antennes à certains intervalles de temps. A cette fin, le signal défini sera injecté en parallèle sur les trajets de réception et, après mesure de l'amplitude et de la phase pour chaque trajet, des mesures correctives sont prises pour rétablir les caractéristiques identiques pour chaque canal si nécessaire. Une caractéristique très importante est la possibilité de télécommander l'équipement sur n'importe quelle distance. Les interfaces pour les RS-232, RNIS, LAN et WAN et autres liaisons téléphoniques cellulaires sont communes.

3.4.4 Nombre de récepteurs

La présente section compare les systèmes radiogoniométriques disposant de divers nombres de canaux de réception, compte tenu des avantages et inconvénients de chaque système. Un système radiogoniométrique peut comprendre un récepteur à un seul canal, à deux canaux, à trois canaux ou un récepteur qui comporte autant de canaux qu'il y a d'éléments d'antenne. Les systèmes dotés d'au moins deux canaux de réception mais d'un nombre de canaux inférieur au nombre d'antennes sont désignés sous le nom de systèmes multicanaux. Les systèmes dont le nombre de canaux de réception est égal au nombre d'antennes sont appelés systèmes à N -canaux, N étant le nombre de canaux de réception et d'antennes.

3.4.4.1 Systèmes à un seul canal

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Un seul canal de réception est nécessaire – Il y a moins de câblage entre l'antenne radiogoniométrique et l'équipement – Pas d'adaptation/d'étalonnage de phase nécessaire – Pour la radiogoniométrie à canal unique fondée sur l'<i>interférométrie</i> recourant à des circuits de multiplexage, une mesure de phase précise est possible 	<ul style="list-style-type: none"> – Le nombre de commutations et le temps d'échantillonnage connexe exigent considérablement plus de temps de mesure que les systèmes radiogoniométriques à plusieurs canaux – Sensibilité aux rapides variations de phase des signaux, qui peut produire de mauvaises données et/ou des temps d'intégration prolongés – Si des circuits de multiplexage sont utilisés, le commutateur d'antenne est complexe

Les systèmes radiogoniométriques à un seul canal peuvent se subdiviser en deux groupes:

- les systèmes radiogoniométriques à un seul canal simples, où chaque élément d'antenne est échantillonné séquentiellement avec un canal de réception; et
- les systèmes à un seul canal fonctionnant par interférométrie ou multiplexés, où l'élément d'antenne de référence est échantillonné avec chaque autre élément d'antenne, les deux signaux étant combinés et acheminés vers un canal de réception.

Dans les deux cas, après chaque commutation, le filtre FI du récepteur doit pouvoir se stabiliser avant l'échantillonnage de la tension. Le temps d'échantillonnage total dépend du temps de stabilisation du filtre, qui est lié à sa largeur de bande et au nombre d'éléments d'antenne. Il est notablement plus long dans les systèmes à un seul canal que dans ceux qui ont plusieurs canaux de réception.

Pendant le délai d'échantillonnage d'un système à un seul canal, l'onde signal peut changer à cause d'une modification de la modulation interne du signal ou des effets du milieu de propagation comme l'évanouissement, les trajets multiples et les réflexions qui se produisent pendant l'échantillonnage séquentiel des éléments du réseau. Ces modifications de l'onde au cours du processus de commutation séquentiel peuvent introduire des erreurs dans les systèmes à un seul canal, car elles peuvent ne pas être différenciées des changements du signal qui découlent d'un échantillonnage des antennes ayant des diagrammes différents ou des orientations différentes du faisceau principal. Les systèmes à un seul canal ne peuvent traiter que les erreurs introduites par ce mécanisme au moyen de la mesure du signal pendant des périodes suffisamment longues pour établir une moyenne des effets. Lorsque le délai de calcul de la moyenne n'est pas suffisant, comme dans le cas des signaux de courte durée, les systèmes à un seul canal peuvent être perturbés, mais il est possible de construire des systèmes radiogoniométriques à un seul canal qui satisfont au critère du délai de réponse de 10 ms, ainsi qu'il est décrit au § 4.7.1.1.16.

3.4.4.1.1 Systèmes radiogoniométriques à un seul canal simples

Les systèmes radiogoniométriques à un seul canal simples échantillonnent séquentiellement chaque élément d'antenne. Au contraire des systèmes radiogoniométriques à un seul canal fondés sur l'interférométrie et utilisant des circuits de multiplexage, ces systèmes ne mesurent et ne traitent que l'amplitude. La phase n'est pas mesurée. Les systèmes qui ne font pas usage des informations de phase dans l'onde d'arrivée sont intrinsèquement moins précis que ceux qui utilisent toutes les informations disponibles de l'onde d'arrivée.

3.4.4.1.2 Systèmes radiogoniométriques à un seul canal fondés sur l'interférométrie ou multiplexés

Les systèmes radiogoniométriques à un seul canal fondés sur l'interférométrie ont recours à une technique de multiplexage en quadrature, qui permet de mesurer l'amplitude et la phase, puisque l'élément de référence de phase est toujours mesuré avec tous les autres éléments d'antenne.

Au cours du processus de mesure, pendant lequel tous les éléments d'antenne sont échantillonnés les uns après les autres, l'amplitude du signal pourrait changer en raison d'une modification de la modulation interne du signal ou des effets du moyen de propagation comme l'évanouissement, les trajets multiples et les réflexions. Pour éviter une diminution de la précision, il est nécessaire d'effectuer d'autres calculs de moyennes. En outre, la différence d'amplitude entre deux éléments d'antenne ne peut pas être simultanément mesurée et ne peut être obtenue que par un calcul des moyennes dans le temps, avec une perte d'informations qui seraient utiles dans les systèmes qui ont recours à des éléments d'antenne directifs.

Après chaque commutation entre éléments d'antenne et dans le multiplexeur en quadrature, le filtre FI du récepteur doit pouvoir se stabiliser avant l'échantillonnage de la tension. Le temps d'échantillonnage total dépend du temps de stabilisation du filtre, qui est lié à sa largeur de bande et au nombre d'éléments d'antenne. Il est notablement plus long dans les systèmes à un seul canal fondés sur l'interférométrie que dans les systèmes à un seul canal simples.

3.4.4.2 Systèmes multicanaux (un canal de référence et un ou plusieurs canaux d'échantillonnage commutés)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Moins de temps est nécessaire pour obtenir un résultat que dans un système radiogoniométrique à un seul canal, c'est-à-dire que le délai de réponse est plus court – Les modifications de l'onde signal causées par les conditions de propagation ou de modulation sont traitées avec précisions – L'adaptation de phase et/ou d'amplitude est plus aisément effectuée par étalonnage ou au moyen de la méthode du double calcul des moyennes – Mesure simultanée de la différence d'amplitude entre les canaux 	<ul style="list-style-type: none"> – Deux canaux de réception ou plus nécessaires; le câblage est plus complexe – Le nombre de commutations et le temps d'échantillonnage connexe exigent un temps de mesure plus grand que les systèmes radiogoniométriques comportant autant de canaux de réception que d'antennes – Etalonnage périodique nécessaire pour adapter les deux canaux de réception ou, pour les systèmes à deux canaux, possibilité d'utiliser la méthode du double calcul des moyennes

Les systèmes multicanaux ont plus d'un canal de réception, mais moins de canaux de réception que d'antennes; ils ont un canal de référence et un ou plusieurs canaux d'échantillonnage commutés. Ils ont un seul oscillateur local, puisque tous les canaux sont régis par la même source. Il n'est pas nécessaire que les canaux soient adaptés à l'identique aux filtres qui ont exactement la même forme; au contraire, des récepteurs non adaptés régis par le même oscillateur local peuvent être utilisés. Ils assurent une détection cohérente des signaux dans les deux canaux et sont étalonnés tout au long du trajet RF des antennes vers les convertisseurs A/D en ce qui concerne tout retard de phase, toute différence de forme de filtre, etc., compte tenu des différences de lignes d'alimentation entre les éléments de radiogoniométrie et les circuits d'échantillonnage. Cet étalonnage est également l'élément central des essais et diagnostics intégrés concernant les systèmes en question.

Pour éviter une mise en concordance des éléments et/ou de la source d'étalonnage et pour simplifier les mesures, mais sans effectuer l'étalonnage de bout en bout et l'essai intégré, il est possible de recourir à la méthode du double calcul des moyennes dans la situation où il existe deux canaux de réception et qu'une mesure de la différence d'amplitude et de phase est réalisée entre les deux canaux; la commutation inverse ensuite les connexions d'antennes, une autre mesure d'amplitude et phase est effectuée, et une moyenne des résultats est calculée, ce qui annule toute discordance d'amplitude ou de phase sans étalonnage séparé. Un des inconvénients de la méthode du double calcul des moyennes est l'allongement du temps de mesure.

Comme les systèmes examinés ici sont dotés d'une antenne et d'un canal de réception susceptibles de servir de référence pour la phase, il est possible de mesurer la différence de phase entre les canaux échantillonnés et les canaux de référence avec une précision d'un dixième de degré ou plus. La différence d'amplitude entre les canaux échantillonnés et les canaux de référence peut aussi être mesurée avec précision et simultanément, ce qui permet au système de différencier les changements d'amplitude découlant de toute différence de directivité des antennes, chose que les systèmes à un seul canal ne peuvent pas faire sans un calcul des moyennes sur de longues périodes pour établir la moyenne des effets de la modulation et de la propagation.

La mesure de la tension sur chaque antenne échantillonnée est comparée à la tension de l'antenne de référence mesurée précisément au même moment. Les mesures du canal échantillonné sont normalisées par le canal de référence; la tension du canal échantillonné est divisée par celle du canal de référence.

Cette normalisation divise les effets des changements intervenus dans la propagation et la modulation qui introduisent des erreurs, comme on l'a vu plus haut pour les systèmes à un seul canal, puisque les facteurs de modulation et de propagation influent sur chaque antenne de la même manière, dans des conditions de réception en onde plane (hypothèse générale). La normalisation élimine tous les facteurs externes susceptibles d'agir sur la précision des mesures de phase et d'amplitude.

3.4.4.3 Systèmes à N -canaux ($N = \text{nombre de canaux de réception} = \text{nombre d'antennes}$)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Mesures radiogoniométriques plus rapides qu'avec d'autres méthodes – Pas de commutation d'antenne requise 	<ul style="list-style-type: none"> – Multiples canaux de réception nécessaires; câblage plus complexe – La nécessité d'un étalonnage de phase et d'amplitude accroît la complexité du système

Les systèmes à N -canaux dotés d'un canal de réception par antenne sont les systèmes les plus rapides et aux performances les plus élevées, car l'onde d'arrivée peut être échantillonnée simultanément sur tous les éléments d'antenne, alors que sur les systèmes dotés de moins de canaux de réception, les antennes sont échantillonnées séquentiellement. Tous les canaux de réception sont gérés par un oscillateur local commun.

Ces systèmes sont plus coûteux que les systèmes dotés de moins de canaux de réception; cela dépend du nombre de canaux de réception et de la nécessité d'assurer une concordance de phase ou un étalonnage en temps réel entre les canaux. Il n'est pas nécessaire que les canaux soient exactement mis en concordance, mais ils peuvent être simplement étalonnés en temps réel.

Les systèmes à N -canaux mesurent les tensions et les phases sur chaque élément par rapport à un des éléments qui est choisi comme référence, de sorte que tous présentent les avantages des systèmes examinés dans la section précédente, en ce sens qu'ils peuvent mesurer la phase et l'amplitude par rapport à l'élément de référence.

3.4.5 Traitement du signal

Le traitement du relèvement peut être basé sur différentes méthodes de radiogoniométrie, chacune présentant des avantages et des inconvénients, selon l'application. Les méthodes les plus souvent utilisées sont les suivantes:

- antenne pivotante;
- Wullenweber;
- Adcock/Watson-Watt;
- Doppler/pseudo-Doppler;
- interféromètre de phase;
- corrélation/superrésolution.

L'équipement de radiogoniométrie donne un relèvement avec plus ou moins de précision et indique également le niveau de réception du signal sur lequel le système est accordé. Certains équipements de radiogoniométrie donnent pour chaque relèvement une valeur qualitative qui peut être utilisée pour supprimer les relèvements "fantaisistes". Un équipement de radiogoniométrie à sensibilité de phase pour les ondes décamétriques indique également l'angle d'élévation du signal reçu si ce signal arrive comme une onde ionosphérique.

Une caractéristique très importante des équipements de radiogoniométrie modernes est leur capacité à fonctionner en mode "balayage radiogoniométrie". Grâce à cette fonction, il est possible de balayer les gammes de fréquences définies pour mesurer le degré d'occupation du spectre et de calculer simultanément les relèvements associés des signaux au-dessus d'un certain seuil. Cette fonction s'effectue avec le DSP et les techniques TFR (transformation de Fourier rapide) sont appliquées pour subdiviser la largeur de bande du récepteur en plusieurs canaux individuels, ou bien TFR. Les informations concernant le degré d'occupation du spectre et la tension pour une technique de traitement radiogoniométrique sont calculées par TFR pour chaque canal.

La fonction de balayage radiogoniométrique est examinée et illustrée à la fin du § 3.6.2. Cette technique de traitement permet d'intercepter des transmissions de courte durée comme les sauts de fréquence ou les émissions par salve.

3.5 Equipements supplémentaires et distincts

La plupart des stations de contrôle du spectre utilisent des systèmes intégrés automatisés (voir § 3.6). Ces systèmes permettent d'effectuer les mesures de fréquence, d'intensité de champ, de largeur de bande et de modulation recommandées par l'UIT ainsi que les mesures de radiogoniométrie et d'occupation du spectre à l'aide d'équipements de mesure intégrée. Toutefois, en remplacement de ces systèmes intégrés automatisés ou de manière complémentaire, il est également possible de recourir à des équipements supplémentaires et distincts pour effectuer les mesures susmentionnées et faciliter l'identification; certains de ces équipements sont examinés ci-après.

3.5.1 Appareils de mesure des fréquences

Dans la plupart des appareils de mesure des fréquences, la fréquence à mesurer est comparée avec une fréquence étalon dont la précision détermine directement la précision de la mesure. Il s'ensuit que l'équipement de base pour la mesure des fréquences est un générateur de fréquence étalon capable de générer des fréquences de référence ou des intervalles de temps de référence. Il est recommandé que cette fréquence étalon soit fournie par un système de positionnement global. L'appareillage suivant peut aussi être utilisé: un oscillateur classique avec un diviseur de fréquence fonctionnant en multiplicateur, un synthétiseur de fréquence ou un générateur d'harmoniques pour des fréquences particulières.

La précision prévue pour les mesureurs de fréquence est indiquée au § 4.2.4.2.4.

Les fréquences des émetteurs situés à grande distance doivent toujours être mesurées avec un récepteur, par la méthode de comparaison avec une fréquence étalon. Le § 4.2 du présent Manuel et la Recommandation UIT-R SM.377 donnent des renseignements complémentaires sur les mesures de fréquences.

3.5.2 Appareils de mesure des champs

La mesure du champ consiste essentiellement à déterminer la réponse d'une antenne de réception à l'action d'un champ électrique ou d'un champ magnétique qui arrive sur cette antenne. Cette réponse est captée par un récepteur relié à l'antenne. La réponse au champ électromagnétique doit être analysée par référence au comportement de l'antenne et à celui du champ. Un mesureur de champ se compose généralement de plusieurs modules qui sont le plus souvent assemblés pour former un appareil unique. Ces modules sont les suivants:

- une antenne, dont les caractéristiques sont connues;
- un récepteur comprenant un affaiblisseur de type pas à pas, qui permet de régler la sensibilité;
- un générateur pour étalonner la sensibilité du récepteur;
- un dispositif de mesure, à étalonnage linéaire ou logarithmique selon qu'il s'agit de mesurer la tension à l'entrée du récepteur ou le champ.

Les mesureurs de champ doivent avoir les propriétés suivantes:

- une grande stabilité: on doit pouvoir faire les mesures sur une assez longue période sans avoir à retoucher fréquemment l'étalonnage;
- une bonne précision relative: en pratique, des mesures d'un champ constant effectuées séparément par deux opérateurs doivent donner les mêmes résultats;
- une large gamme de mesure (de plusieurs microvolts (mV) à plusieurs volts par mètre (V/m));
- l'indication du dispositif de mesure doit être proportionnelle à la valeur efficace, à la valeur de crête ou à la valeur moyenne du champ, selon le type de mesure.

Tout comme les récepteurs de contrôle, les mesureurs de champ doivent être pourvus d'une sortie spéciale pour raccordement à un enregistreur à courant continu. Il est possible ainsi de faire des enregistrements sur de longues périodes.

Pour de plus amples renseignements sur les techniques de mesure des champs, on se reportera au § 4.3 du présent Manuel et à la Recommandation UIT-R SM.378.

3.5.3 Equipement d'analyse du spectre et de mesure de la largeur de bandes

Les équipements décrits ci-dessus permettront d'effectuer bon nombre des fonctions de contrôle du spectre, mais certains instruments supplémentaires permettront à une station de contrôle des émissions de mieux fonctionner et élargiront ces fonctions.

Compte tenu des progrès technologiques récents en ce qui concerne les fonctionnalités des analyseurs de spectre et des analyseurs vectoriels de signaux à forte dynamique, les opérations de contrôle sur écrans ont pris une plus grande importance. L'analyse de spectre est un moyen de reconnaître et de classer rapidement divers types d'émissions complexes. Le contrôle sur écran peut améliorer l'efficacité des opérations de contrôle des émissions en définissant des zones d'activité qu'on peut approfondir. Les services rendus aux utilisateurs du spectre radioélectrique sont accélérés par l'utilisation de techniques d'affichage sur écran pour synchroniser l'occurrence du brouillage avec l'activité des émissions qui en sont à l'origine.

Aujourd'hui les ordinateurs et les contrôleurs sont de plus en plus utilisés dans les stations de contrôle des émissions pour établir des rapports et/ou piloter les équipements de contrôle.

Trois grandes classes d'équipements permettent d'analyser le spectre radioélectrique dans le domaine fréquentiel:

- il existe des analyseurs large bande qui permettent d'afficher des portions sélectionnées du spectre avec une définition comprise entre 10 Hz/div et plus de 100 MHz/div;
- il existe aussi des écrans panoramiques connectés aux sorties FI du récepteur qui affiche une portion limitée du spectre au voisinage de la fréquence du récepteur accordé. Pour les récepteurs courants cela ne dépasse pas en général 40% de la fréquence FI.

Il existe également des récepteurs panoramiques qui permettent d'afficher la totalité de la gamme du module d'accord sélectionné ou de petites portions de cette gamme (parfois simultanément), méthodes TFR et IFM.

Il existe des appareils qui permettent de comparer et de piloter automatiquement une source de fréquence par rapport à une émission de fréquence étalon.

On se reportera au § 4.5 pour tout complément d'information sur les mesures de largeurs de bandes.

Un analyseur de spectre peut servir aux opérations suivantes:

- analyse complète du signal (modulation d'amplitude, modulation de fréquence ou modulation par impulsions) en fonction du temps et de la fréquence;
- contrôle des formes d'onde;
- détection et identification des signaux parasites modulés en amplitude et en fréquence;
- mesure du temps de montée, de la largeur et des fréquences de répétition des impulsions;
- mesure des caractéristiques spectrales des signaux modulés par impulsions;
- utilisation comme récepteur d'impulsions et d'ondes entretenues à grande sensibilité, dans les études de propagation, détermination des diagrammes d'antenne, etc.

La qualité des mesures de largeur de bande dépend des caractéristiques techniques suivantes de l'appareil de mesure ou de l'analyseur de spectre:

- détection et intégration;
- largeur du balayage;
- bande passante du filtre;
- précision relative en amplitude;
- gamme d'amplitude dynamique.

Les performances de tous les types d'appareils servant à mesurer les largeurs de bande sont limitées par les évanouissements et les brouillages, surtout dans les observations portant sur les transmissions à grande distance. Avec un analyseur de spectre, il est possible, en superposant par photographie les résultats de plusieurs balayages successifs, d'obtenir des renseignements extrêmement utiles sur le degré d'occupation spectrale des bandes de fréquences reçues dans la station de contrôle.

Pour de plus amples renseignements sur les mesures de largeur de bande, on se reportera au § 4.5 du présent Manuel ainsi qu'aux Recommandations UIT-R SM.328 et UIT-R SM.443.

3.5.4 Equipement de contrôle automatique de l'occupation du spectre

La mesure du degré d'occupation du spectre est l'une des mesures les plus importantes nécessaires au contrôle du spectre. Elle a pour but de déterminer la façon dont les bandes peuvent être attribuées et la façon dont le spectre peut être partagé.

Les équipements nécessaires peuvent être les suivants:

Antennes: pour une mesure du taux d'occupation général, il faut disposer d'antennes équidirectives. L'objet de l'opération est de mesurer la totalité du spectre dans une région.

Pour une mesure particulière et, par exemple, pour déterminer le temps d'occupation d'un émetteur dédié, on peut aussi utiliser une antenne directive.

Récepteurs: pour ce qui est du taux d'occupation, plus la largeur de bande analogique est grande, plus d'informations seront simultanément disponibles. Avec un récepteur à bande étroite, la largeur de bande analogique doit se commuter fréquence par fréquence.

Pour le taux d'occupation et le contrôle automatique, il n'est pas nécessaire que les mesures soient d'une grande précision – notamment pour la fréquence et le niveau. Le principal paramètre est la vitesse de balayage globale et la largeur de bande instantanée maximale:

- plus le temps de stabilisation du synthétiseur est court, plus la mesure de l'occupation est rapide. Il est souhaitable que le temps de stabilisation soit inférieur à MS dans la bande d'ondes métriques/décimétriques et à 10 ms dans la bande d'ondes décimétriques;
- une grande largeur de bande instantanée permet d'obtenir une TFR large, ce qui assure un nombre moins élevé de commutations du synthétiseur. Il est possible d'utiliser une largeur de bande instantanée de l'ordre de 20 MHz en ondes métriques/décimétriques et de 2 MHz en ondes décimétriques.

Traitement numérique: les techniques TFR conviennent bien aux mesures d'occupation et présentent de nombreux avantages:

- Les méthodes TFR permettent une analyse instantanée de la totalité de la largeur de bande FI. Utilisées avec un récepteur large bande, elles permettent de calculer tous les signaux relevant de la largeur de bande.
- De nouvelles modulations de fréquences peuvent être prises en compte avec les récepteurs à grande vitesse d'exploration utilisés avec la méthode TFR. Des modulations de type AMRT peuvent ne pas être observées avec un analyseur de spectre car la bande intéressante peut nécessiter davantage de temps pour être balayée. De plus, les techniques TFR sont plus aptes à mesurer les signaux variables dans le temps (commandés par porte, impulsions ou transitoires) et les signaux dynamiques modulés complexes en traitant simultanément toutes les fréquences du spectre mesuré.
- Les méthodes TFR permettent de procéder à d'autres mesures en parallèle. Pendant qu'une mesure d'occupation est appliquée à la totalité de la largeur de bande, un convertisseur abaisseur numérique peut choisir un signal donné dans la largeur de bande, puis déterminer la fréquence ou la largeur de bande.
- La mesure de l'occupation du spectre s'appuie sur un calcul statistique. Cela nécessite un grand nombre d'échantillons, selon le taux d'occupation et les échantillons indépendants et non indépendants. Grâce aux fréquents contrôles qu'elle permet d'assurer, la méthode TFR permet d'atteindre un niveau élevé de fiabilité en peu de temps.
- La mesure de l'occupation du spectre à l'aide de la technique TFR offre des avantages par rapport aux méthodes classiques: précision des mesures de fréquences, rapidité, stockage numérique des données concernant le spectre, reproductibilité des résultats, différenciation des porteuses rapprochées et environnements bruyants.

Des exemples de données sur l'occupation du spectre sont indiqués à la Figure 3-36 et à la Figure 3-37. Bien que la technique TFR soit moderne et efficace pour la réalisation des mesures d'occupation du spectre, on peut encore recourir à d'autres méthodes.

3.5.5 Equipement d'enregistrement

Il est utile d'enregistrer les données fournies par le système de contrôle du spectre qui contiennent les informations sur le spectre radioélectrique et les informations audio. Les données enregistrées peuvent être reproduites et vérifiées plus tard et elles peuvent servir pour prouver qu'une station radioélectrique fonctionne en toute illégalité. L'enregistrement des résultats des données permet aussi une exploitation rentable et sans surveillance du système de contrôle du spectre.

Indépendamment des données audio que reçoit la station de contrôle du spectre, il faut aussi enregistrer des informations sur le temps de détection, la fréquence, la modulation, la largeur de bande, la direction, le son et l'identité.

3.5.5.1 Supports d'enregistrement

Les enregistreurs de données à semi-conducteurs ou à disques sont préférés aux enregistreurs à bande classiques. Les supports d'enregistrement devraient offrir une capacité d'enregistrement en continu importante et devraient avoir un accès aléatoire permettant de repasser rapidement les données. Il est souhaitable que l'équipement puisse assurer l'enregistrement, la reproduction et l'édition des données.

FIGURE 3-36
Exemple de représentation d'un spectrogramme

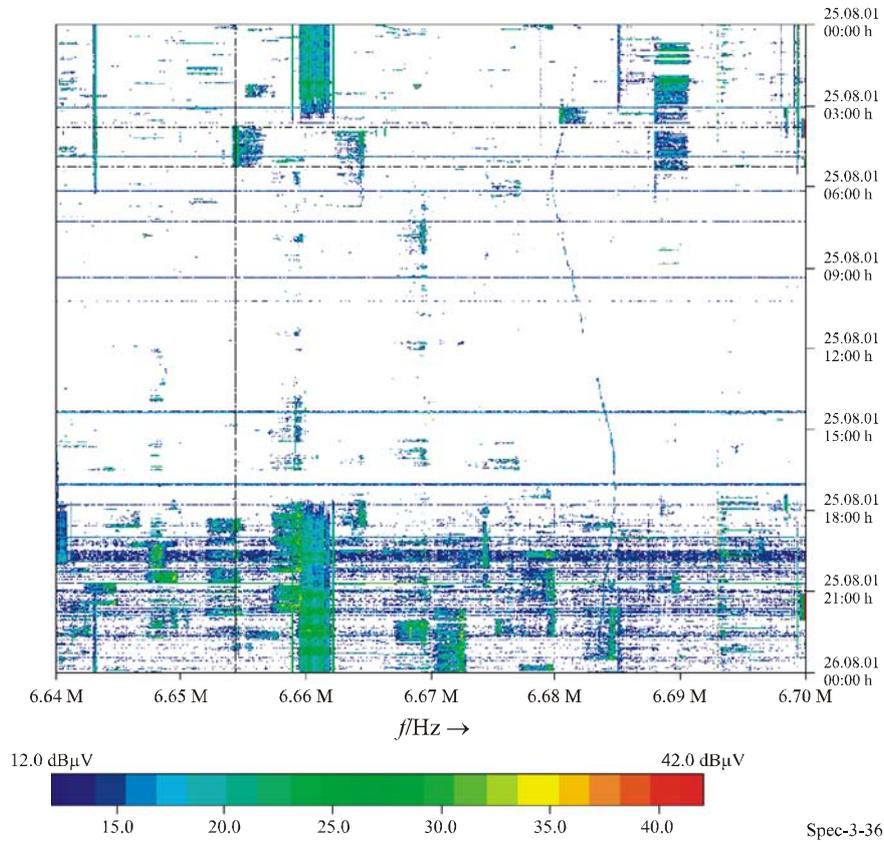
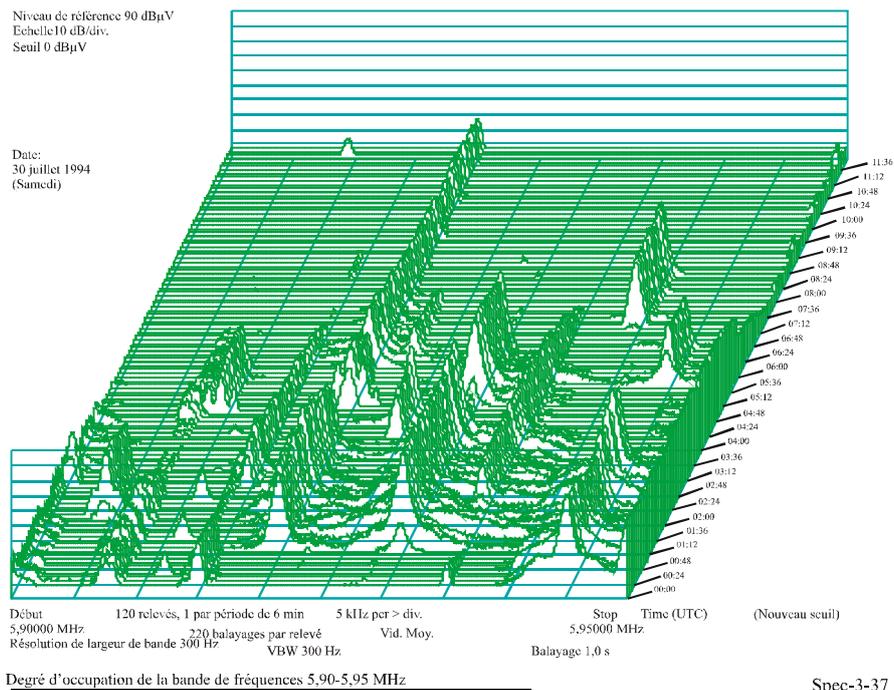


FIGURE 3-37
Exemple de représentations des précipitations



Un enregistrement des données sur une période d'au moins 72 h en continu est préféré, car cette durée autorise de longues périodes d'exploitation sans surveillance. La fonction d'enregistrement devrait être enclenchée à la réception des données contrôlées, afin de pouvoir saisir rapidement des signaux inattendus et devrait cesser en l'absence de données contrôlées. Le formatage des supports d'enregistrement devrait être étudié avec soin pour qu'il soit facile de reproduire les données spécifiées. L'opérateur devrait pouvoir insérer une "marque" dans un flux de données contrôlé et la marque doit être facilement localisée lorsque l'on repasse les données.

Les fonctions de reproduction de données devraient permettre de reproduire exactement les mêmes données sur la base de données enregistrées. Les informations relatives au spectre radioélectrique et les informations sonores devraient être synchronisées pendant la reproduction. Les fonctions de reproduction des données devraient elles aussi comprendre une fonction de recherche de la "marque", une fonction avance rapide et rembobinage rapide et une fonction de recherche de l'en-tête.

La fonction d'édition des données devrait permettre de rechercher et de copier une donnée désignée parmi des données enregistrées. Un opérateur devrait pouvoir facilement désigner une donnée souhaitée en vue de son extraction ou de sa copie.

3.5.5.2 Équipement d'enregistrement large bande

La présente section décrit les capacités de stockage de données numériques requises dans les stations de contrôle. Elle ne donne pas de spécifications techniques, mais indique comment déterminer les capacités de stockage nécessaires. De fait, l'évolution technique est si rapide que les spécifications actuelles seront obsolètes dans quelques années.

3.5.5.2.1 Données d'enregistrement et format

Avec les stations modernes, il existe cinq types de données d'enregistrement et de fichiers connexes:

Type 1: un format courant est celui des données numériques représentant les composantes en phase et en quadrature de phase (I/Q) d'un flux continu, d'échantillons en mode bloc de la bande de base ou de la sortie FI. Ces données brutes peuvent ensuite être réinjectées dans un récepteur pour analyser les signaux enregistrés. Cela est particulièrement utile pour l'enregistrement de signaux par une station mobile lorsque l'équipement d'analyse d'une station de contrôle fixe n'est pas toujours disponible. Entre autres applications on peut citer l'analyse des signaux de courte durée ou des signaux saisis pendant un enregistrement sans surveillance.

Type 2: données spectrales résultant de la TFR des mesures du domaine temporel. Les stations de contrôle modernes peuvent produire plusieurs centaines de TFR par seconde conjointement avec des mesures de largeurs de bande plus grandes. Le fichier texte est le format de fichier type.

Type 3: données démodulées et décodées lorsque le format de sortie est un fichier texte.

Type 4: données numériques audio en format WAV, mp3 ou autre format audio.

Type 5: données de mesures brutes figurant dans des fichiers texte.

Les données numériques en format I/Q nécessitent généralement une grande capacité de stockage et une grande largeur de bande d'enregistrement en raison des débits de données élevés correspondants. Les exigences sont moindres pour d'autres types d'enregistrement.

3.5.5.2.2 Enregistrement de données numériques

Comme les interfaces sont des convertisseurs A/D ou des convertisseurs abaisseurs numériques, un facteur important à considérer est la longueur de l'enregistrement, le type de données (nombre d'octets par échantillon) et la largeur de bande du signal. De grandes capacités de stockage sont maintenant disponibles et, grâce à la recherche technique, des systèmes de plus grande capacité continueront à être élaborés. Les récepteurs numériques peuvent avoir une interface directe avec l'enregistreur, étant donné qu'une entrée/sortie numérique appropriée est disponible sur le récepteur et l'enregistreur.

3.5.5.2.3 Largeur de bande de l'équipement d'enregistrement

La largeur de bande du signal à enregistrer influe sur les besoins non seulement en matière de capacité d'enregistrement, mais aussi en matière de largeur de bande d'enregistrement du système. Le récepteur d'enregistrement peut être local pour l'équipement de stockage ou recourir à des interconnexions avec des réseaux

étendus. Les signaux à plus grande largeur de bande (supérieure par exemple à 5 MHz) demandent un accès très rapide au système de stockage en raison des débits élevés. Il convient de faire très attention lorsque l'on choisit des interconnexions de réseaux et des équipements d'enregistrement qui présentent un débit élevé supérieur à celui qui est exigé pour la largeur de bande maximale de signal à enregistrer, sans imposer une charge élevée (supérieure à 30% dans un environnement à commutation de paquets) à la capacité d'interconnexion.

3.5.5.2.4 Prescriptions en matière de performances de l'équipement d'enregistrement

Les prescriptions en matière de capacité de stockage et de débit peuvent être calculées de la manière suivante:

$$C \text{ (Mo)} = F_s \times N_b \text{ _octets_par_échantillon} \times \text{temps_enreg}$$

où:

F_s : fréquence d'échantillonnage du convertisseur A/D ou du convertisseur abaisseur (MHz)

$N_b \text{ _octets_par_échantillon}$: généralement 4 octets pour des échantillons I/Q de 16 bits

temps_enreg : temps d'enregistrement (en secondes).

Par exemple, une largeur de bande de signal de 10 MHz exige une fréquence d'échantillonnage de $F_s = 25$ MHz en bande de base ou 12,5 MHz pour les composantes I/Q. Un signal en bande de base de 16 bits par échantillon assorti d'un temps d'enregistrement d'une minute donne ce qui suit:

Débit de données: $25 \text{ (MHz)} \times 2 \text{ (octets/échantillon)} \Rightarrow 50 \text{ Mo/s}$

Capacité de stockage/enregistrement: $50 \text{ (Mo/s)} \times 60 \text{ (s)} \Rightarrow \text{capacité de stockage} = 3 \text{ Go}$

3.5.6 Appareils de mesure de la modulation

Les mesures de modulation classiques recommandées par l'UIT sont décrites au § 4.6. Les récepteurs large bande et les capacités de traitement des stations modernes permettent de mesurer la modulation, y compris la modulation numérique. Lorsque l'on utilise des récepteurs à bande étroite avec des sorties à fréquence intermédiaire, il peut être souhaitable d'utiliser des appareils de mesure spécialisés. Un analyseur de signaux vectoriel (VSA, *vector signal analyser*), un analyseur de spectre externe avec une fonction d'analyse vectorielle ou la station de contrôle elle-même équipée du logiciel approprié sont utiles pour mesurer la modulation numérique.

Les récepteurs nécessaires pour la démodulation et la mesure de modulation MDP à n états, MAQ ou un autre type de modulation vectorielle décrite au § 4.6 se caractérisent par l'emploi de convertisseurs-abaisseurs de fréquences très performants dont l'amplitude FI et le temps de propagation de groupe ne nuiront pas au signal mesuré. Le convertisseur-abaisseur de fréquences, ou récepteur, est suivi d'un analyseur vectoriel de signaux pour l'analyse de la modulation numérique [Blue et autres, 1993]. Un VSA est réglé sur les largeurs de bande FI finales en utilisant le traitement numérique du signal pour obtenir des réponses en bande passante FI stables et très performantes. Par ailleurs, en changeant les coefficients de traitement numérique du signal on peut synthétiser toute une gamme de filtres de récepteur afin d'assurer une couverture polyvalente de différents types de modulation.

Si le convertisseur-abaisseur de fréquences RF facultatif du VSA est utilisé et s'il ne contient pas de présélecteur RF, on doit utiliser un présélecteur externe ou un filtre à bande lorsque les signaux sont denses. Il faudra peut-être inclure les corrections de la caractéristique de la bande passante du présélecteur dans la procédure de correction de la caractéristique de bande passante du filtre FI pour obtenir les meilleures performances possibles.

Après avoir fixé la fréquence porteuse, le type de modulation et le débit de symboles souhaités, l'appareil de traitement numérique du signal dans l'analyseur vectoriel de signaux ou dans l'analyseur de spectre procède à la démodulation. L'analyseur affiche le signal modulé, mais offre aussi des mesures d'erreur de la modulation numérique en démodulant le signal et en générant un signal de référence idéal. Les deux signaux sont comparés pour obtenir les résultats des mesures d'erreur.

Pour le contrôle en extérieur de la qualité de la modulation, le trajet de transmission peut être le facteur le plus important pour la mesure des facteurs de qualité de la modulation. La propagation par trajets multiples ou le brouillage cocanal peuvent rendre les mesures de qualité de la modulation hautement incertaines ou

inutiles. Par conséquent, il n'y a lieu de faire des mesures détaillées de la modulation qu'à l'emplacement de l'émetteur, de préférence avec une connexion directe à l'émetteur. Ces mesures portent notamment sur les éléments suivants: amplitude du vecteur d'erreur, erreurs de phase et erreurs d'amplitude, alimentation de la porteuse, déséquilibre de gain I/Q , chute d'amplitude et erreur de fréquence porteuse.

Parmi les mesures générales qui donnent une indication de la qualité globale de modulation et qui peuvent être effectuées à l'emplacement de l'émetteur, ou un peu plus loin, figurent notamment les suivantes: spectre des erreurs vectorielles (pour mettre en lumière les brouillages), rapport de puissance dans le canal adjacent, largeur de bande occupée, gabarit d'émission spectrale, fonction de distribution cumulative complémentaire, fréquence porteuse et mesures dans le domaine code (puissance, temps et phase).

Les mesures de la réponse impulsive des canaux (CIR, *channel impulse response*) ([Riedel, 1991, Bues et Riedel, 1993] ne sont pas des mesures de la modulation mais des mesures de la propagation par trajets multiples. Cette propagation nuit beaucoup à la qualité de la modulation mesurée au site de réception. La mesure du TEB est une autre mesure indirecte de la qualité de la modulation au site de réception. Ces mesures de qualité sont décrites plus en détail au § 5.3.5.4.

3.5.7 Appareils pour l'identification

L'identification des signaux radioélectriques est une des tâches les plus difficiles du contrôle des émissions. Cette difficulté tient en partie au fait que les indicatifs d'appel sont émis peu fréquemment, en partie à l'utilisation de l'indicatif d'appel abrégé ou non enregistré et, dans une très large mesure, à la difficulté de décodage des signaux, conséquence d'un emploi grandissant des systèmes d'émission complexes: déplacement de fréquences, multiplexage par répartition en fréquences et/ou dans le temps. Il faut ajouter à cela l'utilisation de systèmes télégraphiques automatiques qui font usage d'une variété de codes autres que le Morse, de systèmes de télécopie, de systèmes à bande latérale unique et bande latérale indépendante et de dispositifs de secret.

Les techniques de traitement numérique et les micro-ordinateurs ont permis de réaliser des équipements d'identification à usages multiples capables de démoduler et de décoder la plupart des signaux. Ces équipements peuvent aussi être programmés pour s'adapter aux nouveaux systèmes d'émission. Ce sujet est examiné dans la Recommandation UIT-R SM.1600 – Identification technique des signaux numériques.

Une station de contrôle des émissions doit donc être dotée des équipements nécessaires pour recevoir et/ou identifier plusieurs types de modulation analogique et numérique.

On se reportera au § 4.8 pour obtenir de plus amples informations sur l'identification des signaux.

Références bibliographiques

- BLUE, K. et autres [décembre 1993] Vector Signal Analyzers for Difficult Measurements on Time-Varying and Complex Modulated Signals. *Hewlett-Packard J.* Vol. 44, p. 6-47.
- BUES, D. et RIEDEL, P. [1993] Planning digital radio networks using Impulse Response Analyzer PCS and test transmitter system. *News from Rohde & Schwarz*, **141**, p. 26-27.
- RIEDEL, P. [1991] TS 9955 measures channel impulse response in GSM radio networks. *News from Rohde & Schwarz*, **137**, p. 12-14.

Recommandations UIT-R:

NOTE – Dans chaque cas il convient d'utiliser la version la plus récente de la Recommandation.

Recommandation UIT-R SM.182 – Contrôle automatique du degré d'occupation du spectre radioélectrique.

Recommandation UIT-R SM.328 – Spectres et largeurs de bande des émissions.

Recommandation UIT-R SM.377 – Précision des mesures de fréquences dans les stations pour le contrôle international des émissions.

Recommandation UIT-R SM.378 – Mesures de champ dans les stations de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.443 – Mesure de la largeur de bande dans les stations de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.854 – Radiogoniométrie et détermination de la localisation dans les stations de contrôle pour des signaux inférieurs à 30 MHz.

Recommandation UIT-R SM.1600 – Identification technique des signaux numériques.

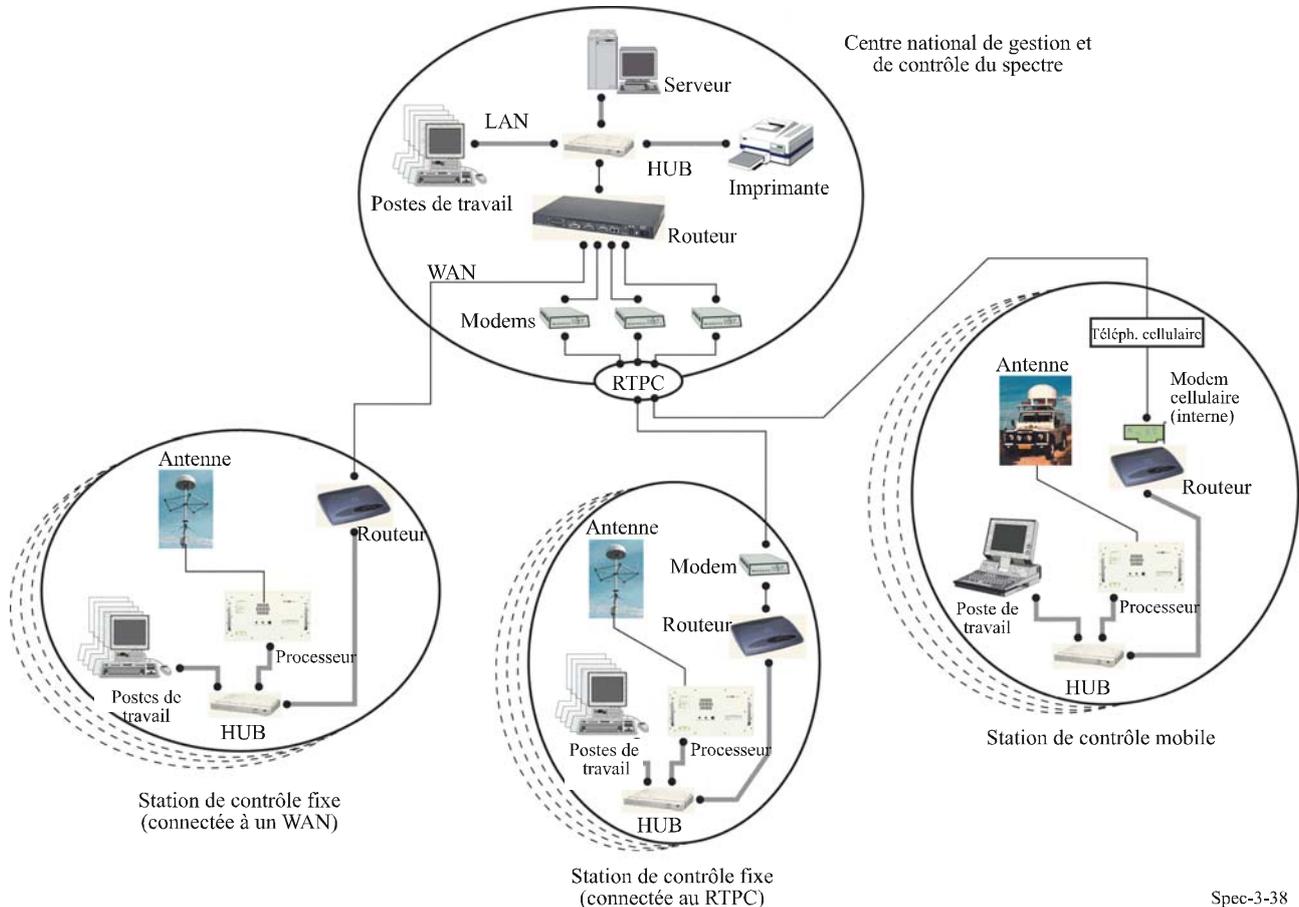
3.6 Automatisation du contrôle des émissions

3.6.1 Introduction

L'automatisation, par l'utilisation d'ordinateurs, d'architectures modernes client/serveur et de communications à distance, simplifie l'exécution de nombreuses missions et l'exercice de maintes responsabilités du service de contrôle des émissions. Les équipements informatisés sont un moyen d'effectuer rapidement et avec précision des tâches de mesure, répétitives et banales en libérant le personnel de service, qui peut être affecté à des travaux plus complexes. Le recours aux bases de données et à la modélisation sur ordinateur permet de rationaliser les fonctions de gestion du spectre et peut aider à empêcher les brouillages. En couplant gestion du spectre et contrôle du spectre il est possible de constituer un système dit intégré, qui peut utiliser automatiquement les données mesurées par le système de contrôle et valider les informations des bases de données du système de gestion pour détecter les émissions illicites et autres infractions aux conditions d'exploitation. Le système de contrôle et de gestion intégré peut être équipé d'un mécanisme de gestion central, dans lequel la gestion globale du système de contrôle des émissions est effectuée et les données de mesure stockées dans la base de données du système de contrôle peuvent faire l'objet d'une analyse statistique. Les résultats analysés sont utilisés pour la planification de la gestion du spectre (par exemple retrait et réattribution des fréquences). Le schéma d'un système intégré type est présenté à la Figure 3-38 et décrit plus en détail dans la Recommandation UIT-R SM.1537. La configuration (nombre de postes de travail à chaque station, nombre de stations, etc.), les méthodes de communication (TCP ou autre protocole, utilisation du RTPC, radiocommunications ou satellite) et d'autres détails varieront suivant l'application. Dans une autre configuration on a, en plus, un centre de contrôle qui est relié directement aux stations de contrôle, puis au centre de gestion. Un service de grande taille peut comporter, à côté d'un centre de contrôle principal, ou national, plusieurs centres régionaux qui permettent une gestion distribuée des opérations de contrôle.

FIGURE 3-38

Exemple de système de contrôle intégré à un système de gestion



3.6.2 Automatisation des opérations de contrôle

D'une façon générale, une station automatisée exécute les mêmes fonctions qu'une station de contrôle fixe (voir section 2.4). Tâches répétitives, les mesures de contrôle courantes ci-dessous se prêtent aisément à l'automatisation:

- *mesures du degré d'occupation*: l'automatisation convient bien à l'exploration avec résolution fine des bandes de fréquences, opération accompagnée de visualisations générées par ordinateur et pourvue d'une capacité de mémorisation du degré d'occupation des canaux sur plusieurs jours;
- *mesures de fréquence*: ces mesures peuvent être exécutées automatiquement lorsque le rapport S/N est suffisant et pour les émissions avec fréquences porteuses. Dans les bandes d'ondes décimétriques, les canaux étant généralement très voisins les uns des autres, il faut prévoir une sélectivité en fréquence précise lorsque plusieurs fréquences sont présentes dans le même canal;
- mesures de niveaux et, le cas échéant, mesures de champs;
- mesures des largeurs de bande;
- mesures des paramètres de modulation. Les progrès des matériels et des algorithmes de traitement numérique du signal ont permis de mettre au point des systèmes de reconnaissance qui identifient les types de modulation en temps réel. Ces systèmes se présentent sous forme d'appareils monotâche, de cartes électroniques à insérer, avec leurs logiciels, ou peuvent être incorporés dans d'autres équipements, tels que récepteurs ou analyseurs; ils peuvent servir à reconnaître divers formats de modulation (tant numériques qu'analogiques), à mesurer les paramètres techniques communs et à démoduler ou à décoder les signaux;
- *analyse du signal*. NB: toutes les opérations de l'analyse du signal ne peuvent pas être entièrement automatisées;
- *radiogoniométrie*;
- *identification des stations*, par localisation, par le contenu des messages ou par analyse automatique des signaux (reconnaissance de code, nombre d'éléments, débit de transmission).

Toutes ces mesures peuvent en général être automatisées, mais certaines, comme la largeur de bande et la modulation, exigent des signaux avec un bon rapport S/N pour une précision suffisante. Ces opérations permettent de récolter des données de mesures techniques qu'il est possible de comparer avec les paramètres nominaux qui sont normalement enregistrés dans une base de données de gestion du spectre, c'est-à-dire pour un émetteur:

- la fréquence assignée;
- l'intensité de champ calculée;
- la classe d'émission;
- la largeur de bande assignée;
- la largeur de bande de l'émission;
- l'indicatif d'appel.

Chaque station de contrôle dispose normalement d'une liste d'émetteurs, dont les opérateurs comparent les paramètres avec les résultats des mesures réalisées par les appareils automatiques. Des systèmes automatisés intégrés peuvent automatiser cette opération de comparaison, en plus de la collecte des données destinées par exemple à détecter automatiquement les infractions mentionnées précédemment. Dans un cas comme dans l'autre, la comparaison doit se faire en tenant compte des tolérances des paramètres mesurés, qui, pour que le taux des fausses alarmes soit aussi faible que possible, doivent être conformes aux Recommandations de l'UIT. Le but est d'en confirmer la conformité par rapport aux procédures établies ainsi qu'aux données techniques de référence enregistrées. Lorsqu'un écart ou une anomalie est constaté, il s'agit en général:

- d'émetteurs ou d'utilisation de fréquences illicites ou non autorisés;
- de périodes d'exploitation ou d'emplacements qui n'ont pas fait l'objet d'autorisations;
- de classes d'émission illicites ou d'une modulation de mauvaise qualité;
- d'un décalage de fréquence excessif;

- de l'absence d'indicatif d'appel ou d'un indicatif d'appel incomplet;
- d'une largeur de bande excessive;
- d'une puissance trop élevée (champ excessif).

3.6.2.1 Niveaux d'automatisation

L'automatisation peut être introduite à plusieurs niveaux dans les opérations de contrôle des émissions: un seul poste de travail peut effectuer une analyse automatique de l'occupation du spectre en utilisant des paramètres préprogrammés, ou bien plusieurs postes de travail d'un même site peuvent être reliés ensemble pour constituer une seule unité de mesure, afin de partager les ressources mises à la disposition de chacun, ou bien encore il est possible d'automatiser une station entière, ou tout un réseau de stations, en raison de leur éloignement par exemple, les résultats de leurs observations de contrôle des émissions peuvent être alors retransmis à une station centrale. En outre, certaines unités de travail sur plusieurs sites peuvent être reliées entre elles de telle manière que l'une synchronise automatiquement les autres afin d'effectuer plusieurs mesures simultanées sur les signaux présentant un intérêt. L'équipement informatique peut être par ailleurs programmé pour déterminer les fréquences qu'occupent des émetteurs ne relevant pas d'une base de données des émetteurs autorisés ou pour déterminer les émetteurs dont l'exploitation n'est pas conforme aux paramètres déclarés.

L'automatisation peut aider à accélérer la localisation et l'identification d'un signal, à réduire l'effectif nécessaire à l'exploitation des stations et à libérer du personnel pour des fonctions prioritaires, par exemple aider une station mobile dans son travail de goniométrie ou analyser des données, et à accroître la largeur de spectre radioélectrique qu'un service est à même de contrôler efficacement. Par contre, l'absence d'un opérateur ou d'un technicien dans une station éloignée peut avoir pour conséquence une augmentation de la durée d'immobilisation des équipements en cas de panne; par ailleurs, un équipement automatique n'a pas toujours la sensibilité nécessaire pour déceler les difficultés de réglage d'accord en vue de la réception des signaux, ce qui n'est pas le cas d'un opérateur pratiquant le réglage manuel; ce problème se pose souvent dans les ondes décimétriques. En tout état de cause, lorsqu'on automatise une position ou une station, il faut prévoir un éventuel retour à une exploitation manuelle, soit sur place, soit à distance. Quand on veut automatiser un équipement ancien, on doit en général employer un ordinateur distinct, de sorte qu'il est préférable bien souvent de le remplacer tout simplement.

3.6.2.2 Automatisation des stations

Grâce aux techniques de traitement du signal numérique (DSP) d'aujourd'hui, il est devenu économique d'automatiser des stations entières. Une station automatique comprend:

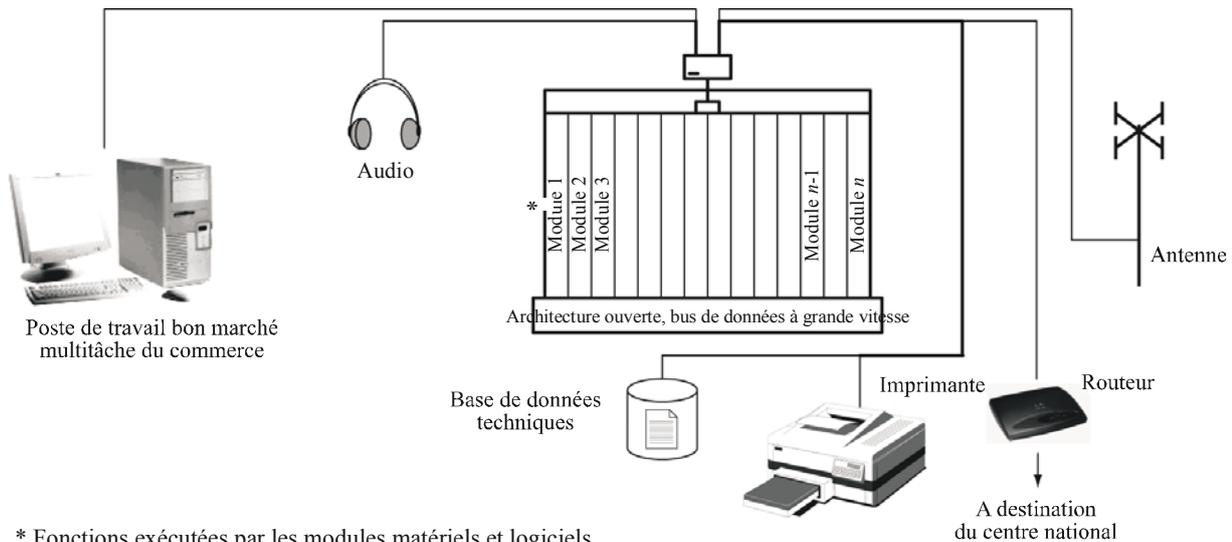
- un petit groupe d'équipements de mesure modulaires, du dernier cri, en particulier des récepteurs numériques gérés par un ordinateur, généralement dénommé serveur de mesure; et
- des postes de travail d'opérateurs, souvent qualifiés de clients, qui servent d'interfaces entre les opérateurs et dont les logiciels permettent d'assurer avec facilité l'utilisation et la maintenance du système.

Une station peut être exploitée soit localement, soit à distance depuis un site mieux adapté. Entre les stations de mesure et les stations de commande les liaisons peuvent être radioélectriques ou de Terre. En bref, la station devient un nœud d'un réseau étendu géré au niveau de la station de commande.

A une station entièrement automatisée correspond en général l'architecture illustrée par la Figure 3-39. La station en question comporte des antennes, un serveur de mesure compact qui est modulaire, un bus à grande vitesse avec ses processeurs, des récepteurs et d'autres équipements électroniques, un ou plusieurs postes de travail clients du commerce et bon marché, et divers périphériques dont des imprimantes, des téléphones et des modems. Une autre architecture, proche de la précédente, consiste en des unités distinctes, mais grandement intégrées telles que des récepteurs numériques, des goniomètres et des processeurs; dans ce cas, la partie de la Figure 3-39 représentant l'architecture ouverte (bus à grande vitesse plus divers modules) est remplacée par des unités distinctes, en particulier par un récepteur numérique, un goniomètre numérique et un processeur. Un équipement d'essai intégré (BITE, *build integrated test equipment*) intégré peut indiquer l'état de tous les dispositifs et donner l'alarme en cas de défaillance d'un dispositif.

FIGURE 3-39

Station de contrôle du spectre radioélectrique intégrée: configuration type d'aujourd'hui



* Fonctions exécutées par les modules matériels et logiciels.

Traitement des données de radiogoniométrie
Conversion rapide analogique-numérique
Traitement et démodulation des signaux numériques
Récepteurs 1, 2, 3,... n

Audionumérique
Récepteur GPS
Interface des postes de travail
Affichages du spectre
Matrice audio

Matrice RF
Interface des communications
Base de données émetteur
Créneaux d'expansion

Spec-3-39

Fonctions exécutées par une station de contrôle automatique:

- contrôle des émissions, démodulation et décodage;
- enregistrement des signaux sonores;
- mesures et analyses techniques, en particulier des fréquences et décalages de fréquences, niveau/champ, paramètres de modulation y compris profondeur de modulation en MA et excursion de fréquence en MF, largeur de bande et analyse spectrale;
- occupation du spectre;
- radiogoniométrie;
- comparaison automatique en temps réel avec les paramètres déclarés;
- génération automatique des alertes en cas d'émissions anormales ou inconnues.

3.6.2.2.1 Modes de fonctionnement types des stations automatisées

A une station de contrôle automatique correspondent en général trois modes de fonctionnement, utilisés pour exécuter les tâches ci-dessus:

Mode 1: interactif ou en temps réel;

Mode 2: automatique ou programmé;

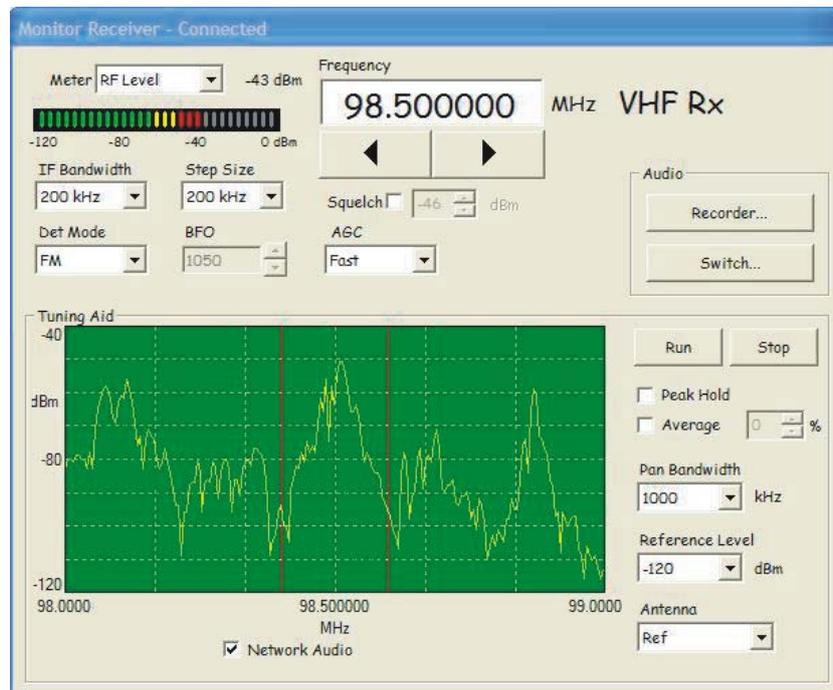
Mode 3: non prioritaire.

Le mode interactif permet une interaction directe avec diverses fonctions qui assurent un retour instantané dans les domaines tels que l'accordage du récepteur de contrôle, la sélection du type de démodulation et de visualisation par exemple. Le mode interactif est nécessaire même dans un système automatisé pour que les opérateurs puissent intervenir en cas de besoin, de sorte que l'équipement puisse être commandé à distance par les opérateurs et par le logiciel du système automatisé. Les fonctions interactives sont commandées depuis des "consoles de commande virtuelles" sur le poste de travail client, via des écrans dont un est illustré dans la Figure 3-40. Des visualisations synthétiques, panoramiques et spectrales, sont créées sur le poste de

travail de l'opérateur, et comportent des affichages à écriture ligne par ligne (affichage tridimensionnel de l'amplitude du signal par rapport à la fréquence et au temps) ainsi que des affichages de spectrogrammes (affichage bidimensionnel de la fréquence du signal par rapport au temps, l'amplitude du signal étant indiquée par une couleur).

FIGURE 3-40

Exemple d'une console de commande virtuelle pour le récepteur de contrôle



Spec-3-40

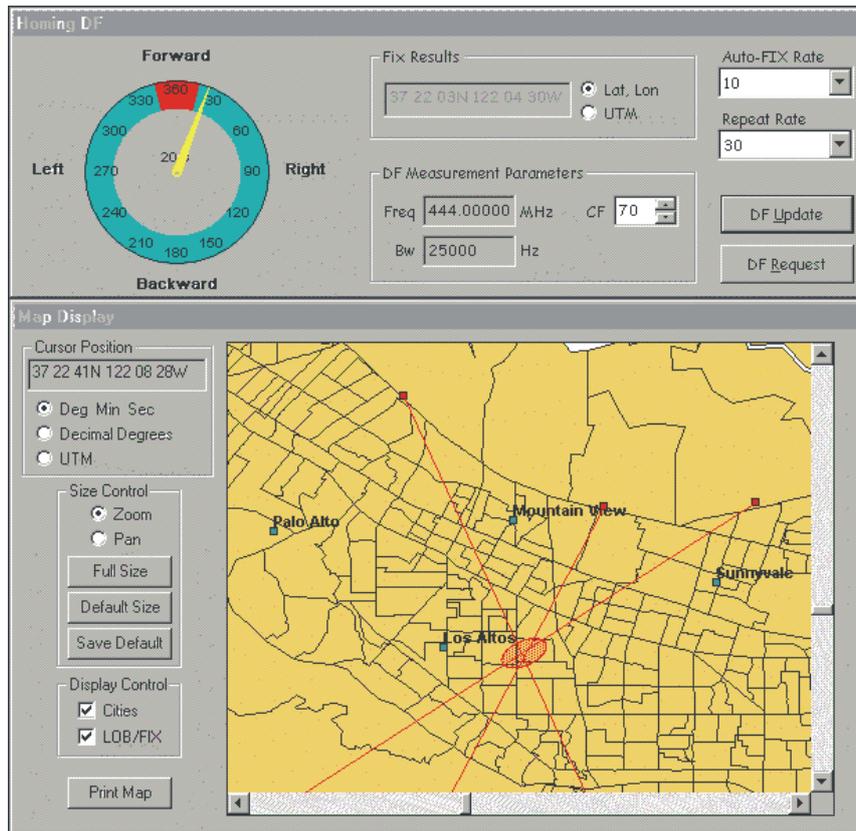
Le raliement radiogoniométrique est un bon exemple d'une opération interactive. L'ordre de relèvement radiogoniométrique peut émaner d'une unité mobile, en déplacement. Les résultats radiogoniométriques sont présentés par rapport à l'avant du véhicule (voir l'illustration de la Figure 3-41) et permettent au conducteur de choisir la direction dans laquelle aller pour se rapprocher de l'émetteur d'un signal donné. Les résultats DF provenant de différents emplacements sont également affichés sur une carte géographique, le système étant à même de procéder à une triangulation automatique pour localiser l'émetteur. Un récepteur GPS à grande précision actualise en permanence la position exacte de l'unité mobile, et un compas électronique mesure l'orientation du véhicule par rapport au nord.

Le mode automatique, ou programmé, peut programmer des tâches à exécuter soit immédiatement, soit à des moments précis. Parmi les fonctions qui sont exercées dans le mode programmé figurent les mesures et les analyses techniques ainsi que la radiogoniométrie. Il est possible de spécifier des paramètres de mesure, comme par exemple le mode de mesure et de calcul des moyennes, et leur durée (ou durées, dans le cas de mesures répétées), ou d'utiliser des valeurs par défaut du système. Pour programmer ces fonctions, l'opérateur peut utiliser un écran comportant un calendrier avec les jours de la semaine et plusieurs intervalles à l'intérieur de chaque heure du jour. Le client demande au serveur affecté aux mesures des créneaux horaires pour les mesures auxquelles il souhaite procéder; l'attribution de ces créneaux horaires permet à plusieurs clients de se connecter à un seul et même serveur. Pour la programmation de plusieurs mesures à l'intérieur d'un même créneau horaire, le serveur doit proposer un mode de programmation "facile": lorsque le créneau horaire demandé est déjà réservé, la demande du client est transférée sur le

premier créneau disponible; le serveur peut rechercher un créneau disponible à l'intérieur d'une fenêtre indiquée, qui couvre en général quelques minutes. Le serveur dédié procède aux mesures demandées, en utilisant des algorithmes de programmation et de priorité appropriés pour résoudre les éventuels conflits et conserve les résultats obtenus jusqu'à ce que le client les lui demande. Le serveur peut enregistrer, parallèlement aux mesures demandées, des signaux sonores.

FIGURE 3-41

Exemple d'affichage de raliement radiogoniométrique et de carte géographique



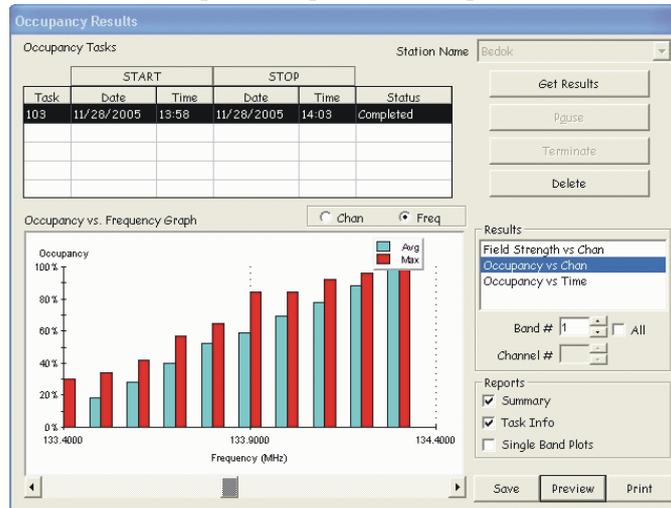
Spec-3-41

Le mode non prioritaire sert à exécuter des tâches de détermination du degré d'occupation du spectre et de détection automatique des infractions, tâches pour lesquelles il est souhaitable de récolter des données sur de longues périodes. On peut demander un balayage large bande pour déterminer le degré d'occupation, seul ou combiné avec un relevé radiogoniométrique (balayage), et le système peut être programmé pour procéder à un balayage automatique de fréquences ou de gammes de fréquences particulières et, dès la détection d'un signal, lancer une opération qu'aura prévue l'opérateur, comme par exemple une mesure radiogoniométrique ou une mesure technique.

Ce mode n'est pas prioritaire par rapport au mode programmé, de sorte qu'il sera interrompu par des mesures programmées pour lesquelles le serveur devra être utilisé; une fois les mesures programmées terminées, le système revient automatiquement aux mesures qui étaient en cours dans le mode non prioritaire.

Lorsqu'il demande les résultats des mesures, le client peut les voir affichés dans des formats faciles à lire: l'information est pour la plus grande partie donnée graphiquement, sous forme d'histogrammes d'occupation (voir la Figure 3-42), de graphiques champ-fréquences, de cartes géographiques indiquant les résultats de la localisation (voir la Figure 3-41) et d'autres affichages graphiques.

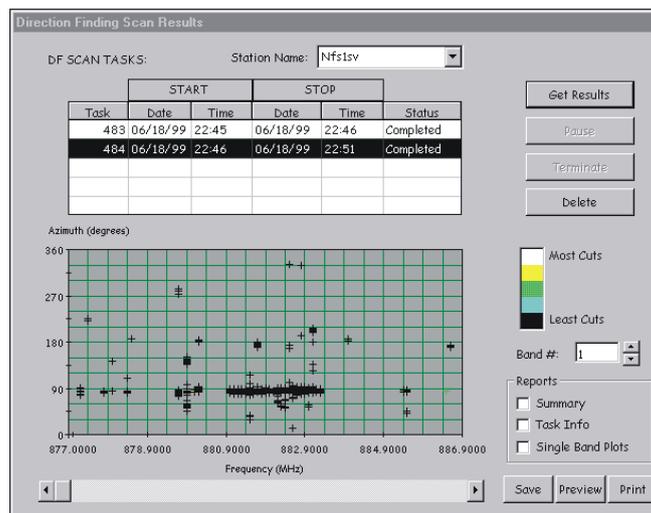
FIGURE 3-42
Exemple d'histogramme d'occupation



Spec-3-42

Les systèmes en question peuvent effectuer des mesures de radiogoniométrie simultanées sur de nombreuses fréquences et fournissent des courbes représentant l'azimut par rapport à la fréquence (voir la Figure 3-43) qui revêtent une utilité pour l'interception et le traitement des modulations numériques modernes; sur une visualisation du type considéré, l'indication par les relevés DF d'un même azimut pour plusieurs fréquences différentes signale clairement la présence d'un signal à saut de fréquence.

FIGURE 3-43
Exemple de résultats de balayage radiogoniométrique



On peut concevoir des systèmes client/serveur évolués plus faciles à utiliser que des systèmes composés de plusieurs appareils, tels que récepteurs et analyseurs de spectre. Utilisant des icônes et des barres d'outils, sur lesquelles l'opérateur peut cliquer après y avoir positionné le curseur de sa souris, ces systèmes peuvent être très intuitifs et d'un usage facile. Pour les administrations qui ont du mal à obtenir des opérateurs qualifiés, une considération importante est en effet la simplicité d'utilisation d'un système de contrôle.

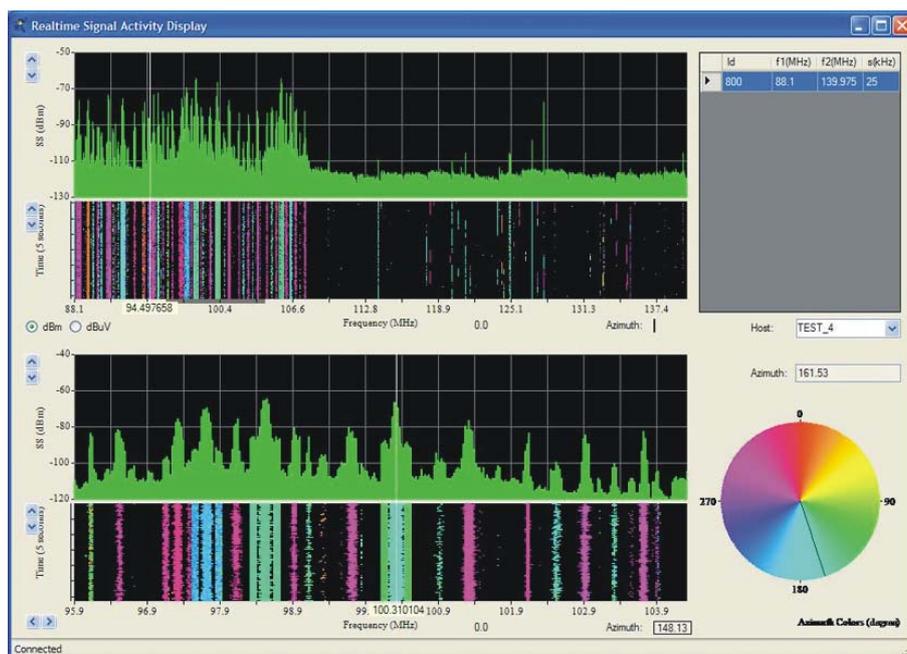
3.6.2.2 Exemples d'affichages automatisés de grandes largeurs de bande

Les serveurs de mesure modernes, équipés de DSP, sont à même de fournir de très grandes largeurs de bande instantanées pouvant aller jusqu'à 20 MHz (Recommandation UIT-R SM.1794), ainsi qu'une importante gamme dynamique de sorte que la présence de signaux de forte intensité n'empêche pas de capter et de traiter les signaux très faibles à l'intérieur de la largeur de bande en question. Les systèmes automatisés disposant de très grandes largeurs de bande instantanées peuvent en effet balayer le spectre à des cadences très élevées, accordant automatiquement le récepteur et recueillant des données sur le degré d'occupation et permettant d'effectuer des contrôles et des rafraîchissements très fréquents des données affichées, ce qui permet à l'opérateur de mieux comprendre le spectre radioélectrique. Ils peuvent acquérir et mesurer efficacement des signaux intermittents, des signaux large bande et des signaux agiles en fréquences qui peuvent paraître être du bruit lorsqu'ils sont contrôlés au moyen d'un système à largeur de bande étroite. Pour assurer les performances les plus élevées lorsque des largeurs de bande de mesure plus étroites sont souhaitées, une largeur de bande instantanée plus petite, qui réduit le bruit et améliore le rapport S/N , peut être choisie automatiquement au lieu d'une plus grande largeur de bande.

Les opérateurs peuvent avoir sous les yeux un affichage panoramique à très grande largeur de bande, qui leur permet d'améliorer leur aptitude à localiser des brouilleurs et à déterminer les types de signaux brouilleurs qui sont contrôlés. Un affichage type est illustré à la Figure 3-44, couvrant plus de 50 MHz du spectre; un affichage panoramique occupe toute la partie supérieure de l'écran, au-dessous de laquelle un spectrogramme indique l'activité des signaux au cours des cinq dernières secondes, les signaux étant indiqués par une couleur selon la direction d'arrivée. Par une commande de l'opérateur, l'affichage avec indication de couleur selon la direction d'arrivée peut être remplacé par un affichage avec indication de couleur selon l'intensité du signal. La partie inférieure de l'écran contient un affichage panoramique amplifié et un spectrogramme où l'opérateur peut simplement cliquer sur la partie supérieure pour indiquer la zone de fréquences à amplifier; le système produit alors automatiquement un affichage amplifié; sur la figure, une partie des affichages situés dans la partie supérieure (8,5 MHz) a été amplifiée pour remplir la zone horizontale pouvant être affichée. L'affichage est en permanence mis à jour en temps réel, alors que le spectrogramme évolue constamment dans le temps pour indiquer l'activité des signaux avec les directions d'arrivée.

FIGURE 3-44

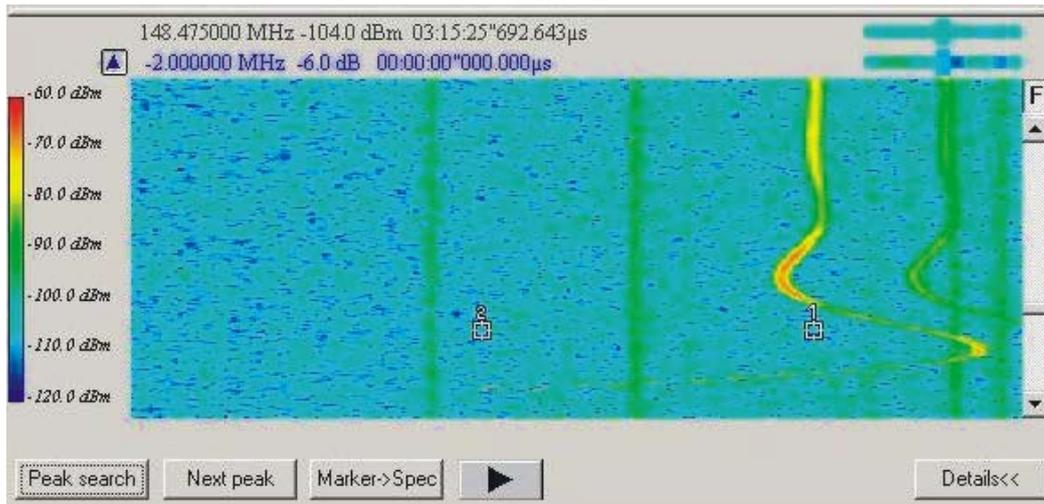
Affichage type de mesures de très grandes largeurs de bande



Spec-3-44

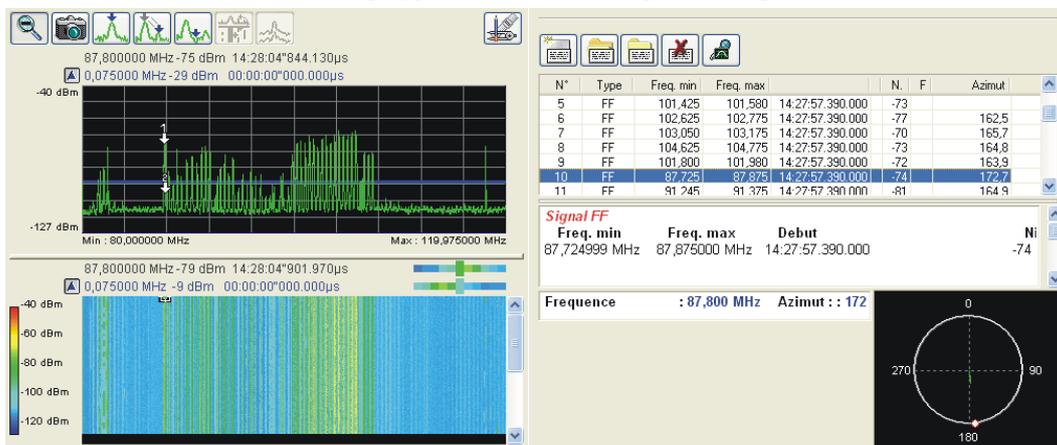
La Figure 3-45 illustre l'affichage d'un signal émis sans stabilisation. Seul un récepteur large bande peut détecter les signaux qui perturbent les signaux des voies adjacentes. Un récepteur bande étroite est trop lent pour détecter de tels signaux ou présente une largeur de bande trop étroite pour visualiser la fluctuation des signaux.

FIGURE 3-45
Affichage type d'un signal large bande à fluctuation très rapide détecté par un récepteur large bande



Les opérateurs peuvent avoir sous les yeux un affichage panoramique à très grande largeur de bande, qui leur permet d'améliorer leur aptitude à localiser des brouilleurs et à déterminer les types de signaux brouilleurs qui sont captés. Un tel affichage est illustré à la Figure 3.46, indiquant en temps réel une largeur de bande instantanée de 40 MHz sans balayage. Une grande largeur de bande instantanée permet de détecter des signaux très courts en plusieurs microsecondes.

FIGURE 3-46
Affichage type de mesures de très grandes largeurs de bande



A l'avenir, la technique DSP (traitement des signaux numériques) offrira une plus grande souplesse en renforçant les capacités des systèmes de contrôle. Si de nouveaux types de signaux nécessitant un traitement spécial apparaissent ou si de nouvelles largeurs de bandes sont souhaitées, il est possible de les ajouter aux systèmes DSP simplement en modifiant les logiciels des systèmes de contrôle.

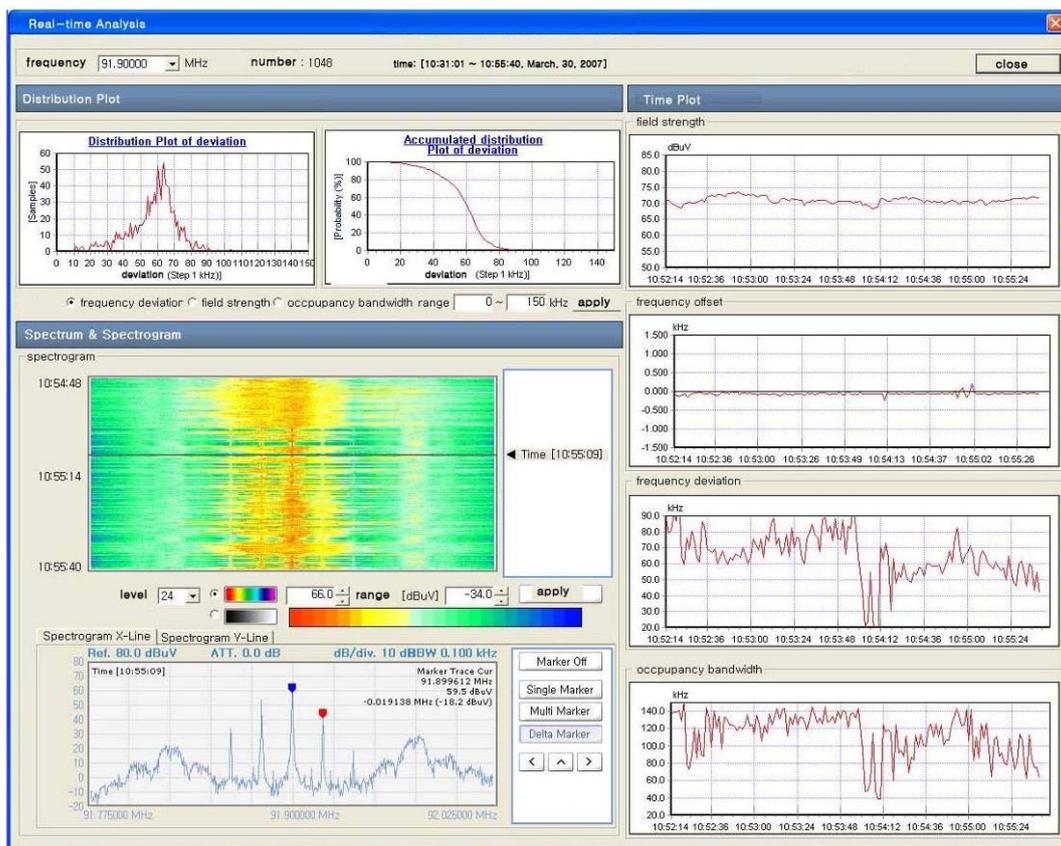
3.6.2.2.3 Exemples d'analyse des résultats mesurés

Les stations de contrôle automatisées pourraient avoir un mode de fonctionnement fondé sur l'analyse des résultats mesurés. Ce mode permet d'analyser les résultats mesurés à partir des équipements de mesure dans diverses conditions. L'analyse peut être réalisée dans un centre de gestion du spectre.

Les résultats de la mesure de la qualité du signal radioélectrique sont affichés sous forme de graphiques des valeurs mesurées (champ, décalage de fréquence, excursion de fréquence, largeur de bande occupée) par rapport au temps, de tracés de répartition de l'excursion ou de tracés de répartition cumulés de l'excursion et de spectrogrammes. L'affichage type d'un spectrogramme est illustré à la Figure 3-47. Bien que les graphiques de la valeur mesurée par rapport au temps soient des plus utiles pour une analyse sur de courtes périodes, les tracés de répartition de l'excursion ou les tracés de répartition cumulés de l'excursion sont précieux pour une analyse sur de longues périodes.

FIGURE 3-47

Graphique type d'une analyse en temps réel des résultats mesurés



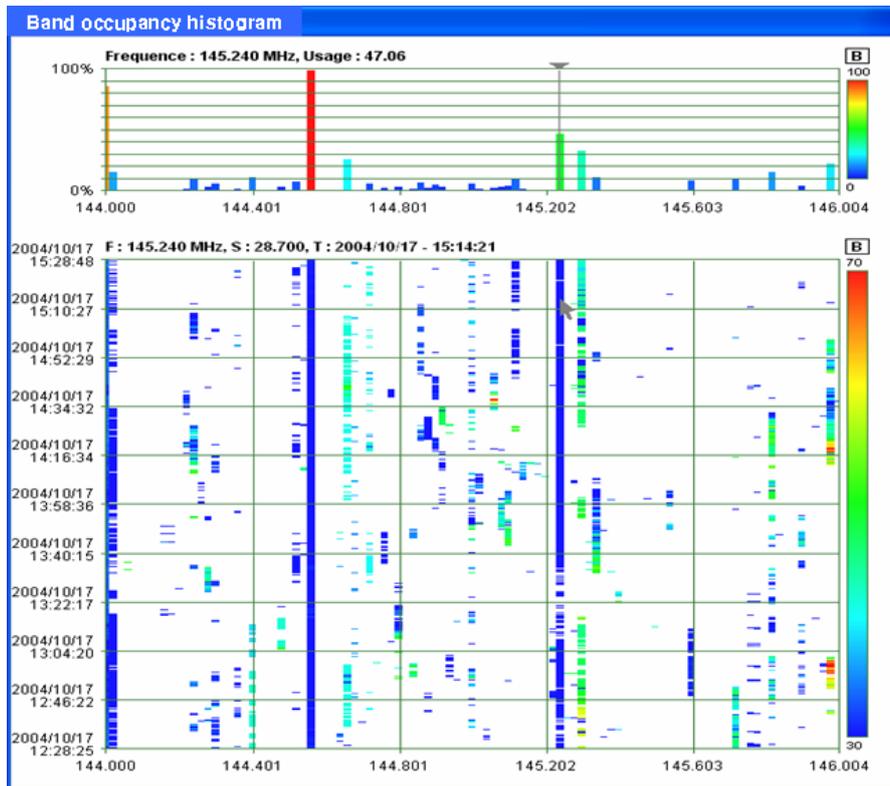
Spec-3-47

Les résultats de la mesure du degré d'occupation de la bande de fréquences peuvent s'afficher sur un graphique représentant la variation des fréquences par rapport au temps, le champ étant affiché en couleurs. Un affichage type est illustré à la Figure 3-48. L'histogramme du degré d'occupation de la bande de fréquences ainsi qu'un spectrogramme des signaux indiquent la cadence d'apparition des signaux, le taux d'occupation du spectre et le champ.

L'analyse du spectre peut être effectuée par diverses fonctions au moyen de résultats de la mesure du spectre rapidement produits. La bande spectrale est comparée à un diagramme de répartition des fréquences et la fréquence du signal est affichée selon l'indication du marqueur. Un affichage type est illustré à la Figure 3-49. Les résultats mesurés et analysés servent à prévoir les possibilités de brouillages et à détecter l'onde radioélectrique d'arrivée.

FIGURE 3-48

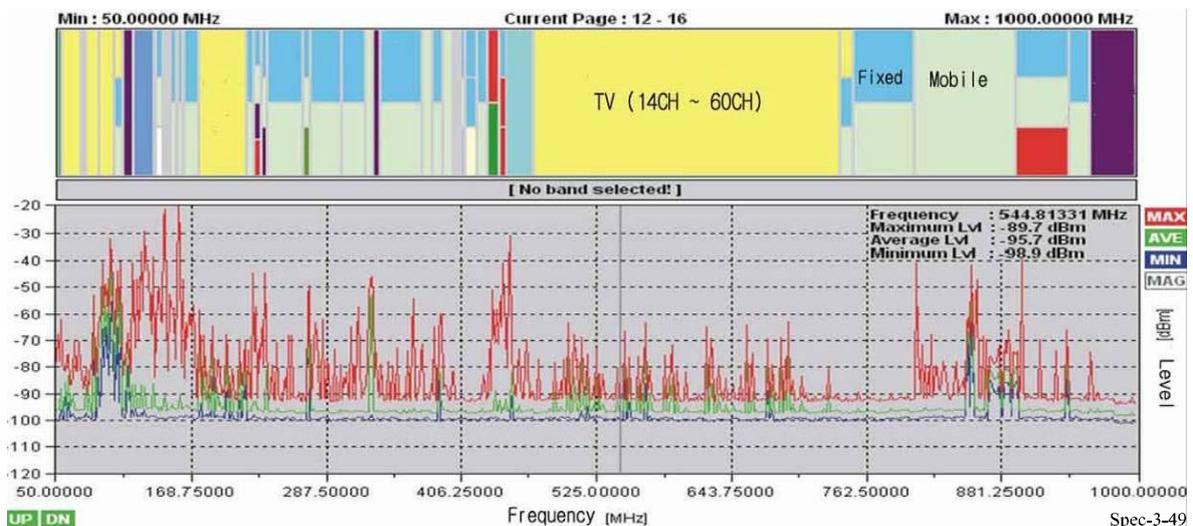
Histogramme de l'occupation de la bande de fréquences assorti d'un spectrogramme des signaux



Spec-3-48

FIGURE 3-49

Graphique représentant la bande spectrale par rapport à la répartition des fréquences



Spec-3-49

3.6.2.2.4 Fonctionnement en temps réel avec un rapide balayage du spectre, une radiogoniométrie instantanée et des alertes pour les opérateurs

Dans certaines bandes de fréquences, il est impératif de maintenir à tout moment un contrôle en temps réel de l'activité d'émission radioélectrique. Pour ce faire, il faut rapidement identifier et localiser les émetteurs licites tout en identifiant, localisant et éliminant rapidement les systèmes brouilleurs. Comme exemples de bandes de fréquences qui nécessitent une telle protection, citons la bande des fréquences aéronautiques, la bande des fréquences maritimes et divers canaux d'urgence qui sont essentiels pour les opérations de recherche et de sauvetage. Ce type de protection du spectre nécessite un système de contrôle des émissions capable de fonctionner en temps réel, avec un balayage rapide du spectre et des mesures radiogoniométriques instantanées de tous les signaux actifs. Lorsqu'il détecte des signaux actifs sur l'un quelconque des canaux d'urgence, le système doit pouvoir envoyer en temps réel des alertes aux opérateurs locaux ou distants.

Les fonctions de recherche de signaux, de radiogoniométrie et de contrôle intégrées dans un seul processeur permettent un balayage rapide du spectre ainsi que des mesures radiogoniométriques simultanées de tous les signaux détectés. Les systèmes types peuvent reconstruire jusqu'à plusieurs dizaines de canaux d'urgence et de canaux mobiles maritimes au moins dix fois par seconde et peuvent détecter et mesurer des signaux d'une durée aussi courte que 10 ms.

Les résultats radiogoniométriques sont mesurés simultanément pour des canaux dont le nombre peut aller jusqu'à plusieurs dizaines de canaux, et présentés en temps réel sur l'écran de l'opérateur. Les lignes de relèvement (LoB, *line of bearings*) correspondant à certains canaux sont affichées sur une grande carte numérique et un histogramme polaire. Si deux ou plusieurs stations de contrôle fonctionnent dans une configuration en réseau (voir § 3.6.3), le système affiche sur le poste de travail de l'opérateur non seulement la ligne de relèvement, mais aussi la triangulation résultante de l'émetteur correspondant. Cette opération est effectuée automatiquement par le système sans intervention de l'opérateur, et la localisation estimée est affichée sur l'écran de l'opérateur une fraction de seconde après le début de la transmission.

Toutes les mesures radiogoniométriques peuvent être automatiquement stockées dans une base de données locale sur le poste de travail de l'opérateur et y être conservées pendant un délai raisonnable comme 48 heures. L'opérateur peut effectuer diverses fonctions à partir de l'ordinateur de son poste de travail, notamment:

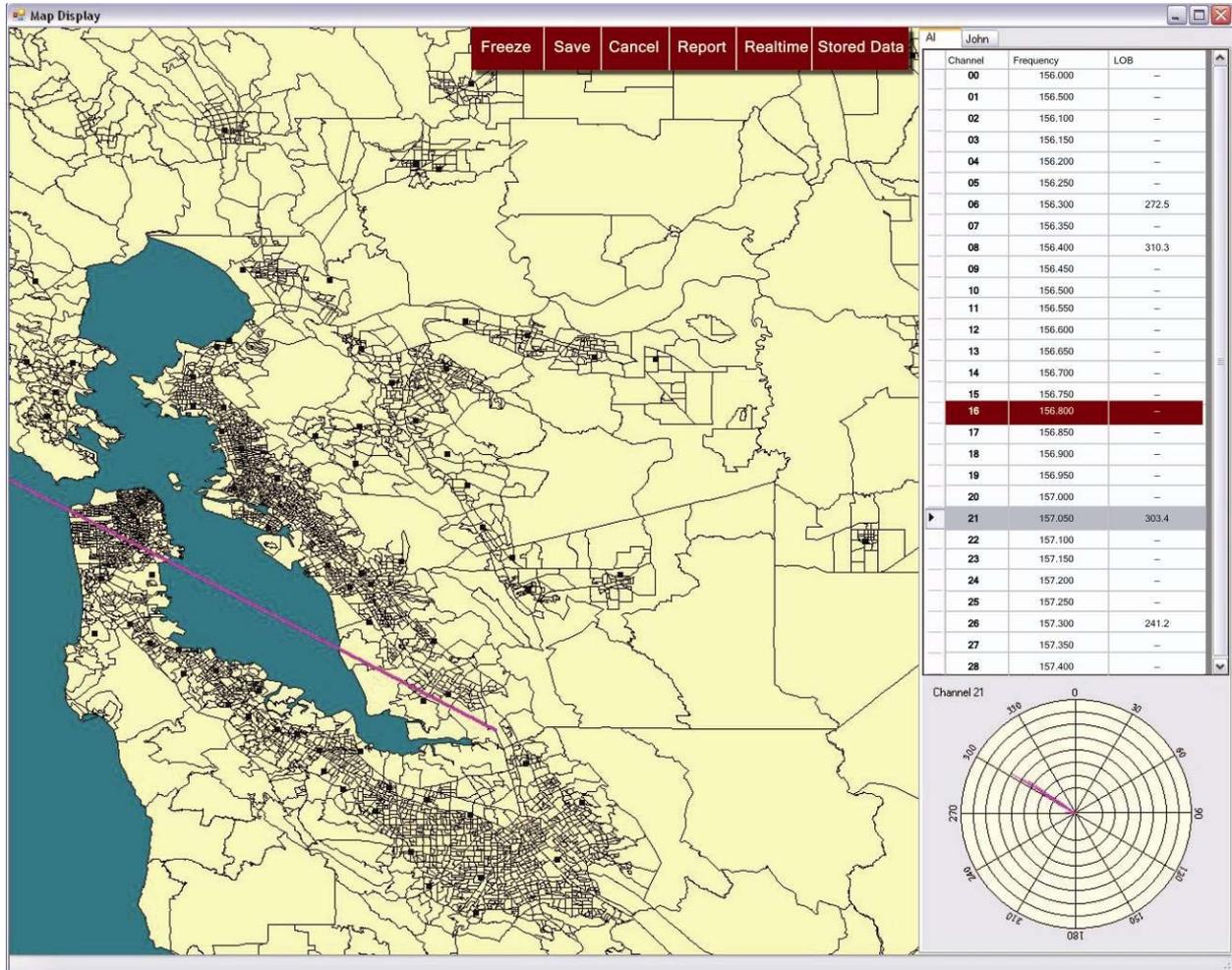
- contrôler en permanence l'activité des signaux, les lignes de relèvement et les déterminations de positions sur tous les canaux qui lui sont attribués;
- geler les résultats radiogoniométriques et créer un rapport sur l'emplacement des émetteurs qui est automatiquement stocké dans sa base de données locale;
- revoir les résultats radiogoniométriques et les déterminations de positions stockés sur son ordinateur;
- revoir les résultats radiogoniométriques stockés sur son ordinateur et créer des listes d'activités des signaux.

Un exemple de fonctionnement en temps réel dans la bande maritime avec un balayage rapide du spectre et une radiogoniométrie instantanée est illustré à la Figure 3-50. Les lignes de relèvement sont mesurées simultanément en temps réel pour un nombre de canaux pouvant aller jusqu'à 29 canaux et sont affichées sous forme numérique à l'écran (partie supérieure droite). Les lignes de relèvement de certains canaux sont affichées sur la carte (partie gauche) et sur l'histogramme polaire (partie inférieure droite). Dans cet exemple, l'opérateur a choisi de contrôler le canal 21 et il s'agit donc de la ligne de relèvement indiquée sur la carte et sur le diagramme polaire. Les touches de fonctions spéciales que l'opérateur peut utiliser sont indiquées en haut de l'écran.

La Figure 3-51 illustre le cas de figure où un signal est mesuré par plus d'une station de contrôle. Dans cet exemple, il y a deux stations. Le système détermine automatiquement la position et affiche les résultats sur la carte en temps réel.

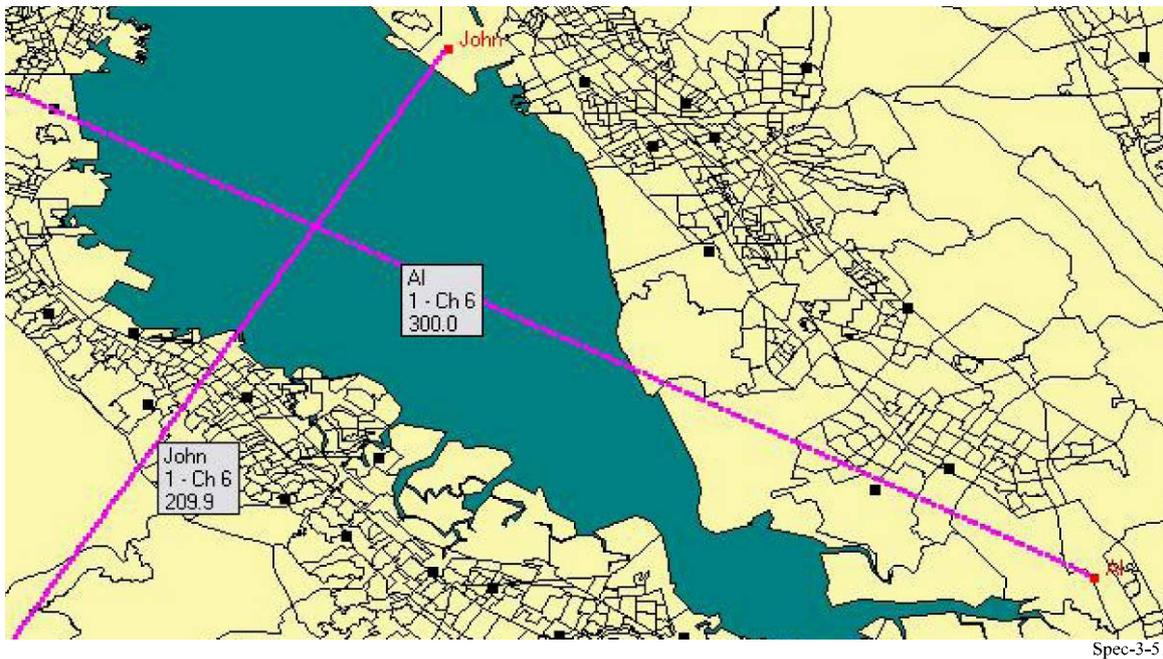
FIGURE 3-50

Résultats radiogoniométriques mesurés simultanément pour de nombreux canaux dont les données sont régénérées en temps réel (partie supérieure droite); les lignes de relèvement de certains canaux sont affichées sur la carte (partie gauche) et sur l'histogramme polaire (partie inférieure droite)



Spec-3-50

FIGURE 3-51
Calcul et affichage automatiques d'une position en temps réel,
pour un signal mesuré par plus d'une station



Le logiciel peut permettre à l'opérateur de définir plusieurs canaux de «priorité élevée». Si une activité de signal est détectée sur l'un des canaux de priorité élevée, le logiciel alerte automatiquement l'opérateur à l'écran, envoie une alarme sonore au poste de travail et peut aussi être programmé pour envoyer un message à une adresse électronique externe ou à un numéro de téléphone cellulaire.

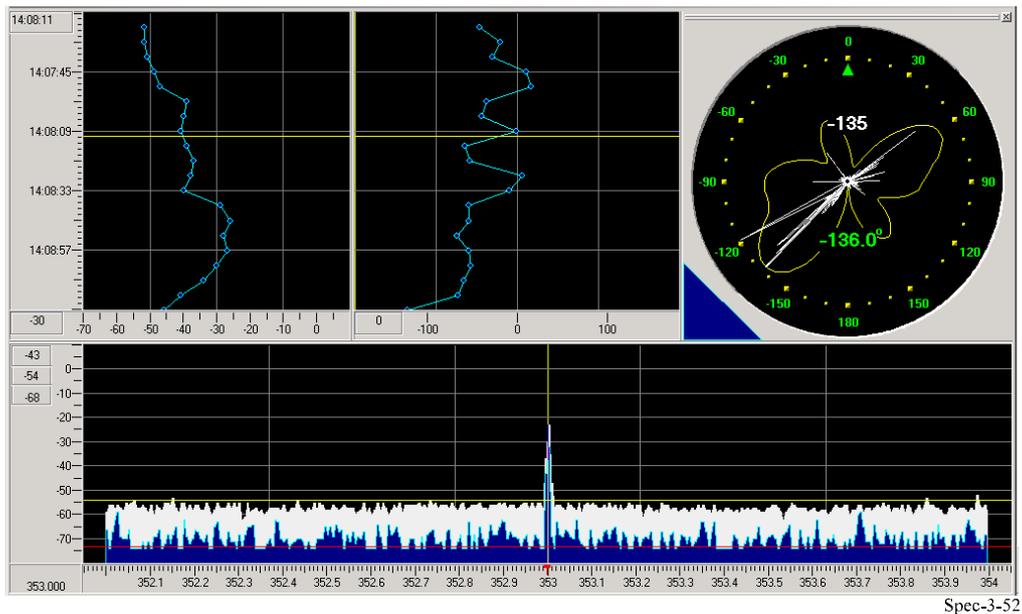
3.6.2.2.5 Exemple d'automatisation du ralliement radiogoniométrique

Un logiciel avancé d'automatisation du contrôle [Rembovsky et autres, 2006] permet aussi un traitement statistique au moyen de relèvements obtenus en permanence dans les stations de contrôle mobiles afin de simplifier les activités des opérateurs liées à la recherche d'émetteurs de signaux.

On trouvera à la Figure 3-52 un exemple de fenêtre d'affichage type du logiciel de commande des équipements traitant un signal intéressant. Cette fenêtre représente sous forme graphique l'historique des amplitudes des signaux (coin supérieur gauche de la Figure 3-52) et l'historique des relèvements (milieu de la figure). Les deux graphiques ont la même ordonnée temps. L'abscisse de l'historique des amplitudes est le niveau du signal de relèvement (dB), l'abscisse de l'historique des relèvements étant l'angle des relèvements (degrés).

Les graphiques de l'historique permettent de suivre dans le temps l'évolution de l'amplitude et du relèvement d'un signal. En outre, l'affichage circulaire se trouvant dans la partie supérieure droite de la fenêtre indique simultanément les valeurs de relèvement et la courbe représentant la densité de répartition des directions de relèvement (histogramme des relèvements) dont la valeur maximale correspond à la direction d'arrivée la plus probable. Toute modification de direction de la valeur maximale de la courbe de distribution des relèvements est indiquée sur l'historique des relèvements. Dans une situation de brouillage intense, la valeur angulaire d'un maximum montre la direction souhaitée en ce qui concerne le déplacement du radiogoniomètre.

FIGURE 3-52
Fenêtre du programme en mode raliement



Les historiques des amplitudes et des relèvements de la Figure 3-52 donnent des renseignements très utiles pour le raliement en temps réel. Dans cet exemple, l'accroissement graduel de l'amplitude du signal de -50 dBmV à -30 dBmV et les valeurs des relèvements au début des graphiques confirment que pendant la période considérée (de 14.07.45 à environ 14.08.45 sur la Figure 3-52), la station de contrôle mobile s'est rapprochée de l'émetteur du signal. Ensuite (à partir de 14.08.45 environ sur la Figure 3-52), cet émetteur se trouve à gauche du véhicule car les relèvements sont systématiquement passés à gauche et l'amplitude du signal commence à diminuer systématiquement. Pour localiser l'émetteur, la station de contrôle mobile devrait tourner de 180° , revenir en arrière et chercher l'émetteur sur son côté droit.

Le raliement assorti d'un historique des amplitudes et des relèvements présente entre autres l'avantage d'offrir une fiabilité accrue, un temps de recherche plus court et une réduction de l'effet des erreurs causées par les objets environnants car la station de contrôle mobile est en déplacement permanent et la direction la plus probable vers l'émetteur du signal est déterminée par un traitement statistique des données de relèvement obtenues de façon continue.

3.6.2.2.6 Recherche automatisée de l'emplacement des sources d'émissions électromagnétiques

Il est possible de recourir à une station mobile équipée d'un système de radiogoniométrie de grande vitesse fondé sur le principe de la corrélation ou de l'interférométrie et capable de fournir des renseignements radiogoniométriques (azimut et élévation) pour localiser un émetteur, un équipement grand public ou médical fonctionnant en ondes décamétriques, et d'autres sources de brouillage radioélectrique [Ashikhmin et autres, 2003], [Rembovsky et autres, 2006]. La station mobile devrait aussi être équipée d'une caméra vidéo et d'un logiciel personnalisé.

Pour une gamme de fréquences donnée, une session de recherche comprend trois étapes:

Etape 1: Compilation des trames de données brutes.

Etape 2: Analyse des trames et détermination des fréquences à étudier de plus près.

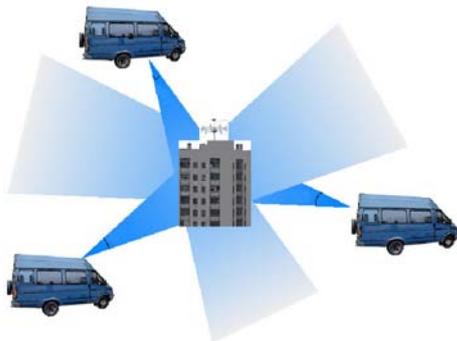
Etape 3: Analyse des fréquences de la liste et détermination précise des emplacements des sources.

La station mobile est positionnée en plusieurs endroits proches du site à examiner et en d'autres endroits relativement éloignés (Figure 3-53). Pour chaque position, une «trame» de données brutes est recueillie. Les données concernent les éléments suivants: panorama du spectre et des relèvements (fréquence, niveau, azimut et élévation), imagerie par caméra numérique du site décrivant les limites angulaires de celui-ci, telles

qu'elles sont vues à partir de la position de la station. En zone urbaine, l'analyse des relèvements est fondée sur des méthodes probabilistes en raison des effets de la propagation par trajets multiples et d'autres effets locaux. Théoriquement, la position devrait être choisie de sorte que le site à étudier se trouve en visibilité directe et qu'il n'y ait pas de bâtiments élevés ou de grandes structures métalliques à proximité de la station mobile. Plus on utilise de trames obtenues à partir de différentes positions, plus le positionnement est précis.

FIGURE 3-53

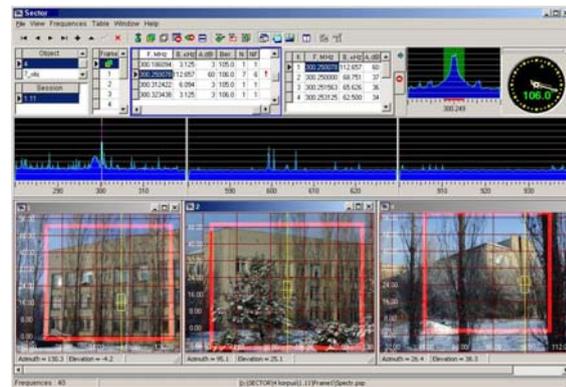
Une session de fonctionnement de la station mobile correspond à plusieurs "trames"



Spec-3-53

FIGURE 3-54

Vue de l'écran du module d'analyse après la deuxième étape



Spec-3-54

Au cours de l'étape 2, les données brutes recueillies servent à obtenir une liste de fréquences qui doivent être étudiées selon les critères ci-après: l'azimut et l'élévation mesurés sur une fréquence doivent se situer dans les limites angulaires du site pour deux trames ou plus; le niveau du signal mesuré à partir d'un lieu distant est bien plus faible que celui qui est mesuré à partir d'une position proche. La Figure 3-54 montre les écrans logiciels correspondant au cas de figure où la liste de fréquences est obtenue à partir de trois trames pour les positions distantes et de trois trames pour les positions proches. Le programme montre les images numériques du site obtenues à proximité immédiate de celui-ci. L'analyse a permis d'identifier un signal émis à 300,25 MHz, présent dans les six trames, l'angle d'arrivée se trouvant dans l'intérieur des limites angulaires du site. L'emplacement le plus probable de l'émetteur est le local du premier étage (quatrième ou cinquième fenêtre du bâtiment, à partir de la gauche).

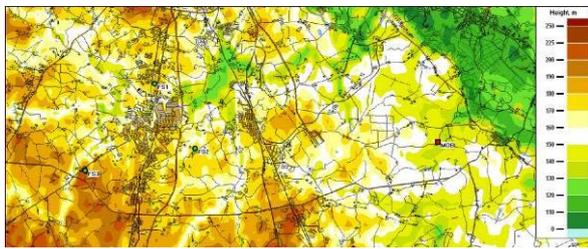
Au cours de l'étape 3, la liste de fréquences est analysée sur la base des données radiogoniométriques obtenues à partir de positions proches. Ces données sont superposées en temps réel à l'image vidéo du site, le signal étant écouté par l'opérateur. Pour accroître la fiabilité, la station peut être positionnée en plusieurs endroits.

3.6.2.2.7 Visualisation des zones de couverture des stations de contrôle du spectre à ondes métriques/décimétriques

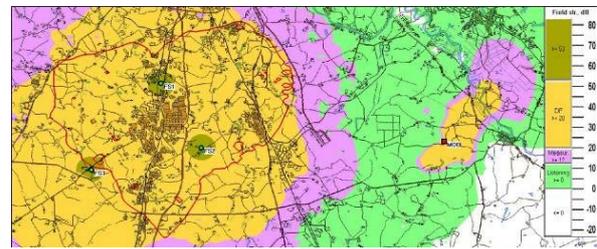
La pratique montre [Bondarenko et autres, 2008] que la méthode [Kogan et Pavlyuk, 2004] et le logiciel pertinent (voir l'«étude de cas N° 9» au Chapitre 5 du Manuel UIT sur les applications des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique, édition de 2005) pour la planification et la conception des réseaux de contrôle du spectre peuvent être utilisés avec succès pour l'automatisation de la visualisation des zones couvertes par les stations de contrôle fixes et surtout mobiles fonctionnant en ondes métriques/décimétriques fixes pendant leurs opérations. Cet outil permet aussi de déterminer les conditions d'interaction des stations de contrôle fixes et mobiles propres à renforcer leur efficacité lorsqu'elles réalisent diverses fonctions de contrôle.

Un exemple présenté à la Figure 3-55 illustre ces fonctions. Les calculs ont été effectués à l'aide d'un ensemble de paramètres présentés dans [Kogan et Pavlyuk, 2004].

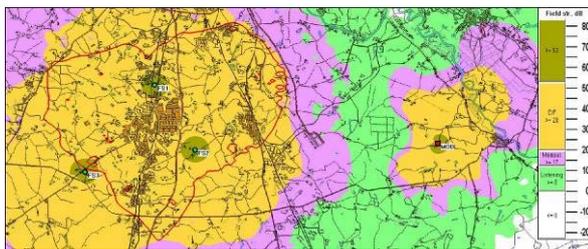
FIGURE 3-55



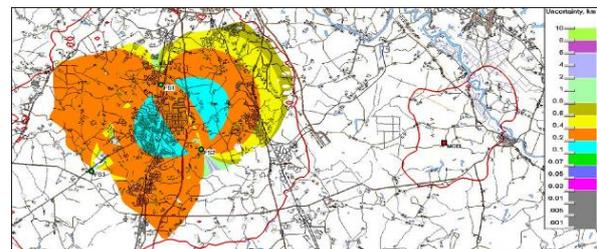
A) Topographie de la région étudiée



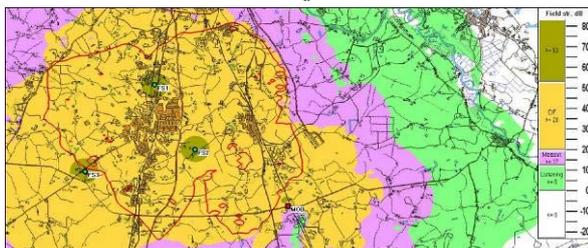
b) Zones de couverture communes dans le premier cas de figure ($H_a = 2$ m)



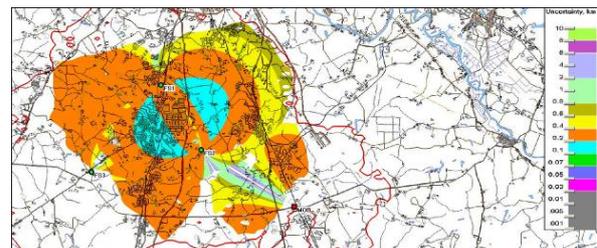
c) Zones de couverture communes dans le premier cas de figure ($H_a = 10$ m)



d) Modèle d'incertitude de la localisation pour le premier cas de figure ($H_a = 10$ m)



e) Zones de couverture communes dans le deuxième cas de figure ($H_a = 2$ m)



f) Modèle d'incertitude de la localisation pour le deuxième cas de figure ($H_a = 2$ m)

Spec-3-55

La Figure 3-55a) montre la topographie de la région étudiée, qui compte quelques collines présentant des différences de hauteur allant jusqu'à 120 m. Supposons qu'il y ait trois stations de contrôle/de radiogoniométrie fixes autour d'une ville (FS1, FS2 et FS3) présentant une incertitude en matière de radiogoniométrie de 1° (valeur efficace) et une station mobile présentant une incertitude en matière de radiogoniométrie de 2° (valeur efficace), qui est, dans le premier cas, située initialement assez loin du groupe de stations fixes.

Les Figure 3-55b) et 3-55c) présentent les zones couvertes par toutes les stations lorsque la station mobile reste assez loin du groupe de stations fixes. La Figure 3-55b) correspond à la hauteur d'antenne de la station mobile, $H_a = 2$ m, (antenne installée sur le toit de la voiture) et la Figure 3-55c) à la hauteur $H_a = 10$ m (mât d'antenne érigé). Une ligne rouge dans la zone de couverture radiogoniométrique montre les limites d'une zone où la localisation par triangulation est possible.

Les Figure 3-55b) et 3-55c) montrent aussi que la station mobile, située dans cette position et reliée à un réseau de contrôle local commun comprenant des stations fixes, peut interagir avec celles-ci uniquement lorsqu'elle accomplit une fonction d'écoute sur le territoire où se croisent les zones de couverture pertinentes. Si l'on relève le mât d'antenne jusqu'à 10 m, on observe un accroissement conséquent de la couverture de toutes les fonctions de contrôle à l'exception de la localisation.

La Figure 3-55d) présente un modèle de couverture dont les limites externes correspondent à la ligne rouge dans les zones de couverture radiogoniométriques des Figure 3-55b) et 3-55c). Sur le modèle, des zones en couleurs montrent les degrés d'incertitude de la localisation (en km) selon l'indice des couleurs situé à droite de la figure. La station mobile n'influe pas du tout sur le modèle. La ligne rouge externe correspond en l'occurrence aux limites des zones de couverture radiogoniométriques indiquées dans les Figures 3-55b) et 3-55c).

La Figure 3-55e), qui traite du deuxième cas de figure, présente la couverture de toutes les stations lorsque la station mobile dont la hauteur d'antenne est de 2 m reste au sommet d'une colline très proche d'un groupe de stations fixes. Il ressort des calculs qu'ériger le mât d'antenne à une hauteur de 10 m n'améliore pas sensiblement la situation.

Dans le deuxième cas, les zones de couverture radiogoniométriques des stations fixes et mobiles se croisent, ce qui signifie que ces stations peuvent interagir au moyen de la fonction de triangulation. Voir la Figure 3-55f) qui montre l'extension du modèle dans la direction sud-est. On trouvera plus de précisions et d'explications dans [Bondarenko et autres, 2005].

La brève description donnée ci-dessus démontre les grandes potentialités qu'offre l'outil de visualisation des zones de couverture contrôlées pour la prise en charge des opérations courantes des stations de contrôle fixes et surtout mobiles. Avec de tels moyens, les opérateurs des stations de contrôle ont des «yeux» pour voir les zones de couverture effectives des différentes stations ou de groupes de stations combinées dans un réseau local commun, par le biais de diverses fonctions de contrôle, ainsi qu'au moyen de l'interaction des stations mobiles avec les stations fixes les plus proches au cours de leur mission. Aujourd'hui, il est possible de déterminer rapidement le gain qu'une station mobile peut obtenir en déployant une antenne semi-stationnaire élevée et ainsi décider de ne pas consacrer de temps à une telle action si le gain sur un site particulier est négligeable. Ainsi, pour la première fois, les opérateurs peuvent être complètement informés de la situation à laquelle ils sont confrontés. Cette technique offre également la capacité d'étudier le futur itinéraire d'une station de contrôle mobile avant le début de la mission même et de choisir les meilleurs lieux d'observation sur l'itinéraire pour optimiser la mission et en raccourcir la durée.

3.6.3 Réseaux de contrôle informatisé

3.6.3.1 Introduction

Les stations de contrôle du spectre devraient être reliées les unes aux autres pour former un réseau informatisé, lequel devrait être relié à son tour au système national de gestion du spectre suivant les dispositions de la Recommandation UIT-R SM.1537 et ainsi qu'il est décrit au § 3.6.3.3. La gestion et le contrôle du spectre comportent un ensemble d'activités administratives et techniques qui peuvent être commodément exécutées dans le cadre d'un système en réseau, intégré.

Gestion du spectre: activités débouchant à terme sur l'octroi de licences ou d'autorisations. Pour exécuter ces tâches de gestion, il est essentiel de disposer d'une base de données informatique, laquelle contient des informations d'ordre administratif et technique: fréquences attribuées, titulaires des licences, caractéristiques des équipements, etc. C'est le noyau central du système informatisé, automatisé, de gestion du spectre.

Contrôle du spectre: activités qui consistent à vérifier que l'utilisation des fréquences est conforme aux clauses de l'autorisation ou de la licence; mesures du degré d'occupation du spectre, grâce aux stations de contrôle des émissions.

Il existe une relation importante et indissoluble entre la gestion du spectre et le contrôle du spectre, de sorte qu'il convient de maintenir une coopération étroite entre les deux, afin que les activités de contrôle du spectre soient utiles à la gestion du spectre.

Principaux domaines d'interaction entre la gestion et le contrôle du spectre:

- la gestion du spectre permet d'établir la liste officielle des fréquences assignées, aux fins du contrôle des émissions;
- la gestion du spectre fournit des instructions générales sur les bandes de fréquences à explorer et sur les tâches précises à effectuer en vue du contrôle;
- le contrôle du spectre reçoit de la gestion du spectre des demandes pour des tâches précises: par exemple, contrôle d'une situation de brouillage à la suite d'une plainte, afin de résoudre le problème et mesure du degré d'occupation sur des fréquences à assigner;
- le contrôle du spectre permet de mesurer des paramètres techniques et de vérifier la conformité technique des émetteurs, de déterminer les émetteurs non conformes ou qui ne sont pas au bénéfice d'une licence et de mettre au jour des problèmes spécifiques.

Grâce à l'interaction entre la gestion du spectre et les systèmes informatisés de contrôle du spectre, il est possible d'optimiser l'exploitation du point de vue de l'efficacité et du coût du système. Ce dernier est organisé autour d'une base de données informatique desservie par des ordinateurs individuels. Cette base de données est le centre de toutes les fonctions et applications associées: mise à jour des données, facturation, assignations des fréquences, etc., et mise à jour des paramètres relatifs aux fréquences et aux émetteurs.

3.6.3.2 Systèmes nationaux informatisés intégrés

Un système national informatisé, intégré et complet, de gestion et de contrôle du spectre s'appuie sur un ou sur plusieurs serveurs de données constitués en réseau pour que les postes de travail ou clients puissent, dans tout le système, accéder à la base de données. Parmi les serveurs du système de gestion figurent un serveur principal plus, éventuellement, un ou plusieurs serveurs dédiés à une base de données extraite de la base de données principale et/ou à une base de données spécialisée dans une application, ou reliée à un centre de commande local. Chaque station de contrôle des émissions, qu'elle soit fixe ou mobile, comporte un serveur affecté aux mesures et un ou plusieurs postes de travail (voir l'illustration de la Figure 3-39). Chaque station utilise une architecture modulaire faite de serveurs et de postes de travail interconnectés par un réseau local Ethernet.

Toutes les stations sont reliées dans le cadre d'un réseau étendu. Ce système, complètement intégré, devrait permettre à n'importe quel opérateur d'accéder rapidement à toutes les fonctions serveur disponibles dans le système, dont la configuration est illustrée à la Figure 3-38.

Le serveur principal comprend une base relationnelle des données administratives et techniques de la région ou du réseau national considéré, le contenu des données étant conforme à celui recommandé dans le Manuel UIT sur les applications des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique et dans la Recommandation UIT-R SM.1370. Ce serveur est le plus souvent un système à langage d'interrogation structuré, ou langage SQL, grâce auquel l'utilisateur habilité peut facilement interroger la base de données. Les bases de données modernes proposent des systèmes et des données redondants avec des sauvegardes périodiques. La base de données, avec réseau informatisé de type décentralisé, permet la réalisation d'une architecture client/serveur et d'un système informatisé décentralisé:

- le serveur de la base de données centralise la gestion des données, ce qui facilite les opérations de sécurité et assure un niveau d'intégrité élevé; il contient des données sur les applications, les licences, les sites, les équipements, la facturation, les assignations de fréquence, etc.; des parties de cette base de données peuvent éventuellement être copiées pour des applications spécifiques sur des serveurs locaux ou mobiles;
- les postes de travail de gestion, de supervision et d'entrée des données sont des ordinateurs individuels qui permettent de charger dans la base de données les paramètres administratifs et techniques et qu'utilisent les spécialistes de la gestion et du contrôle pour la gestion des fréquences, les contrôles techniques, etc.

Le logiciel de la base de données devrait permettre la soumission de données par voie électronique à partir d'une base de données existante, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un programme de conversion de données spécialement adapté.

3.6.3.2.1 Fonctionnement du réseau des stations automatisées

Dans un système intégré, le système de gestion devrait être interfacé aux stations de contrôle via un réseau étendu (WAN) pour qu'il puisse les commander, à distance ou localement, et recevoir en retour des compte rendus; les stations de contrôle des émissions peuvent être appelées à réaliser des mesures systématiques, conformément aux dispositions des Recommandations UIT-R, par exemple du degré d'occupation du spectre et des paramètres des signaux, ainsi que des relevés goniométriques sur telle ou telle fréquence spécifique à la suite d'une plainte. Ce sont les serveurs affectés aux mesures (voir § 3.6.2.2) situés aux stations commandées automatiquement qui exécutent les mesures demandées, dont les résultats sont ensuite mis à la disposition du personnel de supervision sous forme de rapports, alphanumériques ou graphiques.

Les rapports de contrôle peuvent comprendre des résultats de mesure et des visualisations géographiques d'une zone ou région couverte, avec:

- l'indication de l'emplacement des stations de contrôle des émissions;
- le relevé des émetteurs connus; et
- les résultats des relevements radiogoniométriques effectués par les stations (emplacement des émetteurs).

Qu'elles soient fixes ou mobiles, les stations de contrôle des émissions sont utiles à plusieurs titres dans un système national informatisé: les stations fixes se prêtent en effet aux opérations de contrôle de signaux sur une longue période ou dans les ondes décamétriques, où l'espace requis par les antennes est important et où la propagation est normalement de type ionosphérique et sur de grandes distances. Des stations fixes peuvent par ailleurs être utilisées à proximité des zones urbaines pour contrôler les fréquences dans les gammes d'ondes métriques et décimétriques; les stations mobiles et transportables peuvent quant à elles servir aux opérations de contrôle dans les gammes d'ondes métriques, décimétriques et centimétriques (et décamétriques pour les ondes de sol), étant donné que le système de mesure doit en général être déplacé sur zone, les distances de propagation étant moins grandes dans ces gammes; on peut en avoir très souvent besoin également lorsqu'on a à localiser avec précision des stations illicites ou une source de brouillage.

3.6.3.2.2 Accès à distance aux ressources du système

Grâce à un système intégré du type décrit au § 3.6.2.2 ci-dessus un client se trouvant à n'importe quelle station peut normalement accéder aux ressources de tous les serveurs affectés aux mesures, aussi bien ceux qui sont situés à la station où il est, que ceux qui se trouvent dans d'autres stations. Ainsi, toutes les ressources d'un réseau de plusieurs stations sont à la disposition de n'importe quel opérateur donné, pour autant que ce dernier ait l'autorisation requise pour accéder à la totalité de ces ressources.

Les stations de contrôle des émissions peuvent être télécommandées depuis un poste de travail situé dans un centre de contrôle du spectre, dans le centre de gestion, dans un centre de commande local ou encore localement à la station elle-même, et les résultats du contrôle peuvent être communiqués directement à ce poste de travail. Cette possibilité de commande à distance est bien commode pour les opérateurs du contrôle du spectre qui ont peut-être besoin de travailler depuis une position centrale au lieu d'avoir à parcourir parfois de grandes distances pour se rendre sur les différents sites de contrôle, à condition toutefois que leur présence dans ces mêmes sites ne soit pas indispensable. Il est important de noter que les données mesurées doivent toujours être analysées et validées par les opérateurs avant d'être entrées dans une base de données centrale.

Des liaisons de communication doivent être établies entre les diverses stations uniquement lorsqu'un client confie des tâches à exécuter à des serveurs distants, puis lorsqu'il demande à en connaître les résultats. Dès lors que ces liaisons sont établies pour la fixation des tâches, même si par la suite elles viennent à s'interrompre, les résultats des mesures ne sont pas perdus, mais sont conservés dans le serveur affecté aux mesures jusqu'à ce qu'ils soient demandés.

3.6.3.2.3 Détection automatique des infractions

Un système intégré de contrôle et de gestion du spectre peut comparer les mesures effectuées par les appareils de contrôle avec les informations de référence du système de gestion pour procéder à une détection automatique des infractions, c'est-à-dire déterminer les fréquences qui sont occupées par des émetteurs ne figurant pas dans la base de données des titulaires de licence ou qui sont exploitées au-delà des limites des paramètres qui ont été déclarés. Cette fonction de détection automatique permet à l'opérateur de délimiter des plages de contrôle, en fixant les fréquences de début et de fin de la ou des bandes à contrôler, et de fixer des paramètres de contrôle, en particulier les tranches horaires pendant lesquelles la procédure pourra être appliquée.

Le système devrait être capable de procéder à un balayage d'une plage de fréquences déterminée et pendant la durée indiquée. Il utilise le résultat des mesures ainsi obtenues ainsi que les informations de la base de données de référence pour déterminer, dans le spectre contrôlé, les signaux qui ne sont pas répertoriés, fournissant automatiquement ainsi une liste de fréquences utilisées qui ne figurent pas dans la base de données. Le système devrait par ailleurs vérifier les paramètres des signaux, comme leur largeur de bande, sur l'excursion de modulation par rapport à la fréquence centrale déclarée dans la licence, et émettre des alarmes ou des rapports lorsqu'il constate des infractions. Les rapports attirent donc l'attention de l'opérateur sur l'existence de signaux inattendus ou non conformes par rapport aux critères par défaut ou aux critères que l'opérateur a déterminés, lui permettant de procéder à un examen plus détaillé. Les résultats d'une détection automatique, notamment les informations sur les émetteurs non conformes ou non autorisés par fréquence ou par canal, sont affichés sur un écran prévu à cet effet. Une carte géographique semblable à celle de la Figure 3-41 peut repérer les stations autorisées et les émetteurs non conformes ou non autorisés.

Pour faciliter la procédure de détection automatique des infractions et garantir qu'elle reste opérationnelle même en cas d'interruption des liaisons de communication entre des stations, chaque station, qu'elle soit fixe ou mobile, doit disposer de sa propre base de données concernant les émetteurs autorisés à émettre dans sa zone de couverture et la tenir à jour; cette base de données est établie à partir de la base de données du système de gestion. Ainsi, grâce à l'existence de cette base de données locale, chaque station, qu'elle soit fixe ou mobile, peut continuer d'être exploitée et procéder à la détection automatique des infractions même en cas d'interruption de liaisons de communication.

3.6.3.2.4 Exemple de protocole de transfert du contrôle des émissions permettant d'exploiter de nombreuses stations de contrôle à partir d'une station de commande

Un protocole de transfert du contrôle des émissions (RMTP, *radio monitoring transfer protocol*) a été mis au point pour permettre à une seule station de commande, avec des utilisateurs locaux ou distants, de gérer diverses stations de contrôle fixes ou mobiles distantes provenant de fournisseurs différents. Les fabricants considérant généralement leur protocole de communication et de commande comme étant exclusif, un protocole de messagerie type utilisé par le centre de commande a été établi, et les fabricants ont été encouragés à fournir une interface pour ce protocole type du centre de commande. On trouvera à la Figure 3-56 un exemple de la structure logicielle utilisée.

FIGURE 3-56

Structure logicielle du réseau de contrôle



Spec-3-56

Le centre de commande peut ainsi connaître la situation des diverses stations distantes connectées, ouvrir des fenêtres pour commander leurs récepteurs et définir d'autres paramètres pour les tâches à réaliser par les stations distantes, demander des mesures techniques et des mesures radiogoniométriques, effectuer un balayage des bandes de fréquences spécifiées à l'aide des largeurs de bande indiquées, et exécuter d'autres fonctions de contrôle types.

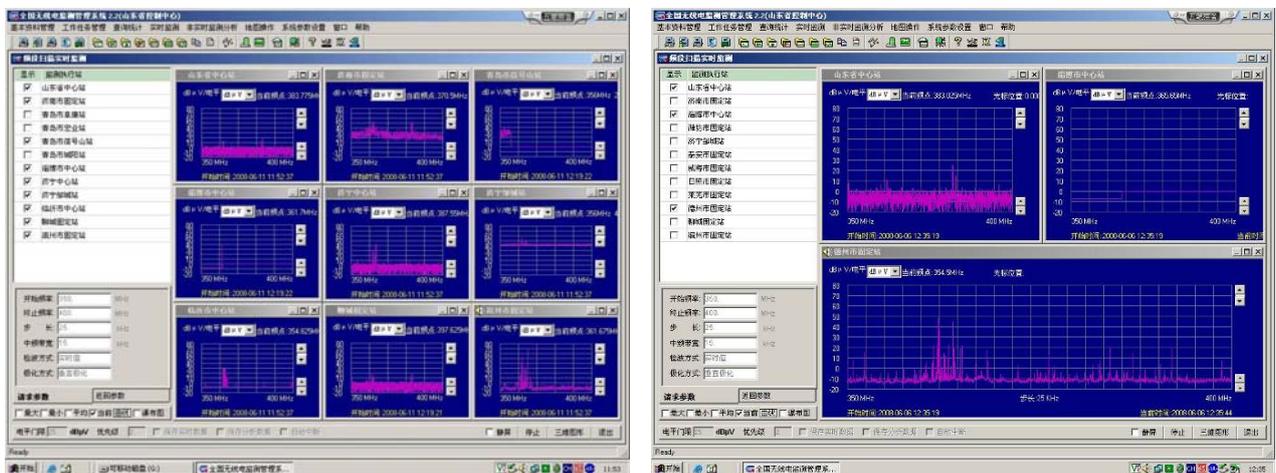
Le centre de commande peut obtenir des résultats de mesures, afficher les renseignements de radiogoniométrie et de localisation sur des cartes géographiques, visualiser des affichages panoramiques (à condition que les voies de communication aient une largeur de bande suffisante pour régénérer les affichages panoramiques en temps réel), visualiser des affichages du spectre, des affichages de précipitations et d'autres données de contrôle du spectre. Le centre de commande peut comparer les mesures à la base de données des fréquences autorisées afin de déterminer les fréquences susceptibles d'être utilisées par des stations ne disposant pas d'une licence et de trouver les fréquences autorisées non utilisées.

Même si les données de contrôle peuvent être mesurées sur du matériel fourni par des fabricants différents, elles sont toutes obtenues des stations de contrôle distantes à l'aide du protocole RMTP et affichées sur des écrans du centre de commande. La Figure 3-57 donne deux exemples d'écran de centre de commande; à gauche, on peut voir neuf affichages du spectre provenant de neuf stations de contrôle distantes différentes et de récepteurs construits par des fabricants différents et, à droite, trois affichages du spectre. Dans certains cas, les spectres sont très différents du fait que certaines stations sont très éloignées les unes des autres. Sur les deux écrans, le coin supérieur gauche indique une liste de toutes les stations connectées qui peuvent être choisies à partir du centre de commande pour effectuer une opération de contrôle ou de radiogoniométrie donnée, et le coin inférieur gauche permet de saisir des paramètres, y compris fréquences, largeur de bande, polarisation, démodulation, etc., au début, à la fin et pendant les différentes étapes.

Si cet exemple concerne des stations de contrôle situées dans un pays, le même protocole RMTP pourrait être appliqué aux stations en réseau se trouvant dans plusieurs pays, de sorte que ces stations peuvent puissent être commandées à partir d'un ou de plusieurs centres de commande. Cela permettrait aux administrations de divers pays de partager des ressources, par exemple utiliser des radiogoniomètres dans d'autres pays pour améliorer la précision de la localisation d'un émetteur fonctionnant sans licence.

FIGURE 3-57

Exemples de mesures du spectre effectuées à partir de neuf stations de contrôle (écran à gauche) et de trois stations de contrôle (écran à droite)

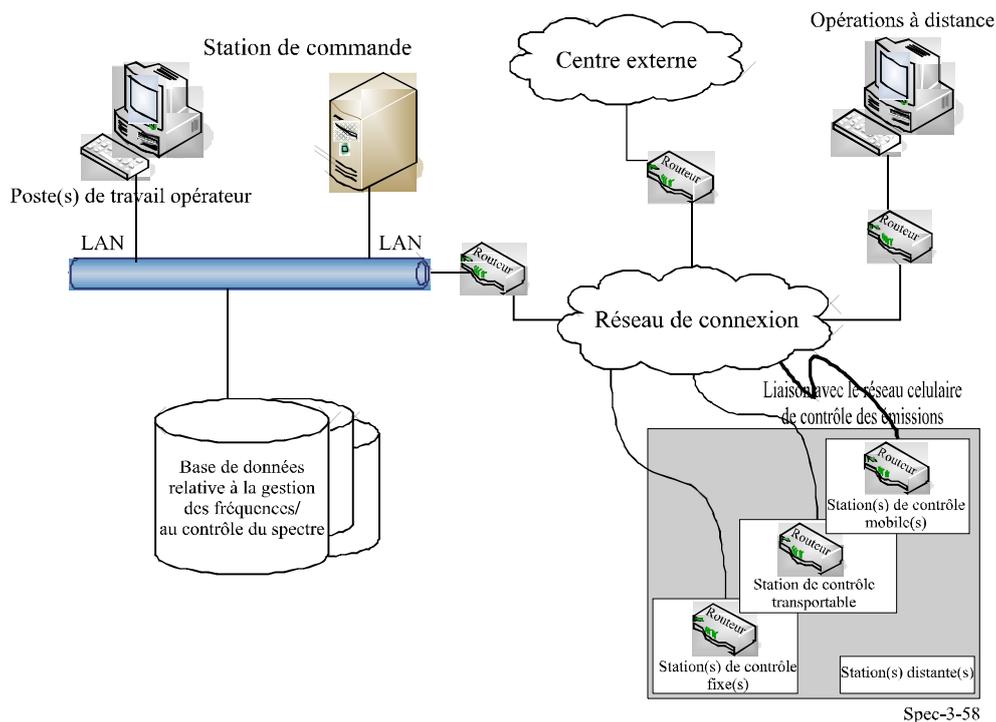


Spec-3-57

3.6.3.3 Exemple d'un système automatisé pour ondes décamétriques, métriques et décimétriques

Pour le contrôle du spectre dans le présent exemple, on a un réseau de contrôle technique (voir la Figure 3-58), comprenant un certain nombre de stations distantes connectées à une station de commande par l'intermédiaire d'un réseau de communication standard.

FIGURE 3-58
Exemple d'un système informatisé pour ondes décamétriques, métriques et décimétriques



Les différents éléments composant ce système se présentent comme suit:

- Les *postes de travail opérateur* sont chargés d'exécuter les tâches de contrôle des émissions décrites au Chapitre 2 du présent Manuel.
- Les *stations de commande* sont chargées de gérer et de superviser le système, de planifier et d'attribuer les ressources, d'acheminer les messages, de gérer les modes par défaut et de gérer les plages de fonctionnement du système.
- Les *stations distantes* pourraient comporter différents équipements de contrôle pour assurer une partie ou la totalité des opérations de contrôle décrites au Chapitre 2 du présent Manuel.

Les stations distantes peuvent être de quatre types fonctionnant dans diverses bandes de fréquences:

- stations fixes automatisées ou non;
- stations transportables disposées dans un abri mobile et connectées à la station de commande par une liaison de données fixe ou hertzienne;
- stations mobiles à bord d'un véhicule et connectées à la station de commande par une liaison de données fixe ou hertzienne;
- stations portables enfermées dans une mallette et connectées à la station de commande par une liaison de données fixe ou hertzienne.

Toutes les stations sont entièrement automatiques et seulement placées sous la surveillance d'un opérateur du centre de commande d'exploitation. Pour chaque station de contrôle des émissions, il existe deux modes de fonctionnement différents, à savoir:

- premièrement, la station est commandée en ligne, ce qui permet à un opérateur d'utiliser la station distante comme s'il s'agissait d'une station locale;
- deuxièmement, la station distante est à même de fonctionner en mode programmé ou par lots, ce qui lui permet de charger un ensemble de paramètres en vue d'une campagne de mesure automatique qu'elle devra effectuer à un moment donné.

La Figure 3-59 représente, à titre d'exemple, une station distante fonctionnant en ondes décamétriques/métriques/décimétriques.

3.6.4 Equipement pour la présentation des résultats et logiciels des systèmes automatisés

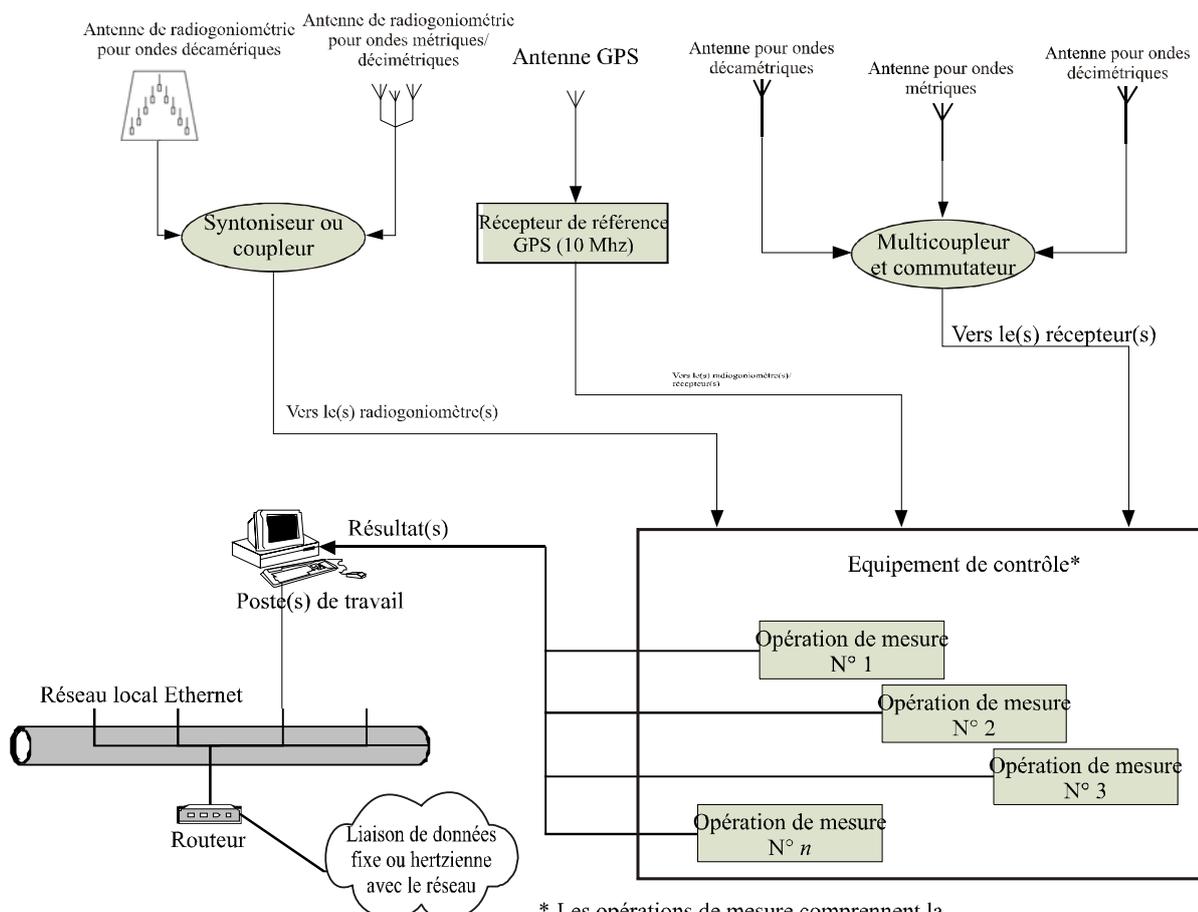
Les systèmes modernes de contrôle du spectre utilisent un logiciel informatique pour produire des rapports, en général fondés sur les mesures réalisées, mais également sur d'autres données disponibles dans les bases de contrôle et de gestion du spectre. C'est ainsi qu'il est possible d'obtenir des rapports sur des sujets forts divers allant d'informations brutes de traces à des rapports sur les projets et calendriers de contrôle en passant par l'analyse des porteuses par date ou bande, le degré d'occupation par canal, des statistiques de disponibilité et sur la longueur des messages ou le relevé de telle puissance dans tel canal et, enfin, le registre des alarmes et autres relevés concernant le système. La Figure 3-60 illustre un rapport type généré par ordinateur. Le système tel que décrit devrait permettre l'adaptation ou la personnalisation des rapports selon les souhaits de l'opérateur.

Des rapports devraient pouvoir être produits automatiquement à partir de n'importe quel écran de résultats. Pour ce faire, l'opérateur indique le type de rapport qui l'intéresse et les données de mesure à utiliser; il active ensuite une fonction «rapport» pour générer automatiquement sur son écran des rapports en forme de texte. Pour examiner des données on préfère souvent avoir des rapports graphiques, qui en donnent une représentation qui en résume l'information et permet d'en dégager facilement les tendances et les anomalies. L'utilisation de couleurs permet en outre de transmettre par un seul graphique une information beaucoup plus complète.

Qu'il fasse partie d'une unité mobile ou d'une station fixe ou encore d'un système de gestion, un système moderne devrait dans tous les cas être doté de la fonction de rapport automatisé; par ailleurs, il devrait être doté d'un logiciel type lui permettant de créer à distance des rapports à partir d'une base de données située sur un autre site.

FIGURE 3-59

Exemple de station distante pour ondes décamétriques/métriques/décimétriques



* Les opérations de mesure comprennent la radiogoniométrie, la mesure des excursions de fréquences, etc. Toutes les opérations peuvent concerner un ou plusieurs équipements.

FIGURE 3-60

Partie d'un rapport type d'occupation généré par ordinateur

Occupation d'un canal

Task No:	676	Storage interval:	15 s
Operator ID:	TRNI	Msg length:	15 s
Schedule time:	2/12/01 6:01:02 PM	Threshold method:	Noise riding 10 dB
Completion time:	2/12/01 6:01:02 PM	Duration:	Fixed: 30 min
StartFreq:	88.100000 MHz	Band No.:	1
StopFreq:	107.900000 MHz	Bandwidth:	50 kHz
Site location:	S 23 24' 47.5"	NumChannels:	397
	W 142 0' 59"		

Channel:	Frequency:	Max occupancy:	Avg occupancy:
•			
•			
21	89.100000	0	0
22	89.150000	4	0
23	89.200000	4	0
24	89.250000	80	53
25	89.300000	100	99
26	89.350000	76	51
27	89.400000	4	0
28	89.450000	0	0
29	89.500000	0	0
30	89.550000	0	0
31	89.600000	4	0
32	89.650000	9	0
33	89.700000	57	32
34	89.750000	14	2
35	89.800000	4	0

Spec-3-60

Références bibliographiques

- ASHIKHMIN, A., KOZMIN, V., SHADRIN, I., STOPKIN, V. et ZHUKOV, A. [2003] Detection of EM-Wave Transmitters by means of Mobile Radio Control and Direction Finding Stations. *Spetsialnaya Tekhnika*, 5, (<http://www.ircos.ru/eng/articles.htm>).
- BONDARENKO, K., KRUTOVA, O. et PAVLYUK, A. [juin 2008] Visualization of coverage areas of VHF/UHF spectrum monitoring stations in the course of their routine operations. Proceedings of the Nineteenth International Wroclaw Symposium on EMC, Wroclaw, Pologne.
- KOGAN, V. et PAVLIOUK, A. [juin 2004] Methodology of spectrum monitoring networks planning. Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium on EMC, Wroclaw, Pologne.
- REMBOVSKY, A., ASHIKHMIN, A. et KOZMIN, V. [2006] *Radiomonitoring: Problems, Methods and Equipment*. Moscou, Goriachaya Liniya-Telekom press (<http://www.ircos.ru/eng/articles.htm>).

Recommandations UIT-R:

NOTE – Il conviendrait dans tous les cas d'utiliser la version la plus récente de la Recommandation.

Recommandation UIT-R SM.1050 – Missions confiées à un service de contrôle des émissions.

Recommandation UIT-R SM.1370 – Directives de conception pour la réalisation des systèmes évolués de gestion automatisée du spectre.

Recommandation UIT-R SM.1537 – Automatisation et intégration de systèmes de contrôle du spectre avec gestion automatisée du spectre.

Recommandation UIT-R SM.1794 – Systèmes de contrôle du spectre à grande largeur de bande instantanée.

CHAPITRE 5

SYSTEMES DE CONTROLE SPECIFIQUES ET PROCEDURES CORRESPONDANTES

5.1 Contrôle des émissions des engins spatiaux

	<i>Page</i>
5.1 Contrôle des émissions des engins spatiaux.....	89
5.1.1 Tâches et mesures à effectuer	89
5.1.1.1 Types de mesure.....	91
5.1.1.2 Types de brouillages causés par les systèmes de satellites	91
5.1.2 Méthodes de mesure.....	92
5.1.2.1 Généralités	92
5.1.2.2 Mesures de fréquence.....	92
5.1.2.3 Mesures de la largeur de bande.....	95
5.1.2.4 Mesures de la puissance surfacique	96
5.1.2.5 Mesures de la polarisation.....	98
5.1.2.6 Détermination des positions orbitales et des paramètres orbitaux	98
5.1.2.7 Géolocalisation d'émetteurs au sol au moyen de mesures de la différence entre les instants d'arrivée et de la différence de fréquence à l'arrivée pour des signaux provenant de deux satellites OSG.....	99
5.1.2.8 Géolocalisation d'émetteurs au sol à l'aide d'un seul satellite OSG et de l'effet Doppler inverse.....	102
5.1.2.9 Mesures du degré d'occupation des fréquences et du degré d'occupation des positions en orbite géostationnaire.....	104
5.1.2.10 Mesures au-dessous du plancher de bruit.....	105
5.1.3 Conditions devant être remplies par les équipements et les installations.....	106
5.1.3.1 Généralités	106
5.1.3.2 Facteur de qualité d'un système de contrôle pour les services spatiaux.....	107
5.1.3.3 Systèmes d'antenne	109
5.1.3.4 Pointage des antennes	110
5.1.3.5 Ouverture de faisceau d'antenne nécessaire pour les mesures d'angles	110
5.1.3.6 Polarisation du système.....	111
5.1.3.7 Récepteurs.....	111
5.1.3.8 Equipements périphériques.....	112

	<i>Page</i>	
5.1.3.9	Canal de contrôle RF ou FI à large bande.....	113
5.1.3.10	Enregistreur de spectre radioélectrique.....	113
5.1.3.11	Équipement informatique nécessaire	113
5.1.4	Documentation et bases de données pour le contrôle destiné aux services spatiaux	113
5.1.4.1	Considérations d'ordre général sur la documentation et les bases de données.....	113
5.1.4.2	Base de données contenant des informations générales sur les satellites existants.....	114
5.1.4.3	Base des données de contrôle.....	114
5.1.4.4	Utilisation de la documentation et des bases de données afin de simplifier le contrôle	114
5.1.5	Identification des stations spatiales et géolocalisation des stations terriennes.....	115
5.1.5.1	Résultats de contrôle à utiliser pour l'identification.....	115
5.1.5.2	Procédure d'identification	116
5.1.5.3	Autres possibilités d'identification des stations spatiales.....	116
5.1.5.4	Considérations opératoires concernant la géolocalisation de stations terriennes émettant vers des satellites OSG.....	117
5.1.6	Solutions techniques: exemples	120
5.1.6.1	Exemple d'une station de contrôle des émissions radioélectriques spatiales	120
5.1.6.2	Processus de contrôle des émissions radioélectriques des satellites OSG	140
5.1.6.3	Contrôle précis de la longitude orbitale (radio-interférométrie).....	143
5.1.7	Exemples de résultats fournis par le contrôle des émissions	149
5.1.7.1	Enregistrement des bandes de fréquences en ondes métriques (VHF)	149
5.1.7.2	Calcul des paramètres orbitaux à partir des mesures angulaires sur les antennes.....	151
5.1.7.3	Mesures du degré d'occupation des répéteurs	152
5.1.7.4	Inclinaison des satellites OSG.....	154
5.1.7.5	Résultat et présentation d'une mesure de géolocalisation	154

5.1 Contrôle des émissions des engins spatiaux

5.1.1 Tâches et mesures à effectuer

Un service de contrôle des émissions, responsable de la bonne application des lois et règlements nationaux et participant au système international de contrôle des émissions conformément à l'Article 16 du Règlement des radiocommunications (RR), prendra part, en principe, au contrôle des émissions en provenance de stations spatiales. Cette activité est le prolongement naturel et nécessaire de la mise en œuvre des moyens, des techniques et des opérations de contrôle normalement appliqués par ce service.

En général, les tâches confiées à une station de contrôle radioélectrique pour les services spatiaux ne diffèrent pas de celles d'une station de contrôle classique. Cela étant, le contrôle radioélectrique pour les services spatiaux nécessite l'utilisation d'équipements de mesure plus complexes, par exemple des systèmes d'antenne plus perfectionnés, de même que des procédures de contrôle et de mesure différentes. Cela s'explique principalement par le fait que les stations spatiales se trouvent à bord de satellites dont la position varie en fonction du temps, à l'exception des satellites en orbite géostationnaire (OSG) rigoureusement contrôlée. Il est essentiel de connaître au préalable l'orbite de ces objets pour pouvoir en effectuer des observations et des mesures, quelles qu'elles soient.

Etant donné que le contrôle pour les services spatiaux diffère du contrôle dans le service Terre en termes de techniques de mesure, mais aussi de terminologie, l'équipement qui fournit le service spatial est appelé «station de contrôle pour services radioélectriques spatiaux». Les fonctions d'une telle station peuvent être décrites comme suit:

- observation régulière et systématique du spectre des fréquences radioélectriques en vue de détecter et d'identifier les émissions en provenance des stations spatiales;
- détermination de l'occupation et du pourcentage d'utilisation des répéteurs ou des émetteurs des stations spatiales;
- mesure et enregistrement des caractéristiques des émissions en provenance des stations spatiales;
- examen et élimination des brouillages préjudiciables causés par les émissions des stations spatiales, s'il y a lieu, en coopération avec les stations de contrôle de Terre et d'autres stations de contrôle pour les services spatiaux;
- examen et élimination des brouillages préjudiciables causés aux fréquences d'une station spatiale par les émissions des stations de Terre, de stations terriennes inconnues ou d'autres satellites, par exemple en observant et en mesurant le signal brouilleur d'un répéteur de la même manière que pour les émissions légitimes des stations spatiales (voir § 5.1.1.1 ci-après);
- mesures et enregistrements dans le cadre de projets techniques et scientifiques;
- détection de l'usage illégal de répéteurs et identification de la ou des sources;
- utilisation de techniques satellitaires spéciales pour localiser les émetteurs au sol;
- contrôle avant lancement, pendant la phase préliminaire de lancement d'un satellite, des fréquences utilisées pour la télémétrie, la télécommande et le suivi relatifs à la position orbitale. Ce contrôle avant lancement permet de sécuriser le lancement et le début de fonctionnement en orbite, y compris la position.

S'il s'agit d'observer des engins spatiaux de tous types, il faut que le système d'antenne puisse effectuer la poursuite des satellites placés sur orbite basse et sur orbite fortement elliptique. Il doit aussi pouvoir se pointer avec précision sur tout satellite géostationnaire.

Les communications satellitaires se divisent en trois services radioélectriques:

- *Service fixe par satellite (SFS)*

Le SFS comprend tous les services de communication satellitaire fondés sur des infrastructures fixes par l'intermédiaire de réseaux publics ou privés offrant la téléphonie, le fax, Internet, la vidéo et des services de données.

– *Service de radiodiffusion par satellite (RDS)*

Ce service radioélectrique est principalement utilisé pour la diffusion de la télévision et de signaux vidéo.

– *Service mobiles par satellite (SMS)*

Les services SMS sont principalement utilisés pour les services mobiles de téléphonie et de données et pour la navigation et la gestion de flotte par satellite.

Pour offrir les fonctionnalités susmentionnées, il convient de mettre en balance le coût global du système avec les choix de conception: couverture en fréquence, sensibilité du système, fréquence de pivotement de l'antenne, précision de pointage de l'antenne, facilité de remplacement du système d'alimentation de l'antenne en cas de besoin, largeur de bande de réception réalisable, degré de perfectionnement du système d'analyse des signaux et degré d'automatisation des mesures. Le système idéal serait un système de contrôle des engins spatiaux très automatisé et perfectionné, complètement orientable, avec une couverture en fréquence ininterrompue entre 1 et 30 GHz, par exemple, et ayant une sensibilité suffisante pour donner des rapports porteuse/bruit d'au moins 26 dB avec tous les signaux présentant un intérêt. Or, pour prendre un exemple très concret, de légères améliorations de la sensibilité entraînent des coûts qui augmentent de façon presque exponentielle. Chaque administration doit par conséquent analyser ses priorités et ses besoins internes pour ce qui concerne la gestion du spectre radioélectrique et faire des choix en matière de contrôle des services spatiaux.

Le Tableau 5.1-1 présente une vue d'ensemble des facteurs à examiner lorsque l'on mène des activités de contrôle mettant en jeu des signaux satellitaires. Le Tableau est organisé par type de satellite et par type de trajet des signaux (liaison montante vers le satellite, liaison descendante en provenance du satellite).

TABLEAU 5.1-1

Facteurs à examiner lorsque l'on mène des activités de contrôle mettant en jeu des signaux satellitaires

Type de satellite	Emissions des engins spatiaux situés sur le satellite (liaisons descendantes)	Emissions de stations terriennes vers le satellite (liaisons montantes)
Orbite de satellite géostationnaire (OSG)	Les opérations de contrôle sont généralement effectuées par des stations de contrôle fixes, du fait de la qualité de fonctionnement supérieure de leurs antennes et de leur meilleure sensibilité. Pour les satellites géostationnaires, les antennes sont nécessairement positionnées sur l'équateur.	Le contrôle des émissions des stations terriennes vers des satellites géostationnaires, y compris des microstations (VSAT) utilisées par de nombreuses entreprises, est effectué par des véhicules mobiles fonctionnant dans la bande de fréquences appropriée. Les antennes de stations terriennes classiques associées à un satellite ayant une forte directivité, l'équipement de mesure doit se trouver à proximité de l'antenne émettrice ou dans son faisceau principal.
Non OSG	Les opérations de contrôle sont généralement effectuées par des stations de contrôle fixes possédant une antenne dotée d'une fonction de poursuite (on peut également utiliser des systèmes mobiles dotés d'une fonction de poursuite). L'antenne de la station de contrôle doit poursuivre en continu la position du satellite en utilisant l'une des méthodes de poursuite de satellite décrites plus loin dans ce chapitre.	Le contrôle des émissions en provenance des stations terriennes vers des satellites non géostationnaires est réalisé par des véhicules mobiles. Comme dans le cas des satellites géostationnaires, les antennes ayant une forte directivité, l'équipement de mesure doit se trouver à proximité de l'antenne émettrice ou dans son faisceau principal. Autre facteur à prendre en compte: les mouvements effectués par l'antenne émettrice pour suivre l'orbite du satellite, qui compliquent la mesure des paramètres liés à l'amplitude.

5.1.1.1 Types de mesure

Pour contrôler un satellite, il convient de mesurer et de déterminer les paramètres suivants:

- Fréquence
- Fréquence Doppler
- Puissance surfacique (pfd) par rapport à la largeur de bande; p.i.r.e. totale, p.i.r.e. du canal et p.i.r.e. de la porteuse
- Porteuse C/N_0
- Largeur de bande et largeur de bande de la porteuse
- Mesures de spectre hors bande
- Caractéristiques d'émission
- Identification du type de modulation
- Enregistrement des observations de spectre
- Spectrogrammes rapides pour visualiser les dérives rapides d'intervalle et les signaux à balayage
- Mesures de polarisation
- Position orbitale du satellite (avec une précision d'au moins $0,1^\circ$)
- Caractéristiques en bande de base des signaux reçus, à savoir MDPB, MDP-4, MAQ, MRF/MF
- Rapport S/N reçu.

5.1.1.2 Types de brouillages causés par les systèmes de satellites

- Brouillages dans les canaux adjacents
- Brouillages dans le même canal
- Brouillages des voies croisées (transpolarisation)
- Brouillages de systèmes adjacents.

Ces types de brouillages apparaissent au niveau de l'entrée de la station terrienne réceptrice et sont causés par les porteuses émises soit par le satellite du système examiné (composé d'une station terrienne et d'un satellite) soit par le satellite d'un autre système.

Brouillages dans les canaux adjacents

Ce type de brouillages est causé par des porteuses émises du satellite vers les stations terriennes du même système, situées dans le même faisceau ponctuel que la station terrienne en cours d'étude (ci-après appelée station terrienne victime), à des fréquences différentes, mais avec la même polarisation.

Dans les modes d'accès AMRF et AMRT, ces porteuses interfèrent avec la porteuse de la station victime car la qualité du filtre de la station terrienne réceptrice n'est pas optimale.

Brouillages dans le même canal (copolarisation)

Les brouillages dans le même canal sont causés par des porteuses émises par le satellite vers les stations terriennes du même système, à la même fréquence et avec la même polarisation que la porteuse de la station victime.

Dans les modes d'accès AMRF et AMRT, ces porteuses brouilleuses sont envoyées à des stations terriennes situées dans un faisceau ponctuel différent de celui de la station victime, alors qu'en mode AMRC, elles sont envoyées à des stations terriennes situées dans le faisceau ponctuel de la station victime.

Dans les modes d'accès AMRF et AMRT, les brouillages sont limités par la décroissance d'antenne satellite du faisceau ponctuel adjacent dans la direction de la station victime, alors qu'en mode AMRC, ils sont limités par des propriétés de corrélation de code.

Brouillages des voies croisées

Ce type de brouillages est causé par des porteuses émises par le satellite vers les stations terriennes du même système, à la même fréquence et avec une polarisation orthogonale par rapport à celle de la porteuse de la station victime.

En polarisation simple, ces porteuses brouilleuses sont émises vers des stations terriennes situées dans un faisceau ponctuel différent de celui de la station victime, alors qu'en polarisation double, elles sont émises vers des stations terriennes situées dans le faisceau ponctuel de la station victime. En polarisation simple, les brouillages sont limités par la décroissance d'antenne satellite du faisceau ponctuel adjacent dans la direction de la station victime et par l'isolation en polarisation de l'antenne du satellite. En cas de réutilisation de la polarisation, les brouillages ne sont limités que par l'isolation en polarisation de l'antenne du satellite et de l'antenne de la station terrienne.

Brouillages de systèmes adjacents

Ce type de brouillages est causé par des porteuses émises par le satellite vers les stations terriennes d'un autre système de communication par satellite, qui émet à la même fréquence et avec la même polarisation que la station victime. Ces brouillages sont limités par la séparation angulaire des deux satellites par rapport à la position de la station victime sur la Terre.

5.1.2 Méthodes de mesure

5.1.2.1 Généralités

Un certain nombre de facteurs obligent à choisir, pour le contrôle, l'observation et la mesure des émissions en provenance de stations spatiales, des techniques différentes de celles qui sont utilisées pour les émissions provenant de sources fixes ou mobiles, sur la Terre ou au voisinage de celle-ci. Les principaux facteurs sont les suivants:

- la différence entre la fréquence de réception et la fréquence d'émission et le caractère variable des fréquences de réception, en raison du déplacement dû à l'effet Doppler, notamment pour les satellites non OSG;
- le fait que la puissance surfacique au point de réception au sol est faible en raison de la distance et de la puissance d'émission généralement faible;
- le temps relativement court pendant lequel peut être reçu, dans une station de contrôle fixe, le signal d'un engin spatial gravitant sur une orbite voisine de la Terre;
- la nécessité de maintenir le pointage continu de l'antenne à haut effet directif de la station terrienne, utilisée pour la réception des émissions des stations spatiales non OSG.

5.1.2.2 Mesures de fréquence

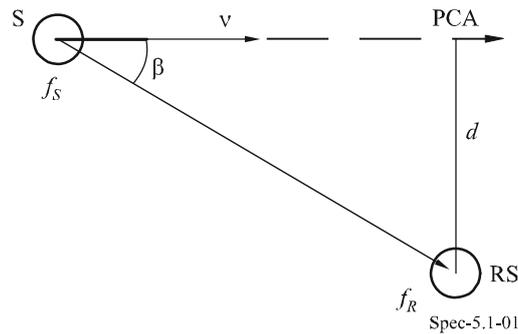
Dans le cas des stations spatiales géostationnaires, on peut appliquer pour la mesure des fréquences les mêmes méthodes que pour les stations de Terre. Ces méthodes sont décrites en détail au § 4.2.

5.1.2.2.1 Le déplacement de fréquence par effet Doppler

Lorsqu'il existe une vitesse relative entre la station spatiale d'émission et la station de contrôle, l'effet Doppler crée une différence de fréquence, proportionnelle à cette vitesse relative, entre le signal émis et le signal reçu. Les équations (5.1-1) et (5.1-2) sont établies sur la base de la Figure 5.1-1.

FIGURE 5.1-1

Principales relations en cas de déplacement de fréquence par effet Doppler



$$f_R = \frac{c f_S}{c - (v \cos \beta)} \quad (5.1-1)$$

$$\left(\frac{\Delta f_R}{\Delta t} \right)_{max} = \frac{f_S}{c} \cdot \frac{v^2}{d} \quad (5.1-2)$$

où:

- S: satellite
- RS: station de réception
- PCA: point du plus grand rapprochement
- f_S : fréquence d'émission
- f_R : fréquence de réception
- v : vitesse du satellite
- d : distance minimale au passage à la verticale
- c : vitesse de propagation des ondes électromagnétiques
- β : angle formé par la direction de vol et la ligne de visibilité directe (LoS) vers la station de réception.

Les équations ci-dessus conduisent à formuler les conclusions suivantes:

- la fréquence de réception est supérieure à la fréquence de la source lorsque le satellite s'approche de la station de contrôle;
- le seul moment où une mesure donne la valeur exacte de la fréquence de la source (satellite) est le «moment du plus grand rapprochement» (TCA, *time of closest approach*), qui correspond au «point du plus grand rapprochement» (PCA, *position of closest approach*);
- au moment TCA, on observe la «vitesse maximale de variation de fréquence» (MRCF, *maximum rate of change of frequency*), dont on peut déduire la pente de la tangente au point d'inflexion $(\Delta f_R / \Delta t)_{max}$;
- la fréquence de réception est inférieure à celle de la source lorsque le satellite s'éloigne de la station de contrôle;
- l'effet Doppler est proportionnel à la fréquence de la source (satellite) et dépend de la vitesse relative entre la source et la station de contrôle.

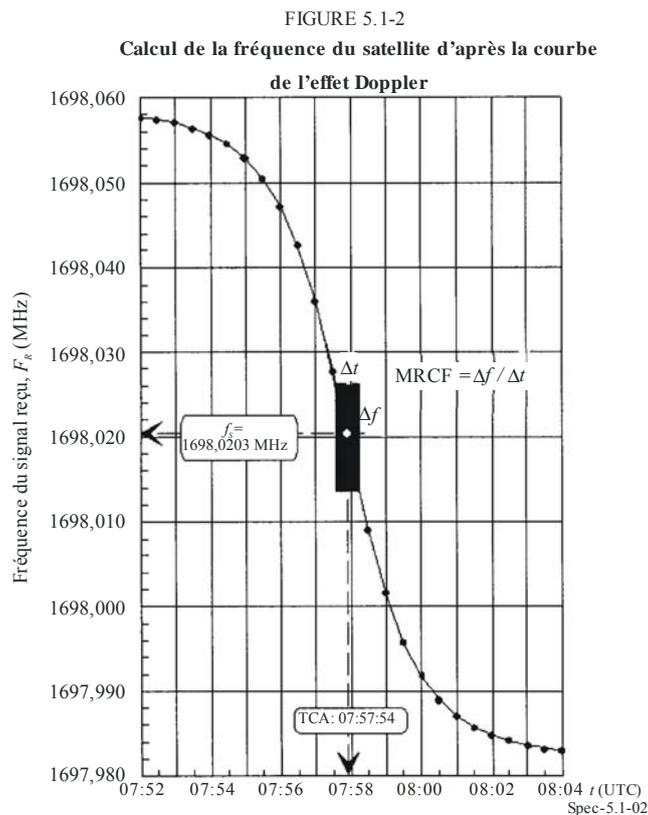
5.1.2.2 Méthode de mesure

La précision réalisable dans la détermination d'une fréquence donnée d'émission d'un satellite dépend du paramètre orbital du satellite, du trajet de propagation, des appareils de mesure et de la méthode d'évaluation. La mesure de la fréquence d'un satellite non OSG est une procédure indirecte qui appelle deux opérations successives: l'enregistrement du déplacement de fréquence Doppler, suivi de l'évaluation de la courbe de l'effet Doppler.

Pour obtenir une mesure satisfaisante, il y a lieu d'accorder la préférence à une méthode de mesure automatique. Le § 5.1.6.1 donne des indications sur une solution technique possible.

5.1.2.3 Méthode de calcul de la fréquence et précision de mesure

Des méthodes graphiques permettent de déterminer la fréquence du satellite, le TCA et la MRCF (voir la Figure 5.1-2). La précision réalisable dans la mesure de la fréquence est de $\pm 1 \times 10^{-7}$ Hz.



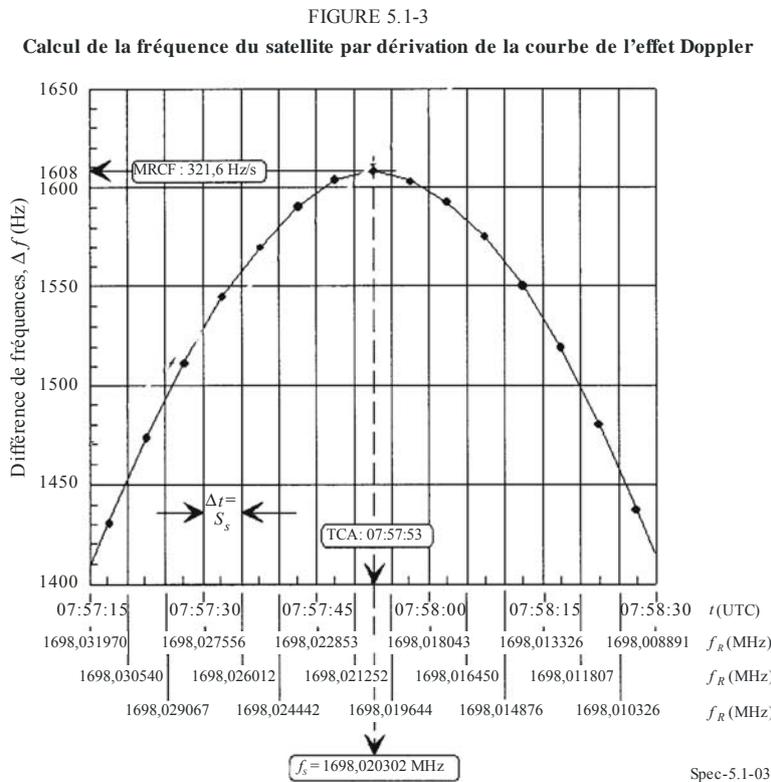
Une méthode modifiée permet d'obtenir une meilleure précision. Il suffit d'effectuer la dérivée première de la courbe de l'effet Doppler par rapport au temps pour obtenir une parabole dont le sommet indique le TCA et, par voie de conséquence, la fréquence de l'émetteur du satellite. Pour construire la parabole, il suffit d'utiliser les différentes valeurs mesurées dans un intervalle de ± 30 s environ encadrant le moment du plus grand rapprochement. Les intervalles de temps séparant les valeurs mesurées doivent être choisis de manière que la forme de la courbe soit nettement définie, par exemple, au minimum des intervalles de 5 s. Avec cette méthode, associée à des méthodes d'évaluation graphique, on peut obtenir une précision de $\pm 5 \times 10^{-9}$ Hz en utilisant un oscillateur de référence de type caesium ou mieux. La Figure 5.1-3 montre la courbe de fréquence ainsi déterminée.

Au lieu d'appliquer des méthodes d'évaluation graphiques, qui exigent beaucoup de temps, il est préférable d'utiliser un logiciel informatique, qui est capable de traiter directement les résultats individuels de mesure de la fréquence.

Il est évident que des mesures fiables de fréquence ne peuvent être réalisées que si le spectre contient une composante de fréquence caractéristique sur laquelle l'équipement de mesure peut être synchronisé. Cette remarque s'applique également aux mesures de fréquences des stations de Terre.

5.1.2.3 Mesures de la largeur de bande

Pour mesurer la largeur de bande des émissions des satellites géostationnaires, on peut, en principe, appliquer les mêmes méthodes que pour les émissions des stations de Terre. Ces méthodes sont décrites au § 4.5.



S'il y a une vitesse relative entre la station spatiale et la station de contrôle, la largeur de bande apparente transmise, telle que mesurée dans la station de contrôle, varie en raison de l'effet Doppler, ainsi qu'il a été expliqué pour la fréquence porteuse. Il faut tenir compte de deux facteurs:

- l'ensemble du spectre de fréquences subit une dérive pendant la durée de la mesure de la largeur de bande;
- l'écart de fréquence par effet Doppler est légèrement plus grand pour les composantes situées à la limite supérieure de la bande occupée que pour celles qui sont proches de la limite inférieure. Cette différence peut atteindre quelques centaines de hertz dans le cas des larges bandes. Cet effet donne à la station de contrôle l'impression que la largeur de bande apparente varie légèrement.

On peut compenser, par la commande automatique de fréquence du récepteur de contrôle, le déplacement de fréquence dû à l'effet Doppler d'une émission. Dans ce cas, les méthodes de mesures usuelles de détermination de la largeur de bande dans les stations de contrôle pour le service de Terre sont utilisables sans grande modification. Lorsque le signal de réception est très faible, il est possible d'assurer la correction automatique de la fréquence de l'oscillateur du récepteur en prenant, comme signal de référence, une fréquence porteuse ou une fréquence pilote émise par la station spatiale, filtrée grâce à un filtre passe-bande à bande extrêmement étroite. Si la station de contrôle pour les services spatiaux ne dispose pas de récepteurs appropriés avec commande automatique de fréquence, il faut tenir compte du déplacement de fréquence de la station spatiale pendant la mesure, le cas échéant en effectuant simultanément une mesure de fréquence Doppler lors de la détermination de la largeur de bande. Il peut aussi être nécessaire de faire simultanément un enregistrement de la puissance surfacique afin de pouvoir éliminer, lors des calculs, l'influence des variations de la puissance surfacique se présentant pendant l'analyse du spectre.

5.1.2.4 Mesures de la puissance surfacique

5.1.2.4.1 Mesures dans une largeur de bande de référence

La coordination et le bon fonctionnement des stations spatiales nécessitent que des valeurs maximales données de la puissance surfacique ne soient pas dépassées à la surface de la Terre par les émissions en provenance d'une station spatiale, y compris celles d'un satellite réflecteur. Ces valeurs sont données pour chacune des bandes de fréquences, pour chacun des services spatiaux, pour chaque angle d'arrivée et pour toutes les conditions de partage dans l'Article 21, Section V du RR, qui devrait être disponible au centre de contrôle des émissions spatiales. La puissance surfacique, exprimée en dB(W/m²), se rapporte à une largeur de bande particulière, en général 4 kHz, 1 MHz ou 1,5 MHz, selon la fréquence de l'émission fondamentale. L'indication de la largeur de bande de référence RBW (*reference bandwidth*) est essentielle car la puissance rayonnée n'est généralement pas concentrée sur une seule fréquence, mais se trouve distribuée à l'intérieur d'une bande de fréquences.

5.1.2.4.2 Mesure de la puissance surfacique totale

Dans ce cas, la puissance surfacique est déterminée complètement en fonction de la largeur de bande occupée par une émission. On choisira en conséquence la largeur de bande du filtre de mesure. Ces mesures sont importantes s'il s'agit, par exemple, de calculer la p.i.r.e. d'une station spatiale. Pour les bandes de fréquences inférieures à 13 GHz et par temps clair, on peut prendre dans les calculs une valeur comprise entre 0,1 et 0,2 dB pour le bruit atmosphérique total.

5.1.2.4.3 Méthode de mesure

Qu'il s'agisse de mesurer la puissance surfacique (ci-après *pdf*, *power flux-density*) dans la largeur de bande de référence ou la *pdf* totale, il est préférable de déterminer la *pdf* par mesure directe de la puissance, surtout pour les fréquences supérieures à 1 GHz environ. Lorsqu'on utilise cette méthode, il est possible de déterminer la *pdf* en appliquant les équations (5.1-3a) et (5.1-3b):

$$pdf_{RBW} = P_{SYS} - 30 - A_e - K_{BW} + K_{POL} \quad (5.1-3a)$$

$$pdf_{TOT} = P_{SYS} - 30 - A_e + K_{POL} \quad (5.1-3b)$$

où:

pdf_{RBW} : puissance surfacique dans la largeur de bande de référence RBW (dB(W/m²))

pdf_{TOT} : puissance surfacique dans la largeur de bande occupée par l'émission (dB(W/m²))

P_{SYS} : puissance d'entrée du système (dBm)

30: facteur de conversion des dBm en dBW

A_e : surface effective de l'antenne (voir Note 2) (dBm²)

K_{BW} : facteur de correction pour la largeur de bande de mesure (voir Note 3) (dB)

K_{POL} : correction de polarisation (voir Note 4) (dB).

L'équation (5.1-4) ci-après permet de calculer la p.i.r.e. de la station spatiale à partir de la puissance surfacique déterminée par les équations (5.1-3a) et (5.1-3b). Pour faire ce calcul, il faut connaître la distance oblique de la station spatiale:

$$p.i.r.e. = pdf + 10 \log(4\pi d^2) + L_{ATM} \quad (5.1-4)$$

où:

p.i.r.e.: puissance isotrope rayonnée équivalente de la station spatiale (dBW)

pdf : puissance surfacique mesurée (dB(W/m²))

d : distance entre la station spatiale et la station de réception (m)

L_{ATM} : affaiblissement atmosphérique par rapport à l'espace libre (dB).

NOTE 1 – La puissance d'entrée est mesurée à l'aide d'un wattmètre à sonde thermique normalement relié à la sortie FI du récepteur et précédé d'un filtre passe-bande dont la largeur de bande efficace est connue (mesure de la valeur efficace). Ensuite, on remplace le signal d'entrée par le signal provenant d'un générateur étalonné. Une compensation de l'éventuel effet Doppler sur le signal provenant du satellite doit être assurée avant la sortie FI.

NOTE 2 – La surface effective de l'antenne (A_e) peut se calculer à partir de l'ouverture ou du gain d'antenne à l'aide de l'équation (5.1-5):

$$A_e = 10 \log (A\eta) = 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) + G_i \quad (5.1-5)$$

où:

- A_e : surface effective de l'antenne (dBm²)
- A : ouverture de l'antenne (m²)
- η : rendement exprimé en décimales
- λ : longueur d'onde (m)
- G_i : gain isotrope de l'antenne (dBi).

NOTE 3 – La largeur de bande de mesure peut être plus grande que la largeur de bande de référence tant que la puissance est uniformément répartie dans la largeur de bande de mesure (A vérifier au moyen d'une analyse de spectre). La largeur de bande de mesure est la largeur de bande efficace du filtre, qui ne coïncide pas nécessairement avec sa largeur de bande à 3 ou 6 dB. Le facteur de correction se calcule à l'aide de l'équation (5.1-6):

$$K_{BW} = 10 \log \left(\frac{B_M}{RBW} \right) \quad (5.1-6)$$

où:

- K_{BW} : facteur de correction de la largeur de bande (dB)
- B_M : largeur de bande de mesure
- RBW : largeur de bande de référence (mêmes unités que pour B_M).

NOTE 4 – S'il y a adaptation de polarisation entre l'antenne de réception et le signal reçu, le facteur de correction de polarisation, $K_{POL} = 0$ dB. Lorsqu'une émission polarisée circulairement est reçue en polarisation rectiligne, ou inversement, on a: $K_{POL} = 3$ dB.

Puisque la puissance surfacique varie normalement non seulement avec la fréquence mais également dans le temps, sa valeur maximum doit être déterminée. Ceci peut être réalisé en enregistrant le signal de sortie du wattmètre pendant une certaine période de temps, à la fréquence étudiée. La constante de temps de la sonde utilisée pour la mesure de puissance détermine la vitesse de variation de la puissance qui peut être détectée. On trouvera des renseignements complémentaires sur le calcul de la p.i.r.e. dans l'édition 2002 du présent Manuel.

5.1.2.4.4 Incertitude concernant les mesures

Le degré d'incertitude concernant les mesures de la puissance surfacique dépend essentiellement de trois facteurs:

- l'incertitude concernant le gain de l'antenne de réception;
- l'incertitude concernant le signal de référence (générateur de référence de puissance) pour l'étalonnage du récepteur de mesure/analyseur de spectre;
- la précision du pointage/suivi de l'antenne.

S'agissant des incertitudes sur la puissance surfacique, il n'y a aucune différence entre cette méthode et les méthodes décrites au § 4.3. Il est possible, dans une large mesure, de limiter et de réduire au minimum l'incertitude concernant la source de référence; en revanche, le véritable problème est posé par l'étalonnage en gain de l'antenne de réception. Pour les systèmes équipés d'un grand réflecteur parabolique, l'étalonnage ne peut être fait qu'après le montage sur le site d'installation. En conséquence, pour permettre un calcul satisfaisant du gain d'antenne, il convient de tenir compte des conditions spécifiques qui prévalent sur le site.

L'incertitude globale liée aux mesures (facteur de couverture 2) ne devrait pas dépasser 2 dB et il faut viser à la réduire dans toutes les bandes de fréquences.

5.1.2.5 Mesures de la polarisation

Il est essentiel de connaître la polarisation du signal émis par le satellite. En effet, la détermination de cette caractéristique de base du signal aide à identifier les émissions inconnues. Il faut donc mettre en œuvre un système d'antenne capable de faire la distinction entre différents types de polarisation.

Dans la mise en œuvre technique des mesures de polarisation, on doit tenir compte du fait que la technique de double polarisation est largement utilisée dans les bandes de fréquences supérieures à 1 GHz, qui servent au service fixe par satellite et au service de radiodiffusion par satellite.

Afin de réaliser les conditions de réception et de mesure optimales pour le signal émis par le satellite, en termes de:

- rapport porteuse/bruit (C/N) maximum;
- rapport porteuse/brouillages (C/I) maximum par discrimination de polarisation suffisante entre des signaux à polarisations orthogonales;

il faut pouvoir adapter la polarisation de l'antenne de réception de la station de contrôle à la polarisation du signal reçu. Dans le cas de la double polarisation rectiligne, le plan de polarisation doit pouvoir être orienté dans toutes les directions. Il faut réaliser une discrimination de polarisation d'au moins 20 dB.

5.1.2.6 Détermination des positions orbitales et des paramètres orbitaux

La détermination des positions orbitales concerne les satellites OSG; celle des paramètres orbitaux concerne les satellites non OSG.

5.1.2.6.1 Satellites OSG

Les satellites OSG sont sujets à des perturbations qui tendent à modifier leur position orbitale. Ces perturbations entraînent des rotations parasites du plan orbital et des erreurs de demi-grand axe et d'excentricité. Conséquence: vu de la Terre, le satellite présente un mouvement oscillatoire d'une période de 24 h. Ce mouvement (dit «en faisceau») comporte une composante nord-sud et une composante dans le plan.

Les stations spatiales embarquées dans des satellites OSG, utilisant les fréquences attribuées au service fixe par satellite ou au service de radiodiffusion par satellite, doivent être maintenues en position à $\pm 0,1^\circ$ de longitude de leur position nominale (voir le RR, Article 22, Section III), sauf pour les stations expérimentales à bord de satellites OSG, qui doivent être maintenues à $\pm 0,5^\circ$ de longitude, et pour les stations du service de radiodiffusion par satellite opérant dans la bande 11,7-12,75 GHz, qui doivent être maintenues dans les limites définies dans l'Appendice 30 du RR. Les stations spatiales ne sont pas tenues de respecter ces limites tant que le réseau à satellites ne cause pas de brouillages inacceptables à un autre réseau à satellites dont la station spatiale observe ces limites. La détermination de la position des satellites OSG fait donc partie des tâches nécessairement dévolues aux stations de contrôle des services spatiaux. Les positions orbitales se calculent généralement à partir de mesures d'angles faites dans le plan azimutal et dans le plan vertical de l'antenne de réception. Le § 5.1.7.4 donne un exemple d'une mesure de ce type.

5.1.2.6.2 Satellites non OSG

Il est indispensable de calculer les paramètres orbitaux d'un satellite non OSG (données d'éphéméride), à partir de résultats de mesure suffisamment précis, pour effectuer les opérations suivantes:

- identification d'une station spatiale inconnue (voir le § 5.1.5);
- recherche d'instant de réception possibles;
- prédétermination des angles d'azimut et d'élévation en fonction du temps, par exemple pour le pointage d'antennes commandé par ordinateur dans les cas où l'on ne dispose pas de données publiées officiellement.

Une station de contrôle pour les services spatiaux procédant par mesures en mode passif est à même de fournir les résultats de mesure suivants en fonction du temps:

- angle d'azimut;
- angle d'élévation;
- déplacement de fréquence par effet Doppler.

Etant donné que la détermination de l'orbite nécessite de trouver au minimum six paramètres (paramètres de Kepler par exemple), il faut procéder à des mesures multiples des grandeurs susmentionnées. Classiquement, la détermination de l'orbite résulte d'une procédure statistique, dans laquelle la précision des paramètres orbitaux est d'autant meilleure que le volume des informations en entrée est plus grand. Pour le contrôle sur les fréquences élevées (supérieures à 1 GHz), on accorde la préférence aux méthodes consistant à évaluer les mesures d'angles dans le plan azimutal et le plan vertical; cela s'explique par le fait que les antennes de réception fonctionnent avec des faisceaux étroits dans ces gammes de fréquences.

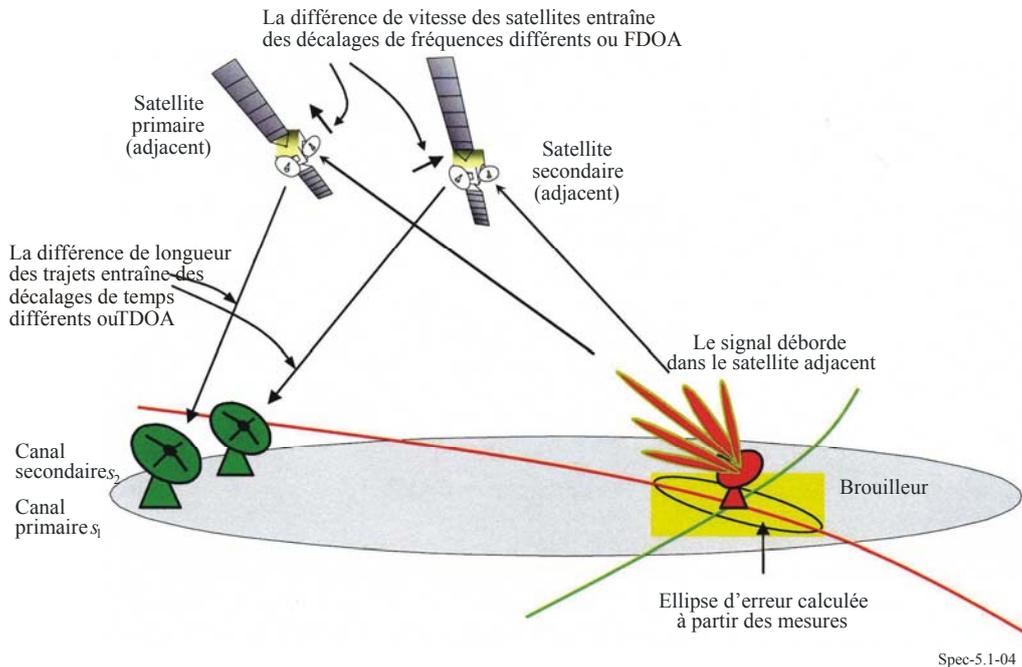
5.1.2.7 Géolocalisation d'émetteurs au sol au moyen de mesures de la différence entre les instants d'arrivée et de la différence de fréquence à l'arrivée pour des signaux provenant de deux satellites OSG

Les sources de brouillages situées au sol peuvent avoir une incidence sur les signaux de liaison montante reçus au niveau du satellite. Le récepteur du signal utile perçoit les brouillages comme des brouillages de la liaison descendante. La géolocalisation des émetteurs radioélectriques qui brouillent les satellites de communication en orbite géostationnaire est une tâche difficile. On procède généralement par analyse de mesures combinées de la différence entre les instants d'arrivée (TDOA, *time difference of arrival*) et de la différence de fréquence à l'arrivée (FDOA, *frequency difference of arrival*). Ces deux types de mesure exigent que les émissions soient contrôlées par un second satellite géostationnaire situé dans le faisceau de l'émetteur. Le satellite géostationnaire transmettant le signal inconnu est habituellement appelé «satellite primaire» et le second satellite géostationnaire «satellite adjacent». Une mesure TDOA fournit la différence entre les instants d'arrivée d'un même signal au niveau d'un récepteur au sol via le satellite primaire et au niveau d'un autre récepteur au sol via le satellite adjacent. Une mesure FDOA fournit la différence de fréquence entre les signaux arrivant séparément dans les deux récepteurs. Les deux récepteurs sont généralement, mais pas nécessairement, placés sur le même site géographique (voir Figure 5.1-4). En «mode distribué», les deux récepteurs utilisés pour la géolocalisation sont distants l'un de l'autre, la contrainte étant que chaque récepteur doit être situé dans le faisceau descendant de la station spatiale correspondante. Le mode distribué doit être utilisé lorsque les empreintes des faisceaux descendants au sol ne se chevauchent pas, par exemple lorsque les récepteurs sont situés sur des continents différents. Dans ce mode, les mesures de signal brutes doivent être transmises vers un site unique, où s'effectue le traitement ultérieur de géolocalisation.

L'instant d'arrivée varie car, en passant par deux satellites différents (un pour chaque récepteur), le signal émis parcourt des distances différentes. La fréquence d'arrivée varie car, en général, il existe un mouvement relatif entre les deux satellites, d'où des décalages de fréquence par effet Doppler différents sur chaque émission. On dit souvent que les satellites OSG restent fixes par rapport à un point spécifique de l'équateur terrestre, mais, en réalité, ils dévient de leur position nominale dans certaines limites. Ces mouvements produisent un effet Doppler, mesurable dans les signaux reçus. La différence des fréquences reçues peut aussi s'expliquer par des décalages des oscillateurs qui fixent la fréquence de réémission de la liaison descendante de chaque satellite.

Chaque ensemble de mesures de TDOA ou FDOA, combiné à la configuration de la station spatiale et de la station au sol, décrit une surface différente sur laquelle l'émetteur inconnu doit se trouver. La surface de la Terre (où se situent presque tous les émetteurs présentant un intérêt) est une troisième surface qui contraint l'emplacement de l'émetteur inconnu. A partir d'une unique paire de mesures de TDOA et de FDOA, il est possible, par intersection de ces trois surfaces, d'estimer l'origine du signal inconnu. Pour limiter les erreurs de mesure ou de modélisation, et donc les erreurs de géolocalisation, on procède selon un modèle statistique alimenté par des mesures supplémentaires de TDOA et de FDOA.

FIGURE 5.1-4
Géolocalisation d'émetteurs au sol au moyen de mesures de la TDOA et de la FDOA pour des signaux provenant de deux satellites OSG



5.1.2.7.1 Mesure des différences d'instants d'arrivée et de fréquence à l'arrivée

Les séries temporelles de signal émis par les deux satellites OSG sont enregistrées et analysées pour calculer les différences d'instants d'arrivée et les différences de fréquence à l'arrivée entre les deux séries (c'est-à-dire les TDOA et les FDOA). Pour ce faire, on calcule la fonction de contre-ambiguïté (CAF, *cross ambiguity function*) ou carte des corrélations à deux dimensions. La valeur de la fonction CAF pour une différence donnée en temps et en fréquence est la corrélation croisée des deux signaux enregistrés. Dans le cas particulier d'émissions d'ondes entretenues (CW, *continuous wave*), on ne peut pas générer de mesure de TDOA étant donné que les deux signaux sont en corrélation pour toutes les différences temporelles.

La fonction CAF peut être visualisée en trois dimensions, chaque valeur CAF étant une fonction de la TDOA et de la FDOA. Dans le cas d'un signal brouilleur unique dans la bande de fréquences choisie, la valeur maximale sur la surface CAF en fonction de la TDOA et de la FDOA fournit les décalages en temps et en fréquence à présenter à l'algorithme de géolocalisation qui permet de déterminer l'emplacement de l'émetteur unique. Pour une émission CW, on obtient une crête le long d'une ligne de FDOA constantes. Plusieurs émetteurs à large bande situés à différents endroits produiront de multiples pics sur la surface CAF. Le document Stein [1981] contient un examen détaillé des algorithmes de calcul et d'analyse de la fonction CAF.

5.1.2.7.2 Algorithme de géolocalisation

L'algorithme de géolocalisation repose souvent sur un processus itératif par moindres carrés utilisant les mesures de TDOA et/ou de FDOA afin d'estimer l'emplacement d'origine du signal émis. Dans sa forme la plus simple, cet algorithme combine une valeur indicative initiale de l'emplacement de l'émetteur et les orbites connues des deux satellites avec les lois physiques de déplacement satellitaire afin de produire une estimation des mesures de TDOA et de FDOA. Les différences entre les mesures réelles et estimées de TDOA et de FDOA (les résidus) permettent d'ajuster la localisation de l'émetteur. Cet ajustement de localisation est utilisé pour produire un deuxième jeu de mesures de TDOA et de FDOA, qui permet d'ajuster à nouveau la localisation de l'émetteur, et ainsi de suite. Il est nécessaire de recourir à une solution itérative car le problème est, par nature, non linéaire. Les itérations sont menées jusqu'à ce que les ajustements de la localisation de l'émetteur soient suffisamment petits: on estime alors que la solution de géolocalisation a convergé.

Etant donné que les mesures de TDOA et de FDOA dans le temps sont liées à la localisation de l'émetteur par les modèles des lois physiques, il est possible d'obtenir des solutions au problème de géolocalisation en combinant différemment les types de mesure. On peut, par exemple, déterminer la géolocalisation des émetteurs d'ondes entretenues à partir d'une série de mesures de FDOA, avec une moindre précision par rapport à ce qu'on obtiendrait avec les mesures correspondantes de TDOA d'un signal à large bande. Par ailleurs, l'utilisation d'un troisième satellite pour produire un deuxième jeu de mesures TDOA et/ou FDOA permet d'améliorer les résultats, au prix, il est vrai, d'une augmentation des ressources (antennes réceptrices). Grâce à un troisième satellite, il est possible de résoudre le problème en utilisant uniquement des mesures de TDOA, mais les surfaces à TDOA constante calculées à partir de deux paires de satellites étant quasiment parallèles, leur utilisation pratique dépend davantage de la précision des mesures de TDOA ou nécessite un temps de collecte des mesures supérieur.

En pratique, la précision des éphémérides de chacun des deux satellites limite la précision du calcul de la géolocalisation. Il est possible d'améliorer la précision du calcul en utilisant des mesures de TDOA et de FDOA de signaux retransmis par la même paire de satellites que le signal étudié, mais provenant d'autres émetteurs d'emplacement connu (parfois appelés «localisateurs de référence»). Ces localisateurs de référence permettent d'affiner les éphémérides orbitales de l'un ou des deux satellites, et, partant, d'améliorer la précision de l'estimation de localisation de l'émetteur étudié.

5.1.2.7.3 Analyse de l'incertitude

L'objectif d'une analyse de l'incertitude d'un problème de géolocalisation est de fournir une évaluation réaliste de la précision du calcul de géolocalisation.

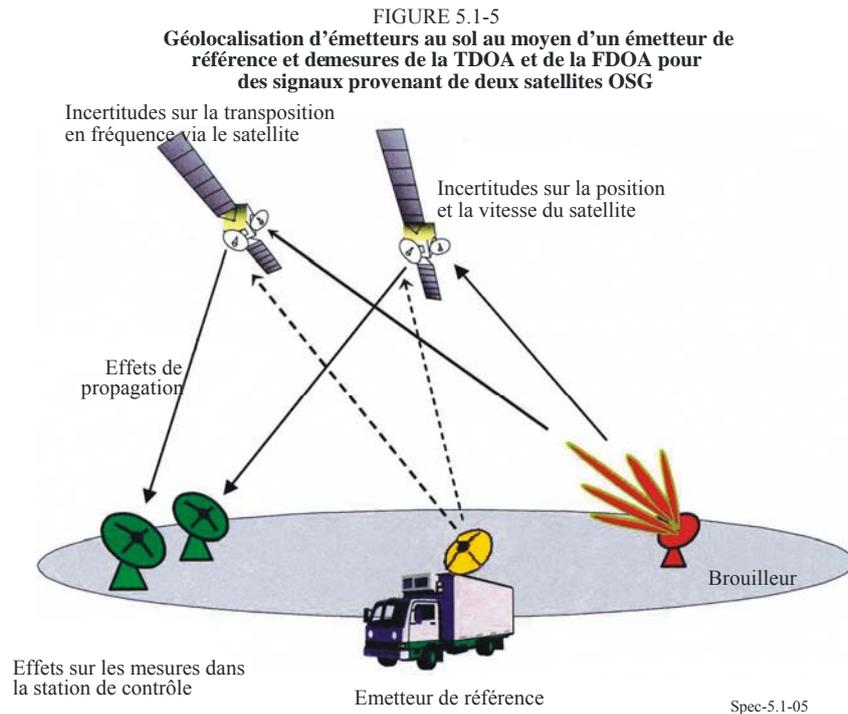
Il est parfois complexe et difficile de faire des analyses précises de l'incertitude. La précision des différentes mesures de TDOA et de FDOA est proportionnelle à la racine carrée du rapport S/N obtenu dans la solution par corrélation. En outre, la précision des mesures de TDOA est proportionnelle à la largeur de bande du signal et celle des mesures de FDOA à la durée de la mesure. S'agissant de la géolocalisation par moindres carrés, les estimations des erreurs formelles et les intervalles de confiance de la localisation de l'émetteur étudié sont fonction des incertitudes liées aux mesures de TDOA et de FDOA. La fiabilité de ces incertitudes peut être estimée statistiquement en observant les résidus sur les mesures correspondantes. Sinon, si les mesures TDOA et de FDOA sont en nombre suffisant, les incertitudes sur les mesures de TDOA et de FDOA peuvent être estimées par la même procédure de calcul. Bardelli *et al.* [1995] fournit un exemple d'analyse d'erreur.

Il convient en outre d'émettre deux mises en garde. D'une part, les incertitudes sur les mesures de TDOA et de FDOA peuvent être suffisamment importantes pour invalider l'hypothèse selon laquelle la solution est linéaire dans la région couverte de l'espace des paramètres, d'où une moindre précision des erreurs formelles de l'algorithme de géolocalisation fondées sur une analyse statistique linéaire. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des techniques de Monte-Carlo pour produire de meilleures estimations de l'incertitude.

D'autre part, les incertitudes formelles expliquent les erreurs aléatoires, mais seulement partiellement les erreurs systématiques. Les erreurs systématiques peuvent être dues par exemple à une modélisation incomplète de la physique des mesures de TDOA et de FDOA ou au modèle de forces utilisé pour produire les éphémérides des satellites. L'effet des erreurs systématiques peut être estimé par une simulation très précise de la technique de géolocalisation et de toutes ses sources d'erreur systématique.

Plusieurs inexactitudes éventuelles peuvent conduire à une erreur de localisation. Il est possible de limiter cette erreur dans une large mesure en utilisant des émetteurs de référence, dont les coordonnées géographiques sont connues de façon précise (voir Figure 5.15).

L'utilisation de stations de référence réparties sur une très large zone permet d'éliminer les erreurs dues aux imprécisions sur les éphémérides; l'utilisation de stations de référence situées à proximité du brouilleur permet de minimiser l'erreur de localisation (voir § 5.1.5.4.5 et § 5.1.5.4.6).



5.1.2.8 Géolocalisation d'émetteurs au sol à l'aide d'un seul satellite OSG et de l'effet Doppler inverse

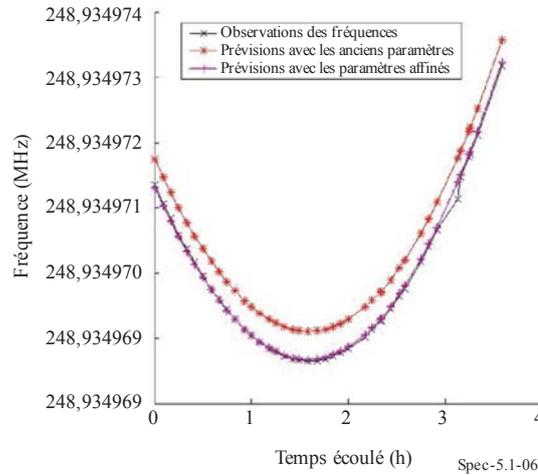
Dans certaines conditions, l'emplacement d'un émetteur (ou brouillages) à la surface de la Terre peut être déterminé au moyen des signaux transmis par un seul satellite de communication OSG. Le faible effet Doppler sur la fréquence porteuse du signal, produit par le léger déplacement du satellite par rapport à la Terre lorsqu'il décrit une orbite, peut en effet servir à estimer l'emplacement de l'émetteur par rapport aux endroits (dans un rayon de plusieurs dizaines de km) où des unités mobiles sont déployées afin de localiser l'émetteur ou la source des brouillages. Cette méthode utilise des mesures de la fréquence porteuse d'émissions peu fréquentes et de courte durée réparties sur plusieurs heures. Pour estimer le faible effet Doppler sur les signaux émis avec le degré de précision requis, on a recours à des techniques de résolution avancées et de traitement du signal. Il est en outre possible d'affiner les prévisions concernant la position et la vitesse d'un satellite en utilisant un émetteur de référence.

L'inclinaison non nulle et l'excentricité d'une orbite géostationnaire entraînent un déplacement du satellite par rapport à la surface de la Terre. Ce mouvement produit un faible effet Doppler qui peut servir à estimer l'emplacement de l'émetteur. Cette technique peut même utiliser des observations d'émissions peu fréquentes et de courte durée réparties sur plusieurs heures. Pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de mesurer les fréquences porteuses des émissions avec une très grande précision. On applique ensuite une technique d'estimation itérative non linéaire. Voir le § 5.1.2.8.3 et la Figure 5.1-6 pour une description des excursions des satellites OSG.

Pour toutes ces raisons, la méthode de géolocalisation à l'aide d'un seul satellite est très difficile à mettre en œuvre. De plus, elle nécessite de faire des hypothèses sur l'émetteur lui-même qui ne sont généralement pas vérifiées, notamment:

- l'ultrastabilité de l'oscillateur local de l'émetteur sur une longue période;
- l'émission de l'émetteur sur une longue période.

FIGURE 5.1-6
Amélioration des prévisions de fréquences à l'aide de valeurs affinées
des éléments orbitaux



5.1.2.8.1 Algorithme de géolocalisation

L'algorithme de géolocalisation utilise une formule mathématique (f_R) pour prévoir la fréquence porteuse d'un signal transmis par un satellite OSG. Cette formule comprend la position connue et la vitesse connue du satellite, la position du récepteur, ainsi que la position non connue de l'émetteur recherché. Il est nécessaire de prendre en compte l'effet Doppler sur la liaison montante, la transposition de fréquence dans le répéteur du satellite et l'effet Doppler sur la liaison descendante.

Toutes les quantités vectorielles sont exprimées selon le système de coordonnées cartésiennes géocentriques (référentiel terrestre):

$$f_R = \left[f_T \cdot \left(1 + \frac{\vec{v}_S \cdot (\vec{r} - \vec{r}_S)}{c \cdot \|\vec{r} - \vec{r}_S\|} \right) + \Delta_f \right] \cdot \left(1 + \frac{v_D}{c} \right) \tag{5.1-7}$$

où:

- f_R : fréquence porteuse du signal reçu
- f_T : fréquence porteuse du signal émis
- v_S : vecteur vitesse du satellite à l'instant d'observation
- r_S : vecteur de position du satellite à l'instant d'observation
- r : vecteur de position de l'émetteur
- Δ_f : transposition de fréquence dans le répéteur du satellite
- v_D : variation de la distance scalaire entre le satellite et le récepteur
- c : vitesse de propagation du signal.

L'équation (5.1-7) est une fonction fondée sur des paramètres connus et non connus. Les paramètres connus sont la position et la vitesse du satellite, la transposition de fréquence et la variation de la distance entre le satellite et le récepteur. La position et la vitesse du satellite et la variation de la distance dépendent du temps. Les paramètres non connus sont l'emplacement et la fréquence porteuse de l'émetteur. La fréquence porteuse réelle du signal au niveau du récepteur est mesurée à plusieurs instants d'observation. L'algorithme de géolocalisation évalue une série de paramètres non connus de telle sorte que la somme des erreurs quadratiques entre la fréquence porteuse mesurée et la fréquence porteuse prévisible à partir de la formule soit minimale.

L'algorithme applique une version linéarisée de l'expression de la fréquence de réception, qui est un développement du premier ordre en séries de Taylor à plusieurs variables de la formule (5.1-7). Un ensemble d'équations linéaires peut être constitué à l'aide de cette expression et assemblé sous la forme de l'équation matricielle suivante:

$$E = A\Delta \quad (5.1-8)$$

où E est le vecteur colonne des mesures de la fréquence porteuse du signal reçu à chaque instant d'observation et $A = [A_f A_x A_y A_z]$, chaque vecteur colonne A_i étant la dérivée de l'expression par rapport au paramètre i , calculée à chaque instant d'observation, et Δ le vecteur des erreurs entre les valeurs réelles des paramètres et leurs premières estimations. L'équation matricielle est résolue pour le vecteur Δ en termes de moindres carrés linéaires et ce vecteur des erreurs est utilisé pour réitérer et améliorer les estimations initiales des paramètres. Vu que l'équation linéaire utilisée n'est qu'une approximation du modèle, plusieurs itérations du processus sont effectuées à l'aide des estimations de paramètres les plus récentes pour chaque étape. Il y a convergence entre les valeurs des paramètres et les estimations finales des fréquences et des emplacements.

5.1.2.8.2 Mesure de la fréquence (effet Doppler)

Etant donné qu'un satellite OSG se déplace lentement par rapport à un point fixe de la Terre, l'effet Doppler observé sur une liaison de communication est faible, de l'ordre de quelques dizaines d'hertz. La précision de la géolocalisation dépend donc d'estimations très précises de la fréquence porteuse (un étalon au rubidium est suffisant).

Il est possible d'utiliser l'algorithme MUSIC (classification de signaux multiples) pour estimer la fréquence. La résolution de cette estimation est limitée uniquement par la précision des appareils et non par la taille du jeu de données. La précision des estimations est limitée par le rapport signal/bruit. L'algorithme MUSIC donne une estimation de la fréquence bien plus précise que les algorithmes fondés sur la transformée de Fourier rapide.

5.1.2.8.3 Correction de la position et de la vitesse

La précision des résultats de la géolocalisation dépend de la connaissance exacte des vecteurs de position et de vitesse du satellite à chaque instant d'observation. En règle générale, ces vecteurs sont calculés à l'aide d'un modèle de propagation en orbite et d'une série de six paramètres orbitaux qui décrivent l'orbite du satellite. Ces paramètres sont périodiquement mis à jour en fonction des observations du satellite et des jeux de paramètres actualisés. Les algorithmes de propagation en orbite modélisent les effets gravitationnels de la Terre, du Soleil et de la Lune afin de prévoir la position et la vitesse du satellite à des instants postérieurs à celui du calcul des paramètres. Un certain nombre de forces agissant sur le mouvement d'un satellite ne sont pas modélisées. En conséquence, les estimations de position et de vitesse obtenues deviennent moins précises à mesure que s'accroît la différence entre le moment où la prévision a lieu et celui où le jeu de paramètres a été mis à jour. De même, la transposition de fréquence dans le répéteur du satellite n'est pas parfaitement connue.

Il est nécessaire d'améliorer les prévisions concernant la position et la vitesse du satellite et la fréquence de transposition pour améliorer la précision des estimations d'emplacement. Un émetteur de référence placé en un lieu connu et dont la fréquence porteuse est connue peut être utilisé pour affiner ces prévisions. L'émetteur de référence doit transmettre des signaux par le biais du satellite au cours de la même période que celle où les signaux étudiés sont observés. La fréquence porteuse de chacun des signaux de référence observés au niveau du récepteur est calculée de la même manière que pour un signal cible. Pour améliorer les résultats, on compare ensuite les fréquences ainsi observées aux fréquences obtenues en appliquant la formule à l'emplacement connu de l'émetteur de référence, aux premières estimations du jeu de paramètres orbitaux et à la fréquence de transposition. La Figure 5.1-6 montre l'amélioration des prévisions de fréquences obtenues avec les valeurs affinées des paramètres orbitaux et de la fréquence de transposition.

5.1.2.9 Mesures du degré d'occupation des fréquences et du degré d'occupation des positions en orbite géostationnaire

Au stade préparatoire de la planification d'un nouveau système à satellites, il convient d'étudier tout spécialement l'occupation des fréquences des liaisons descendantes par d'autres systèmes à satellites. C'est là

une règle tout à fait générale, car on n'a pas toujours la certitude que l'utilisation des fréquences a fait l'objet d'une coordination ou d'une notification. Ces mesures du degré d'occupation sont par conséquent des plus utiles si l'on veut empêcher l'apparition de brouillages imprévus.

Les enregistreurs automatiques du spectre radioélectrique ont fait la preuve de leur grande utilité pour le contrôle des émissions des satellites placés sur orbites basses. Associés à des antennes non directives ou à faisceau de forme hémisphérique, ces appareils donnent, sur une période de plusieurs jours, des résultats qui permettent de déterminer le degré d'occupation de la bande de fréquences par les émissions des satellites. Par ailleurs, il est possible de déterminer de façon approximative les fréquences des satellites, ainsi que les instants de réception prévus, et on peut calculer avec une bonne précision la période de révolution. Le § 5.1.7.1 donne un exemple d'enregistrement du spectre des fréquences.

La plupart des méthodes générales utilisées pour contrôler l'occupation des fréquences à l'aide d'antennes à faible gain ne conviennent pas, en principe, pour les bandes de fréquences supérieures à 3 GHz environ. Pour les signaux de faible puissance surfacique, il faut mettre en œuvre des antennes directives ayant un gain suffisant. Toutefois, dans le cas des stations spatiales OSG, il est possible de faire des mesures du degré d'occupation:

- qui déterminent les positions de ces stations;
- qui fournissent des données sur les fréquences et des données temporelles relatives à l'occupation des bandes de fréquences dans les positions en question.

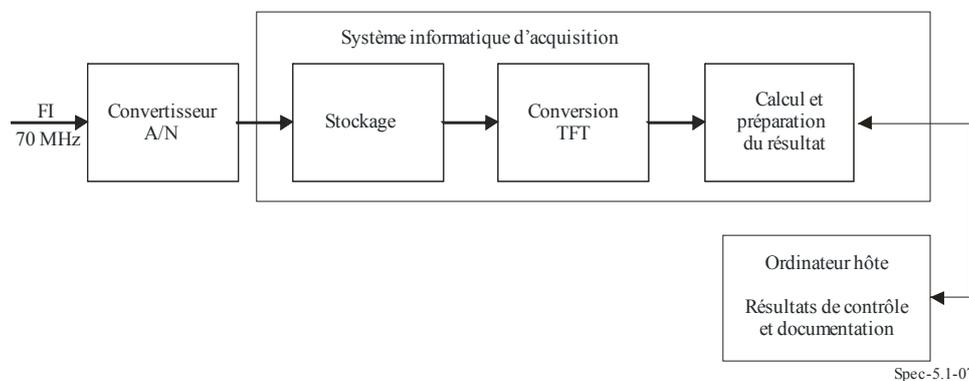
Pour identifier les positions occupées, il est recommandé d'appliquer une procédure interactive afin d'orienter l'antenne directive utilisée pour la réception le long de l'orbite géostationnaire à l'intérieur de son ouverture de faisceau à mi-puissance; pendant la durée de cette procédure, l'analyseur utilisé pour le traitement des signaux effectue des mesures de façon ininterrompue afin de surveiller le dépassement éventuel des valeurs de seuil. Après avoir balayé l'arc d'orbite visible depuis la station de contrôle radioélectrique, on commute l'analyseur sur la sous-bande de fréquences suivante et l'ensemble du processus est répété.

Les mesures du degré d'occupation (temps et fréquence) pour une position prédéterminée autorisent certaines variations, lesquelles doivent être coordonnées d'une façon précise avec la cible choisie. Voir l'exemple traité au § 5.1.7.3.

5.1.2.10 Mesures au-dessous du plancher de bruit

Il est parfois nécessaire d'analyser des signaux radioélectriques faibles ou des parties de signaux situés au-dessous du plancher de bruit. C'est notamment le cas des émissions radioélectriques spatiales. La Recommandation UIT-R SM.1681 – Mesure des émissions de faible niveau en provenance de stations spatiales par des stations terriennes de contrôle utilisant des techniques de réduction du bruit – a été élaborée afin de résoudre ce problème. La Figure 5.1-7 présente le diagramme fonctionnel classique utilisé pour réaliser de telles mesures.

FIGURE 5.1-7
Diagramme fonctionnel pour le contrôle au-dessous du plancher de bruit



La mesure des émissions de faible niveau au-dessous du plancher de bruit repose sur une méthode d'intégration qui consiste à soustraire le spectre de bruit du signal.

Le signal FI est échantillonné par un convertisseur analogique/numérique et stocké sur un disque dur. Cette mesure est en général réitérée 10 000 fois de façon à acquérir 10 000 enregistrements d'échantillons. Immédiatement après, l'antenne est pointée vers une position orbitale adjacente de façon à ce que le satellite se trouve en dehors du faisceau de l'antenne, qui ne reçoit donc que le bruit, et ce, dans les mêmes conditions environnementales. Un nouveau jeu de 10 000 échantillons est mesuré et stocké sur le disque dur. Les deux séquences de 10 000 échantillons sont moyennées linéairement et soustraites l'une de l'autre. La réduction de bruit ainsi obtenue est, en général, comprise entre 10 et 20 dB.

Il convient de noter qu'une excellente stabilité en fréquence sur l'ensemble du trajet de réception est requise et que tout décalage perceptible de la fréquence dû à l'effet Doppler au niveau du satellite doit être éliminé ou déduit.

5.1.3 Conditions devant être remplies par les équipements et les installations

Les paragraphes qui suivent mettent en relief un certain nombre de caractéristiques des systèmes. On trouvera des renseignements complémentaires sur le facteur de qualité, les systèmes d'antenne, le pointage des antennes et la poursuite automatique dans le Manuel sur les systèmes de communication par satellite (service fixe par satellite) et dans d'autres publications indiquées dans les références bibliographiques.

5.1.3.1 Généralités

La conception technique d'une station de contrôle radioélectrique pour les services spatiaux dépend essentiellement des tâches à accomplir, lesquelles dépendent des besoins de l'administration. Au stade de cette conception, il convient de prendre en compte les données de l'évolution récente de ces services. Le Tableau 5.1-2 en indique quelques aspects importants.

TABLEAU 5.1-2

Tâches à accomplir et domaine concerné aux fins de la conception technique d'une station de contrôle pour les services spatiaux

N°	Tâches	Domaine concerné
1	Quelle partie du spectre des fréquences pourrait être contrôlée?	Nombre et types de systèmes d'antenne
2	Quels systèmes à satellites devraient être pris en compte dans le contrôle? Quelles puissances surfaciques ces systèmes produisent-ils au point de réception? Quel rapport porteuse/bruit faut-il réaliser?	Facteur de qualité du système de réception (gain d'antenne, température de bruit du système)
3	Doit-on prévoir la détermination de la position des satellites OSG?	Précision des relèvements, caractéristiques du pointage d'antenne, conception des récepteurs
4	Doit-on prévoir la détermination des paramètres orbitaux des satellites non OSG?	Précision des relèvements, caractéristiques du pointage d'antenne, accélération et vitesse du pointage d'antenne, conception des récepteurs
5	Doit-on prévoir la détermination des caractéristiques de la polarisation et des mesures en cas de systèmes à double polarisation?	Système d'alimentation des antennes

Il convient d'accorder une importance toute particulière aux précisions de mesure requises, par exemple pour la mesure des fréquences et des puissances surfaciques et notamment pour les mesures d'angles en vue de déterminer la position des stations spatiales OSG ou les paramètres orbitaux des satellites non OSG.

En général, comme dans la plupart des stations de contrôle classiques, l'équipement destiné à contrôler les signaux des stations spatiales doit présenter une certaine souplesse d'exploitation qui lui permette de s'accorder sur une gamme de fréquences étendue, contrairement aux appareils dont le contrôle s'exerce sur une bande très limitée mais suffisante pour les besoins d'une institution de recherche ou d'un organisme spécialisé dans l'exploitation de l'espace.

5.1.3.2 Facteur de qualité d'un système de contrôle pour les services spatiaux

Le rapport porteuse/bruit (C/N) réalisable à la réception dépend des facteurs suivants:

- la puissance surfacique du signal au point de réception;
- le gain de l'antenne de réception;
- la température de bruit du système de réception.

Le facteur de qualité G/T d'un système de réception est le rapport du gain de l'antenne de réception dans la direction du signal reçu à la température de bruit du système de réception, comme l'indique la formule (5.1-9):

$$\left(\frac{G}{T}\right) = G - T_{RS} \quad (5.1-9)$$

$$\left(\frac{G}{T}\right) = \left(\frac{C}{N}\right) - pfd - 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) + 10 \log(kB) \quad (5.1-10)$$

où:

- G/T : facteur de qualité (dB(K⁻¹))
- G : gain d'antenne (dBi)
- T_{RS} : température de bruit du système de réception (dB(K))
- C/N : rapport porteuse utile/bruit dans la largeur de bande de mesure, B (dB)
- pfd : puissance surfacique dans la largeur de bande de mesure, B (dB(W/m²))
- $\lambda^2/4\pi$: aire de la surface effective d'une antenne isotrope (m²)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) (W/Hz)
- B : largeur de bande de mesure (Hz).

Dans le cas du service fixe par satellite, on connaît exactement les conditions existant sur les liaisons de transmission pour un système en projet. La formule (5.1-10) permet de calculer le rapport G/T nécessaire pour une valeur donnée de C/N . La largeur de bande de mesure doit être égale à la largeur de bande de réception. C'est au concepteur du système de décider si le rapport G/T nécessaire doit être obtenu moyennant une augmentation du gain d'antenne ou un abaissement de la température de bruit.

On ne peut pas s'attendre à trouver des conditions aussi claires dans le contrôle pour les services spatiaux, mais la méthode employée est néanmoins similaire. La valeur souhaitée du rapport G/T est calculée sur la base des plus petites puissances surfaciques des stations spatiales dont on juge nécessaire d'analyser techniquement les caractéristiques d'émission pour la station de contrôle.

Il est préférable de mesurer directement le facteur de qualité (G/T) d'un système de contrôle pour les services spatiaux plutôt que de mesurer séparément les valeurs de G et de T , car on diminue ainsi le risque d'erreur. En outre, pour mesurer séparément ces valeurs, il est nécessaire de disposer d'un générateur de signaux, ce qui introduit inutilement un facteur d'incertitude supplémentaire. On utilise souvent le Soleil et non une radiosource stellaire pour mesurer le rapport G/T à des fins d'étalonnage de la puissance surfacique au niveau des stations de contrôle en raison de la plus grande puissance de son signal. Néanmoins, si le système de réception est assez sensible, il est préférable de recourir à une radiosource stellaire.

5.1.3.2.1 Termes définissant le facteur G/T

Le facteur de qualité est généralement déterminé à une élévation de 5° et exprimé en unités (dB(K⁻¹)), à savoir G/T (dB(K⁻¹)) = 10 log (G/T numérique).

$$G/T \text{ (dB(K}^{-1}\text{))} = \text{gain d'antenne (dBi)} - 10 \log (\text{température de bruit du système (K)}) \quad (5.1-11)$$

ou

$$G/T \text{ (numérique)} = \frac{8 \pi k r_1 r_2 f^2 (y_{sun} - 1)}{sc^2 y_x} \quad (5.1-12)$$

où:

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

r_1 : facteur de correction de l'affaiblissement atmosphérique; pour les angles $\geq 5^\circ$, où:

$$r_1 = \text{antilog} \frac{\frac{A}{\sin \theta} \text{ (dB)}}{10}$$

A : absorption atmosphérique unidirectionnelle en décibels pour un trajet vertical, θ étant l'angle d'élévation du Soleil à l'instant de la mesure

r_2 : facteur de correction de l'ouverture à mi-puissance du faisceau de l'antenne de réception par rapport au diamètre angulaire du Soleil où:

$$r_2 = 1 + \frac{401,4}{\vartheta_h^2} \text{ et } \vartheta_h^2 \text{ est l'ouverture à mi-puissance du faisceau de l'antenne (min)}$$

f : fréquence (Hz)

y_{sun} : valeurs mesurées, exprimées en unités numériques, où:

$$y_{sun} = \text{antilog} \frac{Y_{sun} \text{ (dB)}}{10}$$

s : densité d'énergie du Soleil obtenue auprès d'un laboratoire de normalisation nationale; si la valeur s , à la fréquence (f) considérée, n'est pas disponible, il faudrait utiliser, au lieu de l'interpolation linéaire, l'équation d'interpolation ci-après pour obtenir une plus grande précision:

$$s = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{R_2}$$

où:

s_1 : densité d'énergie à une fréquence inférieure (f_1), (J/m^2)

s_2 : densité d'énergie à une fréquence supérieure (f_2), (J/m^2)

$$R_2 = \frac{\log(f/f_2)}{\log(f_1/f_2)}$$

c : vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

y_x : valeurs mesurées, exprimées en unités numériques, où:

$$y_x = \text{antilog} \frac{Y_x \text{ (dB)}}{10}$$

5.1.3.2.2 Procédures de mesure du facteur G/T

Il est nécessaire de disposer d'un récepteur du type que l'on trouve généralement dans les stations de contrôle, c'est-à-dire un récepteur équipé d'un indicateur de tension de sortie FI, par exemple un voltmètre ou un oscilloscope. Il est fortement recommandé que l'indicateur ait une précision de 0,1 dB (1%) ou plus. Le récepteur doit être stable et ne pas présenter de fluctuations importantes de gain pendant la période de mesure.

Pour les mesures:

- le circuit de commande automatique de gain du récepteur doit être désactivé;
- l'antenne doit être pointée vers le Soleil et le signal maximal obtenu. Le Soleil doit avoir un angle d'élévation supérieur à 30° environ pour éviter les effets atmosphériques et pour que l'incidence sur les facteurs de correction r_1 et r_2 soit minime;

- l'antenne doit ensuite être décalée, en azimut uniquement, et éloignée du Soleil, par exemple de plus de quelques degrés. Le niveau de tension FI doit être noté. Cette tension correspond à la valeur de référence avec un ciel froid;
- l'antenne doit ensuite être à nouveau tournée en azimut vers le Soleil et la tension notée. La différence des valeurs indiquées est égale à Y_{sun} (dB);
- enfin, l'antenne doit ensuite être décalée, en élévation uniquement, de 5° vers le bas par rapport au Soleil et la tension notée. La différence entre ce niveau de tension et le niveau avec un ciel froid est Y_x (dB) pour x° d'élévation. Il convient de noter qu'une élévation de 5° (x°) est un étalon de référence courant.

Il est ensuite possible d'évaluer le facteur de qualité (G/T) à l'aide des valeurs mesurées de y_{sun} et y_x et en appliquant les valeurs de correction r_1 et r_2 . La densité d'énergie du Soleil, s , peut être obtenue auprès d'un laboratoire de normalisation nationale.

Avec l'équation correspondant au facteur G/T , l'incertitude entourant la résultante quadratique de la mesure est inférieure à 0,5 dB environ.

Les mesures doivent être effectuées un jour de grand ensoleillement.

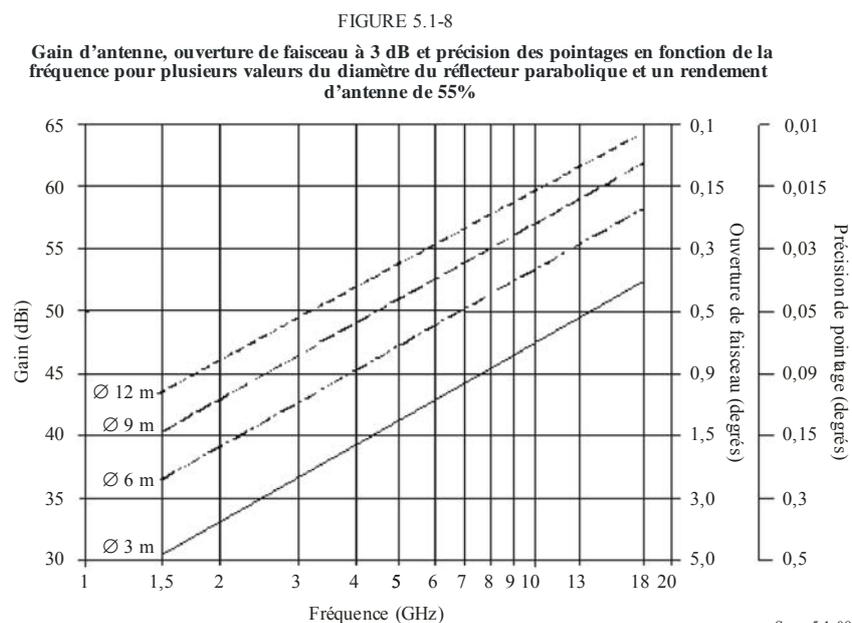
5.1.3.3 Systèmes d'antenne

Pour obtenir une bonne limite de sensibilité de l'équipement de mesure, le gain d'antenne doit être le plus élevé possible.

Des antennes en hélice ou des réseaux de doublets conviennent parfaitement pour la gamme de fréquences de 100 à 1 000 MHz. Ils procurent, en tant qu'antennes individuelles, un gain d'environ 12 à 16 dBi.

Pour la gamme de fréquences 1-26,5 GHz, on obtient de bons résultats avec un réflecteur parabolique illuminé à partir du foyer principal par une source unique à large bande. Si l'on veut avoir des caractéristiques de polarisation et de directivité optimales, il faut accorder la préférence à un système à alimentations interchangeables. Le § 5.1.6.1 donne des exemples de telles solutions techniques.

La Figure 5.1-8 donne les valeurs du gain d'antenne en fonction de la fréquence, avec comme paramètre le diamètre du réflecteur parabolique, pour un rendement d'antenne de 55%. Le diamètre du réflecteur doit être au minimum de 3 m. Dans ce cas, le gain d'antenne s'échelonne de 31 dBi pour 1,5 GHz à 53 dBi pour 18 GHz. Il est possible d'appliquer une extrapolation à des fréquences supérieures. On utilise le plus souvent des antennes dont le diamètre est compris entre 6 et 12 m.



Dans certains cas, il peut y avoir intérêt à utiliser des antennes log-périodiques. Ces antennes, qui donnent une bonne couverture générale sur une décade de fréquences, ont été employées pour le contrôle des émissions des satellites entre 50 et 5 000 MHz. Leur inconvénient est un gain d'antenne presque constant et indépendant de la fréquence, généralement inférieur à 10 dBi.

5.1.3.4 Pointage des antennes

Le système d'entraînement de l'antenne doit permettre le réglage manuel et le réglage commandé par ordinateur. Si l'on a besoin de déterminer avec précision la position des satellites OSG ou de calculer les paramètres orbitaux d'une station spatiale à partir de mesures d'angles, il faut faire appel à la poursuite automatique. Deux solutions peuvent être envisagées: la poursuite pas à pas ou la poursuite mono-impulsion.

La méthode de la poursuite pas à pas est fondée sur les mesures de la puissance du signal reçu en diverses positions autour de la position prévue pour le satellite. On calcule la valeur optimale pas à pas. La technique de la poursuite mono-impulsion repose sur l'analyse du type d'onde qui arrive au récepteur de poursuite. Le type d'onde prévisible (mode guide d'ondes) n'est produit que lorsque l'antenne pointe directement vers le satellite. Les autres types d'onde fournissent des informations de poursuite permettant d'assurer un pointage adéquat. La poursuite mono-impulsion est utilisable pour les satellites OSG et non OSG et est sans effet sur les mesures de puissance.

5.1.3.5 Ouverture de faisceau d'antenne nécessaire pour les mesures d'angles

Dans la présente section, on établira une relation entre l'ouverture de faisceau d'une antenne à mi-puissance (3 dB) et la précision de pointage réalisable. Cette relation est intéressante dans les techniques de poursuite automatique, pour les cas où l'une des tâches confiées à une station de contrôle radioélectrique est le contrôle du maintien en position des satellites OSG ou le calcul des paramètres orbitaux des satellites non OSG (voir le § 5.1.2.6). La précision de pointage indique dans quelle mesure un système d'antenne est capable de déterminer les angles de visée (azimut et élévation) d'un objet spatial. A cet égard, il existe une différence entre une station de contrôle pour les services spatiaux et une station terrienne du service fixe par satellite: dans le second cas, même la plus petite erreur d'alignement (par rapport à la station spatiale) a de graves conséquences.

On peut établir la relation suivante entre l'ouverture à mi-puissance du faisceau d'une antenne et la meilleure précision de pointage réalisable:

$$R = n \cdot \theta_0 \quad (5.1-13)$$

où:

R : erreur de mesure angulaire (degrés)

n : facteur d'amélioration

θ_0 : ouverture à mi-puissance du faisceau (degrés).

Pour les antennes optimisées à bande étroite, on a $n = 0,01$. Pour une antenne à large bande du type généralement utilisé par une station de contrôle radioélectrique pour les services spatiaux, un facteur d'amélioration de 0,1 semble être réaliste dans le cas d'un système du type mono-impulsion, et 0,15 pour un système de poursuite automatique. L'autre variable, l'ouverture à mi-puissance du faisceau, est une fonction du diamètre du réflecteur.

Pour choisir une valeur appropriée de cette ouverture de faisceau, il faut tenir compte des plus faibles tolérances de position en longitude définies dans le Règlement des radiocommunications, soit $\pm 0,1^\circ$. Une tolérance de $\pm 0,1^\circ$ de la longitude définit un segment angulaire du plan de l'orbite équatoriale. Dans le cas restrictif d'une station de contrôle exploitée à l'équateur, il faudra vérifier le maintien en position en effectuant des mesures angulaires dans le plan d'élévation de l'antenne uniquement. Lorsque la station de contrôle est décalée vers le sud ou vers le nord, une rotation s'effectue dans le plan azimutal de l'antenne de contrôle. Dans le cas d'une latitude de 50° , cela signifie que la tolérance de maintien en position longitudinale d'une station spatiale OSG se mesure essentiellement par une différence angulaire dans le plan azimutal de l'antenne. Elle atteint la valeur de $\pm 0,13^\circ$ pour une différence longitudinale de 0° entre la station de contrôle et la projection du satellite à la surface de la Terre et tombe à $\pm 0,085^\circ$ pour une différence longitudinale de 60° . L'erreur de mesure correspondante dans cet exemple est de $\pm 0,01^\circ$, c'est-à-dire dix fois plus petite que la tolérance admissible.

La Figure 5.1-8 donne les valeurs de l'ouverture de faisceau à mi-puissance et de la précision de pointage d'une antenne, en fonction de la fréquence et du diamètre du réflecteur. On voit que la mise en œuvre intégrale du contrôle des positions comme une des tâches d'une station de contrôle se heurte à des limitations, surtout dans les bandes de fréquences basses. Les spécifications sont moins rigoureuses, avec possibilité d'utiliser des systèmes d'antenne plus petits, dans les cas où il s'agit de mettre en évidence seulement de grands écarts dans le maintien en position, par exemple dans l'étude des brouillages préjudiciables.

5.1.3.6 Polarisation du système

Pour les mesures de polarisation (§ 5.1.2.5), il faut tenir dûment compte des caractéristiques du système d'antenne. On utilise la polarisation circulaire et la polarisation rectiligne dans les bandes de fréquences supérieures à 1 GHz et, par ailleurs, il est courant de recourir aux doubles polarisations dans les bandes du service fixe par satellite; dans ces conditions, il faut que la polarisation du système de réception soit adaptée à celle du signal reçu et que l'on obtienne une discrimination de polarisation suffisante.

Un tel système ne permet pas seulement d'obtenir les caractéristiques de polarisation du signal reçu. Il offre aussi un gain d'antenne maximal et une réduction maximale de la diaphonie entre les deux plans de polarisation orthogonaux, ce qui est indispensable pour la plupart des mesures mentionnées au § 5.1.2.

5.1.3.7 Récepteurs

Pour des raisons d'économie, et aussi parce qu'ils doivent assurer une couverture d'ensemble dans les stations de contrôle, les récepteurs de contrôle accordables ne sauraient atteindre les valeurs de bruit extrêmement faibles des récepteurs à fréquence fixe utilisés à des fins de recherche spatiale et d'exploitation. Cependant, le facteur de bruit du système de réception d'une station de contrôle pour les services spatiaux influe sur le facteur de bruit de l'ensemble du système. Réduire ce facteur de bruit à la plus petite valeur possible est un objectif important dans la conception d'une station de contrôle pour les services spatiaux. Cela est vrai bien qu'il soit possible, dans presque tous les cas, d'améliorer le rapport signal/bruit en soumettant une partie du spectre de l'émission à un filtrage à bande étroite.

Pour les fréquences inférieures à 3 GHz environ, on peut utiliser des récepteurs de contrôle de type courant. Au-dessus de 3 GHz environ, on optera pour un système récepteur à hyperfréquences de conception modulaire pour satisfaire aux diverses exigences. Il n'est pas possible d'adopter la configuration classique, c'est à dire un récepteur monobloc; en effet, en raison des pertes élevées dans les câbles en hyperfréquences, l'étage d'entrée du récepteur doit être installé à proximité de l'antenne, tandis que les modules basse fréquence et les équipements de commande peuvent être logés dans la salle d'exploitation. On trouvera au Tableau 5.1-3 les spécifications d'un exemple de système de réception pour les bandes de fréquences C et Ku.

TABLEAU 5.1-3

Exemple de caractéristiques d'un système de réception

Etage de réglage d'accord et synthétiseur	
Gamme de fréquences	1-18 GHz avec chevauchement de plusieurs étages de réglage d'accord
Largeur de bande de fréquences de réception	Fréquence centrale: ± 50 MHz
Erreur de fréquence	$< \pm 2,5 \times 10^{-8}$
Gamme dynamique sans intermodulation	> 66 dB (largeur de bande 1 MHz)
Bruit de phase de l'oscillateur	< -90 dBc (Hz) (à 10 kHz de la porteuse)
Récepteur à large bande	
Intervalle minimal d'accord de fréquence	1 kHz
Largeur de bande du filtre FI	0,05/0,3/1,25/2,5/5/10/20/40 MHz

Dans les méthodes automatiques pour la mesure du déplacement de fréquence Doppler, qui nécessitent la mise en œuvre d'un compteur de fréquence, le récepteur doit fournir un signal de sortie exempt de bruit, censé représenter de façon précise la fréquence de la porteuse émise par le satellite. Pour cela, le récepteur doit opérer une synchronisation avec verrouillage de phase sur cette porteuse. Il faut pouvoir faire varier la largeur de bande de la boucle de verrouillage entre quelques hertz et quelques centaines de hertz. On peut aussi utiliser la fréquence de sortie d'un tel circuit à verrouillage de phase comme fréquence pilote pour régler la fréquence d'un deuxième récepteur pendant les mesures de largeur de bande; voir le § 5.1.2.3.

Pour des applications plus générales, si l'on doit recevoir un signal de satellite sans onde porteuse et si la puissance surfacique de ce signal est suffisante, on peut avoir recours à un dispositif automatique pour l'accord de fréquence. On évite ainsi que les mesures de largeur de bande et de puissance surfacique soient faussées par l'effet Doppler affectant la fréquence du signal reçu.

Il convient de fournir les signaux de sortie suivants du récepteur pour faciliter les mesures: sortie FI à large bande et bande étroite, sorties en vidéo fréquence, audio fréquence et bande de base (MA/MF). La fréquence intermédiaire devrait être la même pour tous les récepteurs d'une installation de mesure, ce qui permet d'associer le même équipement auxiliaire à tous les récepteurs.

5.1.3.8 Equipements périphériques

5.1.3.8.1 Equipements d'usage général

Le Tableau 5.1-4 énumère quelques appareils périphériques nécessaires pour les mesures susmentionnées, ainsi que d'autres appareils qui peuvent être ajoutés utilement au système de réception.

TABLEAU 5.1-4
Equipements périphériques

Equipements périphériques nécessaires		Equipements périphériques additionnels	
Type	Fonction	Type	Fonction
Etalon de fréquence/temps	Référence centrale	Démodulateur de télévision	Démodulation des porteuses TV modulées en MF et en numérique
Compteur de fréquence	Mesures du déplacement de fréquence Doppler	Décodeur de télévision	Décodage des signaux de bande de base TV (NTSC, PAL, SECAM, HDTV)
Répartiteur temporel	Impulsion de temps pour compteur de fréquence	Démodulateur de porteuse son	Démodulation des sous-porteuses son de TV; accordable en fréquence
Analyseur de signaux	Analyse spectrale, mesures de largeur de bande	Analyseur de modulation	Identification des types de modulation; mesures sur la modulation
Wattmètre	Mesures de puissance surfacique		
Générateur de signaux	Mesures de puissance surfacique de référence		
Enregistreur	Usage général		
Oscilloscope numérique	Usage général		

5.1.3.8.2 Analyseur

L'analyseur de spectre s'est imposé comme l'un des appareils les plus puissants, non seulement pour le contrôle général des émissions, mais encore pour le contrôle pour les services spatiaux. Pour être adapté aux tâches de contrôle, l'analyseur de spectre doit pouvoir fonctionner en mode interactif avec d'autres appareils sous la commande d'un ordinateur.

On peut mettre en œuvre un analyseur TFR ou un analyseur vectoriel numérique pour visualiser le spectre et mesurer la puissance en temps réel. Le choix des largeurs de bande et des caractéristiques de filtre appropriées aux différentes modulations (MF, MDP-4, etc.) peut se faire par programmation de filtres numériques. Les analyses TFR permettent une visualisation du spectre en temps réel et on n'a pas à prévoir de longs intervalles de temps pour balayer la largeur de spectre du signal, comme c'est le cas avec les analyseurs de spectre de type classique.

5.1.3.9 Canal de contrôle RF ou FI à large bande

Pour la conception technique du système de réception d'une station de contrôle destinée aux services spatiaux, il est recommandé de prévoir le contrôle à large bande du spectre des fréquences radioélectriques. Il y a lieu de prévoir l'analyse simultanée d'une largeur de bande minimale de 500 MHz.

5.1.3.10 Enregistreur de spectre radioélectrique

Les caractéristiques techniques des enregistreurs pour le contrôle des services spatiaux (voir § 5.1.2.9) correspondent à celles qui sont requises dans le contrôle des émissions pour le service de Terre. Comme il faut utiliser des antennes non directives, de préférence avec polarisation rectiligne, on doit compenser la diminution du gain d'antenne en choisissant une petite largeur de bande pour les enregistreurs. En règle générale, et surtout pour les enregistreurs de type graphique, la largeur totale du spectre analysé ne doit pas dépasser 2 MHz.

5.1.3.11 Equipement informatique nécessaire

L'équipement informatique doit être considéré comme faisant partie intégrante d'une station de contrôle pour les services spatiaux. Il peut être utilisé, par exemple, dans les applications suivantes:

- calcul des paramètres orbitaux;
- calcul des angles de pointage des antennes, à partir des paramètres orbitaux;
- orientation des antennes;
- mise en mémoire des résultats de mesure;
- évaluation des résultats de mesure.

5.1.4 Documentation et bases de données pour le contrôle destiné aux services spatiaux

5.1.4.1 Considérations d'ordre général sur la documentation et les bases de données

La réussite de l'exploitation d'une station de contrôle pour les services spatiaux exige une mise à jour continue de la documentation papier ou électronique. Celle-ci doit de préférence se présenter sous la forme d'un système de bases de données contenant non seulement les données diffusées dans les publications officielles de l'UIT, à savoir

- la Circulaire internationale d'information sur les fréquences du BR (IFIC) (sur CD-ROM);
- la liste des réseaux à satellite (en ligne ou sur CD-ROM);
- les stations de radiocommunication spatiales (sur DVD-ROM);
- le Règlement des radiocommunications (support papier ou CD-ROM);

mais également un relevé synoptique de tous les satellites en orbite, accompagné de renseignements sur certains des paramètres orbitaux les plus importants (période de révolution, inclinaison, apogée, périégée). Les renseignements concernant les stations de Terre autorisées par l'administration sont d'une grande utilité pour la géolocalisation des stations de Terre; ils permettent notamment d'identifier les utilisateurs non autorisés du spectre.

Pour faciliter les opérations de contrôle, il est nécessaire de créer une base de données dans laquelle sont enregistrés deux types d'information: des informations générales sur tous les satellites présentant un intérêt et les caractéristiques des satellites obtenues grâce aux opérations de contrôle.

5.1.4.2 Base de données contenant des informations générales sur les satellites existants

La base de données des informations générales sur les satellites existants contient principalement les caractéristiques et les services spatiaux autorisés des satellites observables par la station. Les informations les plus importantes sont:

- informations sur les orbites des satellites, notamment la longitude nominale des satellites OSG, la tolérance en longitude, des données sur les éphémérides des satellites non OSG, etc.;
- informations sur les répéteurs, notamment le nombre de répéteurs, la largeur de bande des répéteurs, la gamme de fréquences, la fréquence des balises, le gain d'antenne maximum;
- informations sur les faisceaux des satellites, notamment la couverture des faisceaux, la zone de service et la puissance maximale (dBW/m²).

Autres renseignements sur les satellites présentant un intérêt pour la géolocalisation des stations terriennes:

- données géographiques: longitude, latitude, altitude, etc.;
- données concernant l'antenne: taille, gain, diagramme de gain, etc.;
- autres données: attribution de fréquences, largeur de bande, polarisation, puissance émise, type de service, type de modulation, période d'activité, etc.

Plusieurs sources sont susceptibles de fournir les données susmentionnées: opérateur(s) de satellites, administration(s) et médias publics.

5.1.4.3 Base des données de contrôle

La base des données de contrôle sert à enregistrer les résultats de mesures de la station de contrôle pour les services spatiaux. Les résultats des mesures incluent normalement quelques paramètres clés, notamment la fréquence, la polarisation, la largeur de bande, la puissance surfacique et le type de modulation. Une analyse spectrale de l'occupation sur le long terme peut simplifier la planification du spectre.

Afin de faciliter les échanges de données entre stations de contrôle, il convient d'enregistrer dans la base les paramètres ayant servi au contrôle lui-même, notamment la position de l'antenne, les paramètres d'antenne, la date de la mesure, les conditions météorologiques, etc.

5.1.4.4 Utilisation de la documentation et des bases de données afin de simplifier le contrôle

S'agissant des activités de contrôle, la documentation et les bases de données viennent en appui de la fonction suivante:

- Identification des stations spatiales.

Il est possible d'identifier les stations spatiales en comparant les informations générales stockées dans la base de données avec les résultats des opérations de contrôle. Le paragraphe suivant est une introduction détaillée au processus d'identification des stations spatiales.

Identification des émissions illicites

Les ingénieurs chargés du contrôle peuvent identifier les émissions illicites par comparaison, dans la base de données des informations générales, avec les entrées correspondant aux émissions autorisées par l'administration. Les systèmes de contrôle peuvent effectuer cette opération de façon automatique. Pour appliquer cette procédure, il faut que l'administration dispose des données correspondant aux porteuses autorisées.

Aide à la géolocalisation des émissions

Les systèmes de bases de données peuvent considérablement augmenter l'efficacité des missions de géolocalisation. Certaines analyses peuvent être réalisées à partir des informations stockées dans la base de données, notamment:

- l'analyse des satellites adjacents;
- le choix des signaux de référence;
- l'analyse des brouilleurs éventuels.

En outre, le contrôle pour les services spatiaux peut largement tirer parti d'un Système d'information géographique (SIG). En effet, un système combinant la base de données de la station et une base de données SIG donne aux ingénieurs chargés du contrôle une vue d'ensemble de l'utilisation du spectre. Un tel système combiné peut avantageusement être utilisé lors de l'analyse des brouilleurs éventuels des stations spatiales.

5.1.5 Identification des stations spatiales et géolocalisation des stations terriennes

Pour identifier une station spatiale, on compare généralement les caractéristiques mesurées des émissions et de l'orbite avec les caractéristiques figurant dans la base de données et dans la documentation de référence. Les caractéristiques de référence se présentent sous la forme d'une liste des caractéristiques des émissions et des orbites de toutes les stations spatiales, publiées ou communiquées au service de contrôle des émissions. La station inconnue est identifiée par élimination itérative des stations qui ne correspondent pas aux caractéristiques mesurées. Le Tableau 5.1-5 donne quelques caractéristiques de référence.

Les satellites OSG étant aujourd'hui largement utilisés, les administrations doivent pouvoir identifier les stations terriennes qui transmettent vers ce type de satellite, acquérir des informations exhaustives sur l'utilisation des stations terriennes et éliminer les émissions préjudiciables ou illicites. La méthode de géolocalisation décrite au § 5.1.2.7 permet d'obtenir une précision des positions de quelques dizaines de kilomètres en règle générale. Si l'identification des émissions provenant d'utilisateurs autorisés peut se satisfaire de ce degré de précision, l'identification des émissions illicites nécessite la mise en place d'autres moyens de contrôle pour le service de Terre, susceptibles de déterminer la source des émissions en vue d'éliminer les brouillages.

TABLEAU 5.1-5

Caractéristiques de référence

Caractéristiques des émissions	Caractéristiques orbitales
Fréquence	Données d'éphéméride ou, à défaut:
Largeur de bande	– période de révolution
Type de modulation	– angle d'inclinaison de l'orbite
Polarisation	– altitudes du périégée et de l'apogée
p.i.r.e.	– instant de franchissement de l'équateur et longitude du point de franchissement

5.1.5.1 Résultats de contrôle à utiliser pour l'identification

5.1.5.1.1 Evaluation des enregistrements des bandes de fréquences

Compte tenu des indications du § 5.1.2.9 et de l'exemple du § 5.1.7.1, les enregistrements des bandes de fréquences permettent d'obtenir des valeurs approximatives pour les caractéristiques suivantes des stations spatiales:

- fréquence;
- instant prévisible de la réception des signaux des satellites non OSG;
- période de révolution.

5.1.5.1.2 Calcul de la période de révolution

On peut obtenir une première valeur approchée de la période de révolution avec une précision de plusieurs secondes en déterminant les TCA de deux trajets successifs. On peut ensuite améliorer le résultat en procédant à des mesures supplémentaires de TCA pendant une période d'un ou deux jours.

5.1.5.1.3 Radiogoniométrie

Pour connaître le moment exact où un satellite passe au point de sa trajectoire le plus rapproché d'une station de contrôle, on peut, à titre complémentaire, construire une courbe représentant, en fonction du temps, le changement de la direction d'arrivée des signaux, fournie soit au moyen de relevés radiogoniométriques, soit par l'orientation d'une antenne de réception à effet directif très accusé. Le taux de variation angulaire

maximal correspondra au moment où le satellite sera le plus proche de la station de contrôle lors d'un passage déterminé et le renseignement donné par cette méthode devrait être compatible avec l'information obtenue avec la courbe de l'effet Doppler.

Les mesures radiogoniométriques sont bien adaptées à la détermination du TCA dans les cas où le spectre ne contient pas de fréquence porteuse. Toutefois, ces mesures exigent une puissance surfacique suffisante au point de réception.

5.1.5.1.4 Calcul des données d'éphéméride à partir de mesures d'angles sur les antennes

Si la station de contrôle est équipée d'un système d'antennes à poursuite automatique, il est possible d'utiliser les résultats des mesures d'angles dans le plan azimutal et le plan vertical pour calculer les données d'éphéméride d'un satellite inconnu [Montenbruck, 1989; Montenbruck et Pflieger, 1991]. On trouve sur le marché des logiciels informatiques pour ces calculs.

La précision de détermination des données d'éphéméride dépend des facteurs suivants:

- la précision globale des mesures d'angles (§ 5.1.3.5);
- l'arc d'orbite utilisé pour ces mesures;
- le type d'orbite.

Il se pose un problème opérationnel important, à savoir la nécessité de pointer l'antenne rapidement sur un satellite non OSG peu après que celui-ci commence à devenir visible depuis la station de contrôle. Pour obtenir une bonne précision dans les mesures d'angles, il faut mettre en œuvre des antennes très directives, ce qui rend plus difficiles la recherche et le repérage d'un satellite animé d'un mouvement ininterrompu, étant donné que l'arc d'orbite utile pour les mesures est plus petit que l'arc visible total. On trouvera au § 5.1.7.2 un exemple de calcul de paramètres orbitaux à partir de mesures d'angles.

5.1.5.1.5 Caractéristiques des émissions

Les mesures des caractéristiques des émissions, telles que décrites dans les paragraphes précédents, peuvent suffire à identifier une station spatiale. Il en est ainsi en particulier des stations spatiales qui sont exploitées en conformité avec les dispositions du Règlement des radiocommunications et dont les caractéristiques d'émission sont notifiées ou publiées.

5.1.5.2 Procédure d'identification

Si les caractéristiques d'émission mesurées ne permettent pas d'identifier une station spatiale, on peut se rabattre dans certains cas sur les données d'éphéméride mesurées, ou sur certaines d'entre elles.

Lorsque l'on compare ces données d'éphéméride mesurées avec les données de référence publiées, on choisit en premier les objets en orbite dont les données sont les plus proches. On procède ensuite à des comparaisons «pas à pas» des données, qui devraient permettre de réduire très sensiblement le nombre des objets à prendre en considération. Enfin, il devrait être possible de faire une identification correcte en calculant les durées de visibilité et le TCA pour les objets restants et en comparant ces résultats avec les résultats fournis par le contrôle.

5.1.5.3 Autres possibilités d'identification des stations spatiales

Dans ce qui précède, on a exposé les méthodes utilisées pour identifier les stations spatiales. Elles sont basées sur la comparaison des caractéristiques mesurées et observées des signaux avec les renseignements publiés et sur la comparaison des données d'éphéméride, ou de certaines d'entre elles (période de révolution, angle d'inclinaison, TCA) et des données d'éphéméride publiées. Cette procédure est cependant longue à appliquer et elle suppose que l'on a accès aux données d'éphéméride des objets en orbite.

Dans certains cas, notamment lorsque l'on constate que les dispositions du Règlement des radiocommunications ne sont pas respectées ou en cas de brouillages préjudiciables, il peut être utile d'appliquer une procédure additionnelle. En pareils cas, la station de contrôle pour les services spatiaux pourrait consigner tous les renseignements possibles concernant les mesures de fréquence et de largeur de bande, ainsi que d'autres caractéristiques des émissions, avec les données d'éphéméride, ou certaines d'entre

elles. Ensuite, en se fondant sur ces données, la station de contrôle pourrait demander l'identification à des centres d'identification et de poursuite ou à des opérateurs de réseaux à satellites.

5.1.5.4 Considérations opératoires concernant la géolocalisation de stations terriennes émettant vers des satellites OSG

Divers fabricants commercialisent aujourd'hui des systèmes de géolocalisation. Ces systèmes, adoptés par certains opérateurs de satellites et certaines administrations, effectuent la géolocalisation des stations terriennes émettant vers des satellites OSG en utilisant les principes décrits au § 5.1.2.7. Le présent paragraphe aborde certains aspects opératoires de ces systèmes.

En premier lieu, l'opérateur du système de géolocalisation doit déterminer la nature du signal inconnu. Pour ce faire, deux possibilités s'offrent à lui: utiliser d'autres équipements de contrôle ou demander des informations à l'opérateur de satellites. Il doit ensuite réaliser un test avec un satellite adjacent. Pour évaluer les satellites adjacents susceptibles d'être retenus, plusieurs choix se présentent à lui. Il doit par ailleurs entrer d'autres données dans le système de géolocalisation. En règle générale, il faut disposer de plusieurs signaux de référence afin de supprimer les décalages des oscillateurs à bord des deux satellites ou, dans l'algorithme de géolocalisation, corriger les incertitudes des relevés de position dues aux erreurs d'éphéméride.

5.1.5.4.1 Acquisition des informations nécessaires

L'opérateur doit déterminer certains paramètres utiles liés au signal étudié: satellite qui retransmet le signal inconnu, plans de fréquence de ses répéteurs, fréquence centrale, largeur de bande, rapport cyclique (pour les signaux intermittents), caractéristiques de mobilité de la fréquence du signal inconnu, etc. Sur la base de ces informations, l'opérateur choisit les paramètres d'observation de façon à optimiser la probabilité d'une géolocalisation réussie.

Les informations susmentionnées peuvent être obtenues grâce à d'autres moyens de contrôle ou, si le signal inconnu cause des brouillages préjudiciables, grâce à la station victime elle-même.

Il est aussi utile d'effectuer un enregistrement du répéteur brouillé du satellite avec un enregistreur de spectre dès que possible après que les brouillages ont été signalés à la station de contrôle afin de «voir» les activités du brouilleur et l'occupation du répéteur.

5.1.5.4.2 Choix du satellite adjacent

Il arrive que plusieurs satellites puissent jouer le rôle de satellite adjacent. Dans ce cas, il convient avant tout de vérifier que le satellite adjacent choisi possède une connectivité correcte en liaison montante et en liaison descendante.

L'opérateur peut déduire des valeurs connues de la fréquence et de la polarisation de la liaison descendante la fréquence et la polarisation du signal inconnu en liaison montante. Dans le cas de faisceaux hémisphériques ou ponctuels sur la liaison montante, le diagramme de faisceau limite éventuellement la région géographique à partir de laquelle le signal inconnu a probablement été émis. L'opérateur doit cependant garder à l'esprit que les grandes antennes de liaison montante situées à l'extérieur du diagramme de faisceau principal du satellite dans le sens montant sont aussi susceptibles de générer des brouillages.

On peut déterminer le ou les satellites adjacents susceptibles d'être retenus en examinant la fréquence et la polarisation de la liaison montante du signal inconnu ainsi que la couverture de faisceau de l'antenne en liaison montante du satellite primaire. Les critères permettant de choisir le satellite adjacent sont les suivants:

- couverture en fréquence de la liaison montante identique à celle du satellite primaire;
- polarisation de la liaison montante identique à celle du satellite primaire;
- couverture du faisceau de la liaison montante identique à celle du satellite primaire;
- séparation angulaire par rapport au satellite primaire le long de l'arc géostationnaire;
- pas de traitement embarqué dans le répéteur.

Les critères de sélection essentiels énumérés ci-dessus sont à peu près ordonnés selon leur importance relative. Les trois premiers critères – fréquence de la liaison montante, polarisation de la liaison montante et couverture du faisceau de la liaison montante – sont des préalables absolument indispensables à des mesures correctes.

Une fois que l'opérateur a identifié, à partir des critères susmentionnés, un ou plusieurs satellites adjacents susceptibles de convenir, il peut appliquer les critères secondaires pour faire son choix définitif, à savoir entre autres:

- disponibilité de signaux de référence adéquats pour la paire de satellites primaire/adjacent;
- qualité des données d'éphéméride disponibles pour le satellite adjacent;
- présence/absence de signaux dans le répéteur du satellite adjacent de même fréquence que le signal brouilleur.

Lors du choix définitif du satellite adjacent, l'opérateur doit garder à l'esprit le fait que la solution géométrique sera optimale pour les satellites dont les données d'éphéméride actuelles sont de bonne qualité et pour un choix judicieux de signaux de référence relatifs à la paire de satellites à utiliser.

Les signaux de référence peuvent se présenter soit sur le satellite primaire, soit sur le satellite adjacent. Si le satellite primaire dispose de signaux de référence adéquats, le critère concernant les signaux de référence n'est pas nécessairement utile pour le choix du satellite adjacent. A noter que l'utilisation d'émetteurs de référence dédiés, fixes ou transportables, peut également améliorer les résultats de la géolocalisation.

Autre facteur susceptible d'influencer le choix du satellite adjacent: l'orientation, à l'instant de la mesure, des lignes de FDOA pour la paire de satellites choisie. Contrairement aux lignes de TDOA, l'orientation des lignes de FDOA pour une paire de satellites donnée peut varier considérablement au cours d'une période orbitale (1 jour).

Le mieux est de choisir un satellite adjacent ne traitant pas de signaux dans le voisinage du signal brouilleur et des signaux de référence. Pour observer l'activité réelle du répéteur, il est recommandé d'enregistrer le répéteur du satellite adjacent à l'aide d'un enregistreur de spectre de fréquences.

Si les mesures sont prises lorsque les lignes de FDOA sont quasiment parallèles aux lignes de TDOA, la zone de résultats sera très allongée le long des lignes à TDOA constante. Dans ce cas, l'opérateur peut décider de choisir un autre satellite adjacent ou programmer des mesures complémentaires à un moment où l'orientation des lignes de FDOA est plus favorable.

5.1.5.4.3 Signaux de référence

Un signal de référence idéal est un signal permanent à large bande provenant d'un emplacement géographique connu précisément, qui crée une forte corrélation entre les deux satellites utilisés. Sa localisation précise peut être fournie par une base de données de stations terriennes, sachant qu'il est préférable de la vérifier à l'aide d'un récepteur GPS portable. Lorsque les signaux de référence sont pléthore, le choix de l'opérateur devrait se porter sur les signaux:

- qui sont émis par une antenne relativement petite;
- qui sont bien répartis géographiquement;
- dont la modulation est bien adaptée;
- dont la fréquence correspond à des sections non utilisées du répéteur des satellites adjacents.

5.1.5.4.4 Données d'éphéméride

La qualité des données d'éphéméride du satellite primaire et du satellite adjacent influe directement sur la qualité du résultat. Dans la plupart des cas, il est possible d'éliminer l'erreur d'éphéméride, dans une large mesure, en recourant à deux signaux de référence ou plus (voir le § 5.1.2.7.2 pour des informations détaillées). Des données d'éphéméride particulièrement mauvaises peuvent entraîner des incertitudes sur la localisation de plusieurs centaines de kilomètres. C'est notamment le cas juste après des manœuvres orbitales ou lorsque l'époque des données d'éphéméride se situe plusieurs jours avant la date des mesures. L'opérateur doit alors tenter d'obtenir de meilleures données d'éphéméride ou utiliser un autre satellite adjacent.

Pour obtenir des données d'éphéméride, l'opérateur du système de géolocalisation peut:

- en faire la demande auprès d'un ou plusieurs opérateurs de satellites;
- télécharger des données publiées sur des sites Internet.

Il doit ensuite contrôler les données d'éphéméride grâce à une mesure de géolocalisation d'une station connue (par exemple de référence). Si la qualité du résultat n'est pas suffisante, il peut appliquer une compensation d'erreur d'éphéméride, notamment en effectuant des mesures de géolocalisation de trois stations de référence ou plus. La compensation d'erreur sur l'éphéméride permet de corriger les données d'éphéméride par calcul inverse des mesures de géolocalisation.

5.1.5.4.5 Mise en place d'émetteurs de référence supplémentaires dédiés

Dans certains cas, l'opérateur du système de géolocalisation peut estimer que le nombre et la répartition géographique des signaux de référence sont insuffisants et qu'ils ne permettent pas d'obtenir des résultats précis. De fait, certains satellites ne sont principalement utilisés que dans une ou deux grandes villes, ce qui limite considérablement le nombre de signaux de référence disponibles pour la géolocalisation. Les administrations sont donc amenées à mettre en place plusieurs émetteurs de référence supplémentaires dédiés, de façon à offrir aux opérateurs des systèmes de géolocalisation un plus large choix de signaux de référence. Ces émetteurs doivent:

- satisfaire aux exigences techniques des opérateurs de satellites;
- être capables de se pointer sur tout satellite OSG visible le long de l'arc géostationnaire;
- être bien répartis d'un point de vue géographique;
- être dotés d'une antenne relativement petite;
- utiliser un ou plusieurs types de modulation bien adaptés.

Il est recommandé aux administrations de coopérer pour mettre en place, à différents endroits, des émetteurs de référence supplémentaires dédiés, qu'elles pourront utiliser comme émetteurs de référence en tant que de besoin.

Avant d'utiliser les émetteurs de référence supplémentaires dédiés pour émettre vers un satellite donné, il est nécessaire d'obtenir l'accord de l'opérateur du satellite. De plus, il est parfois requis d'effectuer certains tests techniques avant l'émission.

5.1.5.4.6 Emetteurs de référence transportables

En règle générale, il est très difficile de trouver un émetteur possédant une liaison montante vers un satellite OSG, notamment dans les zones urbaines, et ce, pour deux raisons principales: le blocage des ondes radioélectriques par des bâtiments, d'une part, et la directivité habituellement élevée des antennes, avec lobes latéraux de très faible niveau en direction de la Terre, d'autre part. Il pourrait donc être intéressant d'effectuer des mesures de TDOA et de FDOA à l'aide d'émetteurs transportables afin d'assister l'opérateur dans la localisation de l'émetteur responsable des brouillages préjudiciables.

Comme indiqué au paragraphe précédent, avant d'émettre vers un satellite donné, il est nécessaire d'obtenir l'accord de l'opérateur du satellite afin d'effectuer, si besoin, des tests techniques avant l'émission.

En théorie, pour une paire de satellites donnée, deux stations terriennes émettant à des fréquences différentes produisent les mêmes valeurs de TDOA et deux valeurs de FDOA très proches. Plus l'émetteur de référence est proche du brouilleur inconnu, plus l'algorithme de géolocalisation est précis.

Avant d'utiliser l'émetteur de référence transportable, l'opérateur doit tirer pleinement parti de tous les émetteurs de référence fixes afin de minimiser les erreurs de résultat et la taille de la zone résultat. Il doit ensuite, pour transmettre, obtenir l'accord de l'opérateur de satellites en tenant compte des paramètres techniques de l'émission. Enfin, il doit respecter les deux étapes suivantes:

Etape N° 1: positionner l'émetteur de référence transportable au centre de la zone résultat et transmettre le signal de référence selon les modalités définies d'un commun accord avec l'opérateur de satellites. L'opérateur du système de géolocalisation doit ensuite être averti afin qu'il puisse effectuer ses mesures. Il faut également lui fournir la position exacte du véhicule.

Etape N° 2: les mesures de géolocalisation obtenues à l'aide de l'émetteur de référence transportable doivent fournir un nouveau résultat.

Les résultats sont affinés après l'étape N° 2. Ces deux étapes peuvent être répétées pour optimiser encore les résultats.

L'opérateur de l'émetteur de référence transportable doit rester en contact étroit avec l'opérateur du système de géolocalisation. Dans la pratique, le choix du trajet et de l'émission dépend de nombreux autres facteurs (réglementations du trafic par exemple), dont l'opérateur doit tenir compte.

5.1.6 Solutions techniques: exemples

5.1.6.1 Exemple d'une station de contrôle des émissions radioélectriques spatiales

Ce paragraphe décrit les éléments les plus importants d'une station de contrôle des émissions radioélectriques spatiales. Une telle station est habituellement composée de quatre éléments principaux:

Elément 1: Système d'antennes (voir § 5.1.6.1.1)

Une ou plusieurs antennes permettant de couvrir toutes les bandes de fréquences de télécommunication et de radiocommunication spatiale présentant un intérêt (antennes directives et équidirectives).

Elément 2: Equipements de réception (voir § 5.1.6.1.2)

Système d'alimentation, unité de polarisation, convertisseurs-abaisseurs, systèmes d'étalonnage, source de fréquences de référence.

Elément 3: Equipements de contrôle (voir § 5.1.6.1.3)

Systèmes de mesure manuelle et automatique et équipements d'analyse (analyseurs de signaux, récepteurs, enregistreurs de spectre, analyseurs de modulation, etc.), qui font partie de l'équipement de contrôle.

Elément 4: Equipements de commande (voir § 5.1.6.1.4)

Les équipements de commande comprennent les matériels et logiciels permettant de commander l'orientation des antennes et de paramétrer le système de réception et l'équipement de contrôle afin de simplifier les procédures de mesures automatiques.

Généralités

Emplacement de la station de contrôle:

La station de contrôle doit se trouver aussi loin que possible des zones urbaines et industrielles, donc loin du bruit causé par l'homme, des téléphones cellulaires et des réseaux locaux hertziens. Elle doit se trouver sur un site non traversé par des liaisons fixes, déclaré protégé et exempt d'émetteurs terriens et de liaisons fixes.

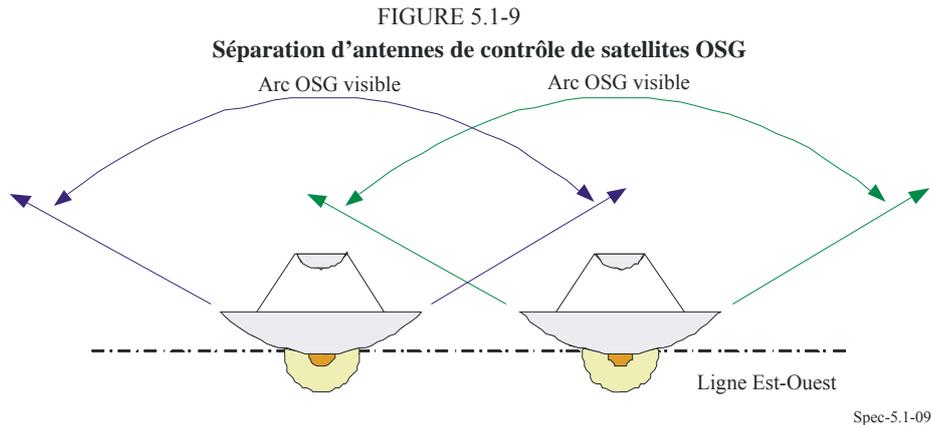
Le paysage autour de la station de contrôle doit être plat, sans collines ni bâtiments qui pourraient entraver la ligne de visibilité directe.

Configuration du site:

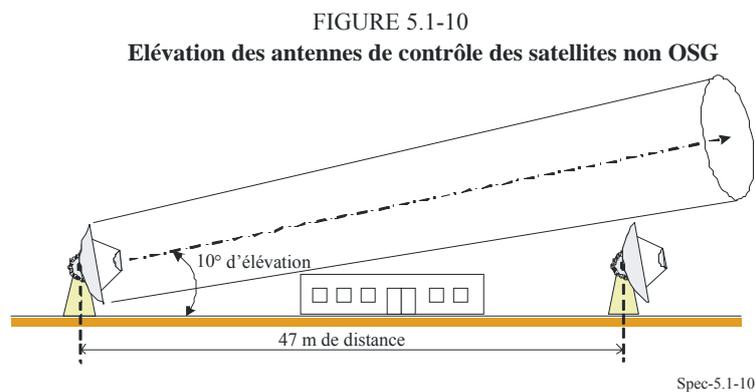
Le positionnement des antennes et des bâtiments dépend principalement de la cible à contrôler (satellite OSG ou non OSG) et de la partie de l'orbite géostationnaire que l'on compte observer. Il convient de prévoir les extensions futures.

En environnement plat et dégagé, les antennes peuvent être alignées, par exemple sur une ligne est-ouest.

La distance entre les antennes doit être suffisante dans la direction des satellites OSG et l'angle de visibilité de l'arc géostationnaire doit être exempt de tout obstacle (voir Figure 5.1-9).



Pour être en mesure de recevoir sans entrave des émissions venant de satellites non OSG, la zone entourant l'antenne doit être libre de tout obstacle (antennes, bâtiments) dans toutes les directions, et ce, jusqu'à la plus faible élévation requise (voir Figure 5.1-10).



Le Tableau 5.1-6 énumère les distances idéales entre deux antennes (de 9 m de diamètre chacune) permettant une ligne de visibilité directe sans entrave vers les satellites. L'angle d'élévation indiqué est le plus petit angle permettant une visibilité sans entrave du satellite.

Afin d'optimiser le nombre d'antennes nécessaires sans détériorer de façon significative leur qualité de fonctionnement, on veillera de préférence à combiner les bandes de réception. Un système de mesure de géolocalisation nécessite deux antennes, chacune couvrant la bande de fréquences souhaitée.

Une combinaison de trois antennes par exemple (1 C/Ku, 1 L/S et 1 Ka) permet de recevoir des liaisons de radiodiffusion, des signaux de réseaux, et éventuellement des signaux de commande et de test de satellites. Il est également possible de combiner quatre ou cinq bandes de fréquences à l'aide d'une seule antenne: une antenne Cassegrain à alimentation périscopique et deux cabines ou un système à alimentation de type revolver.

TABLEAU 5.1-6

Distance entre deux antennes (de même taille) permettant d'obtenir une ligne de visée directe sans entrave vers les satellites

Élévation (degrés)	Distance (m)
5	99
10	47
15	30
20	22
25	18
30	16

Inconvénient d'une telle antenne multibande: une seule bande de fréquences peut être utilisée à la fois.

5.1.6.1.1 Système d'antenne

Types d'antenne

- Antenne à mouvement limité
- Antenne tournante avec secteur azimutal continu supérieur à 180°
- Antenne à mouvement total avec l'axe d'élévation au-dessus de l'axe d'azimut
- Antenne à mouvement total avec l'axe d'élévation au-dessus de l'axe d'azimut au-dessus de l'axe d'inclinaison
- Antenne à mouvement total avec l'axe oblique au-dessus de l'axe d'azimut au-dessus de l'axe d'inclinaison
- Antenne à mouvement total avec montage en X-Y
- Hexapode.

Le contrôle des satellites OSG et non OSG nécessite différents types d'antenne, dont les plus courants sont décrits ci-dessous.

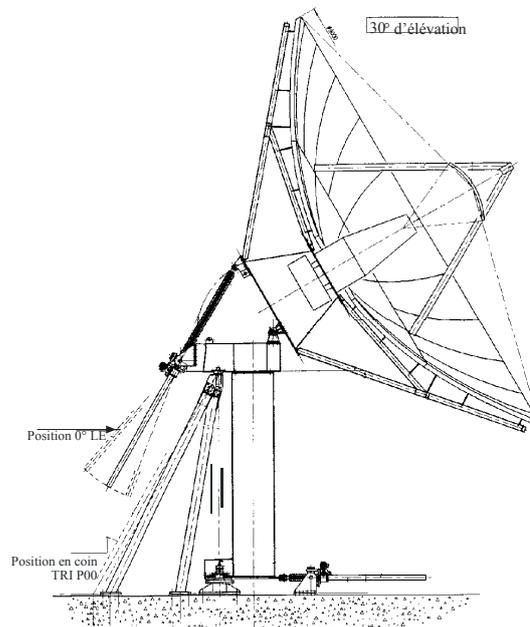
Antennes pour le contrôle des satellites OSG

Pour contrôler les satellites OSG, il est possible d'utiliser des antennes de vitesse lente en azimut et en élévation.

Systemes de poursuite utilisables:

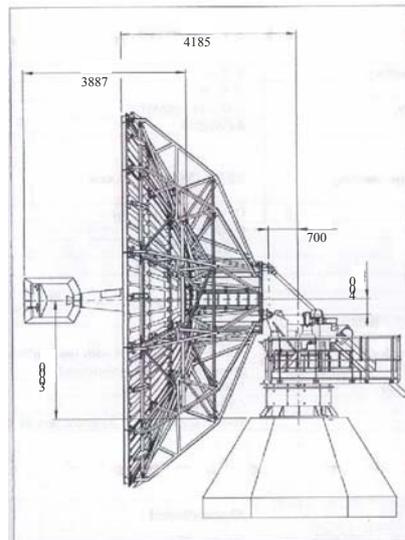
- poursuite informatique avec TLE (*two line elements*);
- poursuite pas à pas;
- poursuite mono-impulsion.

FIGURE 5.1-11
Antenne de 9 m à mouvement limité avec pied de type Kingpost et vérins à vis motorisés en azimut et en élévation



spec-5.1-11

FIGURE 5.1-12
Exemple d'antenne tournante de 9,3 m



Antenne de toit de 9,3 m (élévation 0°)

Spec-5.1-12

Antennes pour le contrôle des satellites non OSG

Pour le contrôle des satellites non OSG, il est nécessaire d'utiliser des antennes à mouvement total, dotées d'une vitesse supérieure et d'un système de poursuite. La vitesse et l'accélération dépendent du type de socle de l'antenne (élévation au-dessus de l'azimut ou montage X-Y).

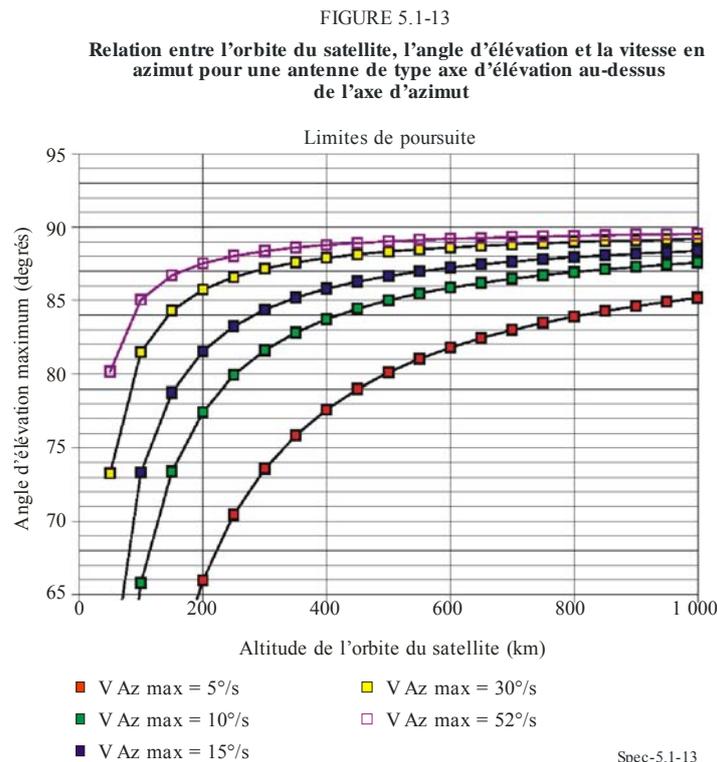
Systèmes de poursuite utilisables:

- poursuite informatique avec TLE (*two line elements*);
- poursuite mono-impulsion.

Antennes avec l'axe d'élévation au-dessus de l'axe d'azimut

Ce type d'antenne peut être utilisé avec tous les types de satellite dont les orbites ne dépassent pas 85° en élévation. Il présente, à son zénith, une zone non couverte (*keyhole* ou phénomène de trou de serrure) et offre différents choix de montage de l'équipement de réception, par exemple une cabine directement au niveau de la parabole.

La poursuite des orbites satellitaires jusqu'à 85° d'élévation avec ce type d'antenne nécessite une vitesse en azimut d'environ $15^\circ/\text{s}$, qui dépend de l'altitude du satellite. Il existe un risque de perte de contact avec le satellite si la vitesse en azimut n'est pas suffisante, tout particulièrement dans le cas des satellites d'orbite basse avec des angles d'élévation élevés. Le diagramme de la Figure 5.1-13 présente la relation entre l'orbite du satellite, la vitesse en azimut et l'angle d'élévation.



L'utilisation, au niveau de l'antenne, d'un axe dit «d'inclinaison» permet de réduire la vitesse en azimut. Les systèmes à axe d'inclinaison permettent de décaler le socle de l'antenne tout entier dans une direction oblique, et donc de poursuivre le satellite sans interruption même avec une faible vitesse en azimut. Il est nécessaire de bien connaître l'orbite du satellite (TLE par exemple) de façon à calculer précisément l'angle d'inclinaison approprié. La méthode par inclinaison ne convient donc pas à la poursuite des satellites dont les données orbitales ne sont pas connues. Dans ce cas, on utilisera par exemple la poursuite mono-impulsion.

FIGURE 5.1-14

Antenne Cassegrain de 12 m à alimentation périscopique avec un socle de type élévation au-dessus de l'azimut et deux cabines à l'arrière de la parabole permettant d'abriter les équipements de réception

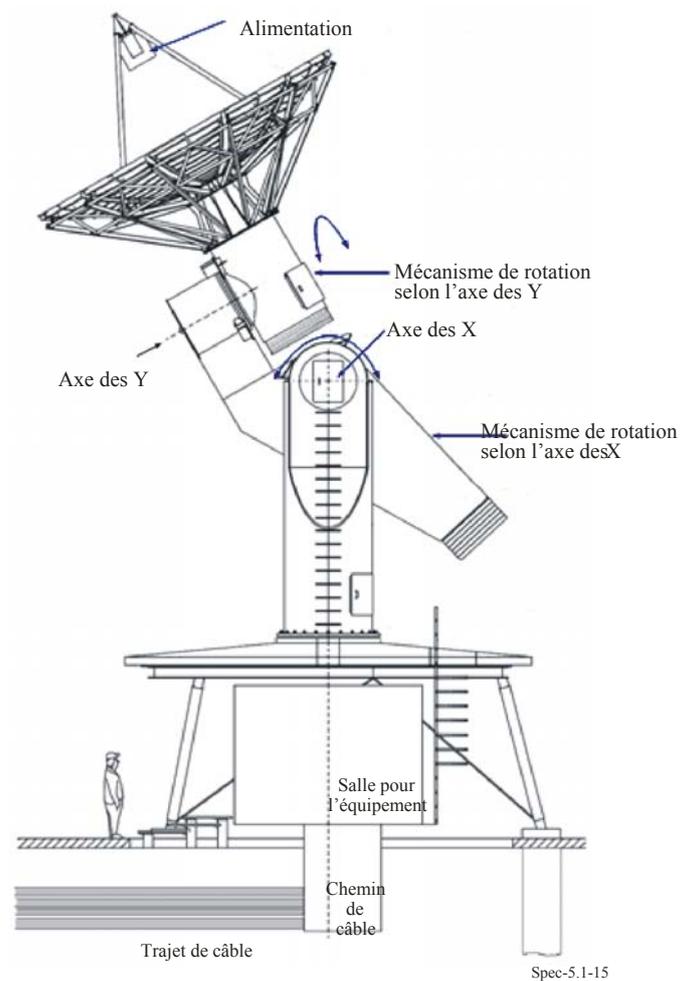


Spec-5.1-14

Antenne X-Y

Ce type d'antenne présente l'avantage de pouvoir poursuivre tout type d'orbite sans phénomène de «trou de serrure» au zénith. La construction spécifique des axes ne requiert que des valeurs faibles de vitesse et d'accélération ($\leq 3^\circ/s$). A noter cependant un inconvénient: il est difficile de loger l'équipement de réception car l'espace à l'arrière de l'antenne est limité.

FIGURE 5.1-15
Antenne X-Y de 7 m à alimentation au foyer principal



Spécifications de l'antenne

Le Tableau 5.1-7 présente les spécifications techniques pratiques des antennes utilisées pour le contrôle des satellites. Les besoins étant fonction de la station, il convient de considérer les chiffres figurant dans ce tableau comme des spécifications générales minimales. Les paramètres réels doivent être déterminés à partir des besoins spécifiques de mesure.

TABLEAU 5.1-7

Spécifications techniques pratiques des antennes utilisées pour le contrôle des satellites

	Paramètre	Performance			
		Bande L/S/C	Bande Ku	Bande Ka	
a.	Gamme de fréquences	Bande L: 1 452-1 492 et 1 530-1 800 MHz Bande S: 2 100-2 300 MHz 2 500-2 690 MHz Bande C: 3 400-4 200 et 4 500-4 800 MHz	10,70-12,75 GHz	17,30-21,20 GHz	
b.	Niveau maximal de signal à l'entrée de l'amplificateur à faible bruit (AFB) (dBm)	≤ -30	≤ -30	≤ -30	
c.	Performance de la mesure de la puissance surfacique (C/N au minimum 23 dB)	-155 dBW/m ² sur une largeur de bande de 4 kHz	-165 dBW/m ² sur une largeur de bande de 4 kHz	-160 dBW/m ² sur une largeur de bande de 4 kHz	
d.	Précision de la mesure de la puissance surfacique (dB)	±1	± 1	± 1	
e.	Facteur de qualité (G/T) (dB/K)	L = 20 S = 23 C = 28	37	33	
f.	Précision de la fréquence de référence	Vieillessement: 1×10^{-10} par jour, Température: 1×10^{-9} , variation totale de 0° à 50°.			
g.	Polarisation	X, Y, circulaire gauche (LHCP), circulaire droite (RHCP)	X, Y, LHCP, RHCP	X, Y, LHCP, RHCP	
h.	Résolution en fréquence (kHz)	1	1	1	
i.	Dynamique (dB)	≥ 60	≥ 60	≥ 60	
j.	Antenne	Diamètre de la parabole (m)	≥ 9 m	≥ 9 m	≥ 4,5 m
		Précision des pointages (degrés)	0,15-0,04	0,02-0,017	0,025-0,02
		Largeur de faisceau (degrés)	1,6-0,5	0,22-0,18	0,27-0,22
		Vitesse de la poursuite pas à pas pour les satellites OSG	0,02-2°/s, orientation manuelle et poursuite automatique pas à pas (en fonction de la longitude et de la latitude de l'antenne)		
		Couverture pour les satellites OSG (degrés)	EL: de 0 à 90, AZ: ± 60		
		Couverture pour les satellites non OSG (degrés)	EL: de 0 à 85, AZ: ± 270 (couverture totale en azimut: 360), stockage à 90		

NOTE 1 – Les gammes de fréquences indiquées dans ce Tableau et au § 5.1, telles que les bandes L, S et C, ne sont pas définies dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, mais elles sont largement utilisées au sein de la communauté des communications par satellite. On peut trouver, en fonction de la source de référence, des valeurs légèrement différentes.

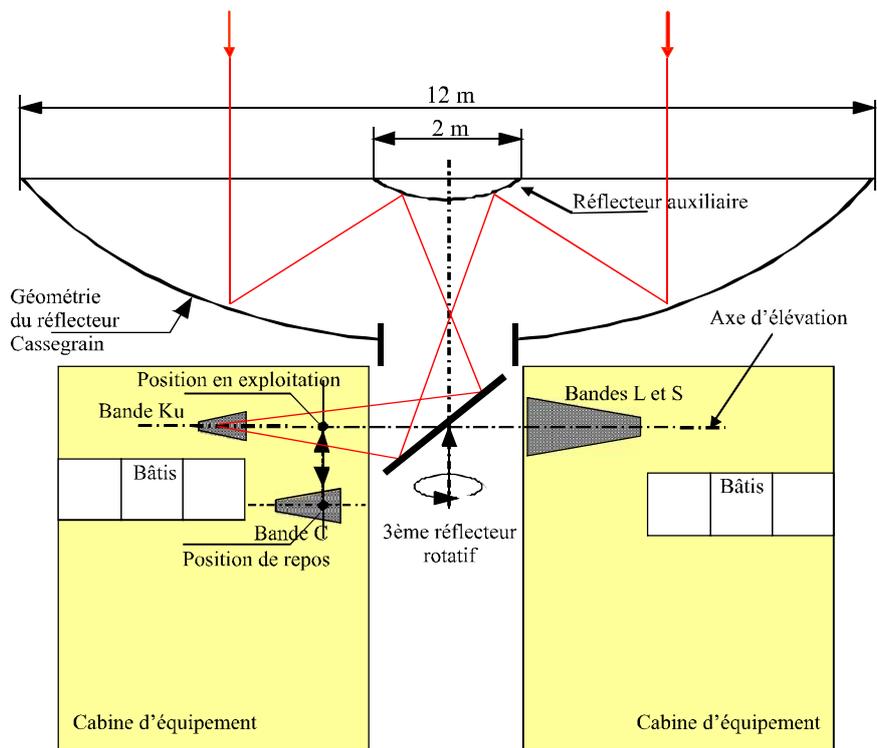
NOTE 2 – Pour prendre en compte la mesure des émissions hors bande, il convient d'élargir les gammes de fréquences commerciales figurant dans la liste (voir a.). Les émissions terrestres de forte puissance doivent être bloquées par des filtres.

5.1.6.1.2 Equipements de réception

Le système à alimentation périscopique présente l'avantage que le faisceau peut être dirigé vers différents emplacements tout en maintenant un affaiblissement d'insertion faible. L'alimentation peut être logée dans des cabines d'équipement, ce qui laisse suffisamment d'espace pour effectuer l'installation et la maintenance des équipements et de la climatisation. Les systèmes d'alimentation des antennes utilisés pour le contrôle des satellites sont assez spécifiques, étant donné que ces antennes sont utilisées pour la réception uniquement et qu'elles couvrent, en règle générale, une large gamme de fréquences (voir Figure 5.1-16 à 5.1-23).

FIGURE 5.1-16

Exemple d'un schéma d'antenne avec alimentations séparées, alimentation mobile et réflecteur de sélection pour 3 bandes de fréquences dans une antenne de 12 m à alimentation périscopique



Spec-5.1-16

FIGURE 5.1-17

Exemple d'alimentations fixes avec réflecteurs de sélection mobiles pour 5 bandes de fréquences dans une antenne de 12 m

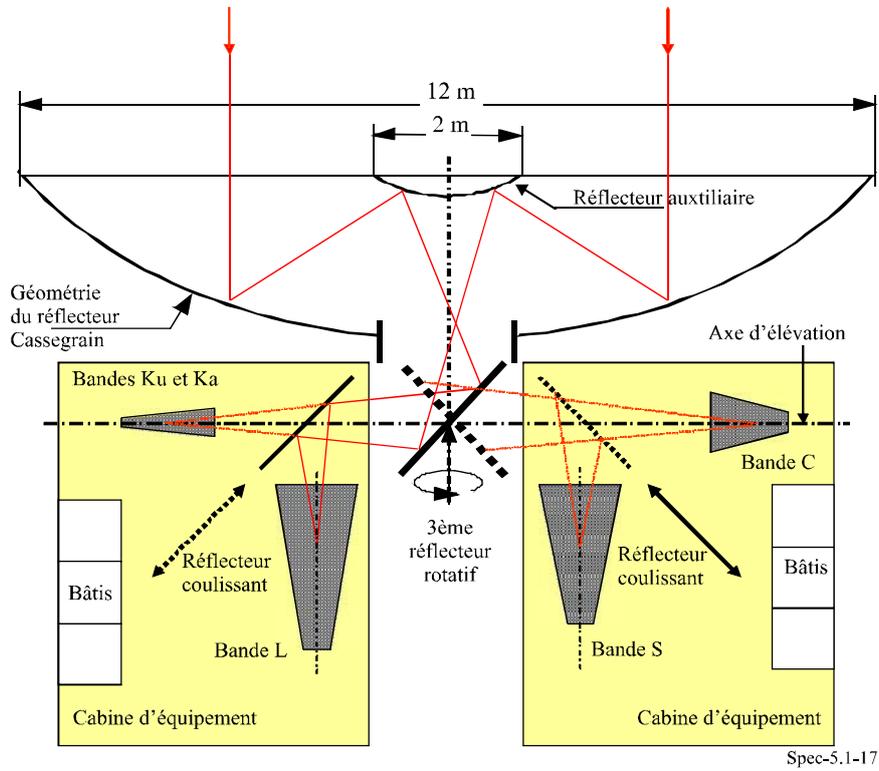
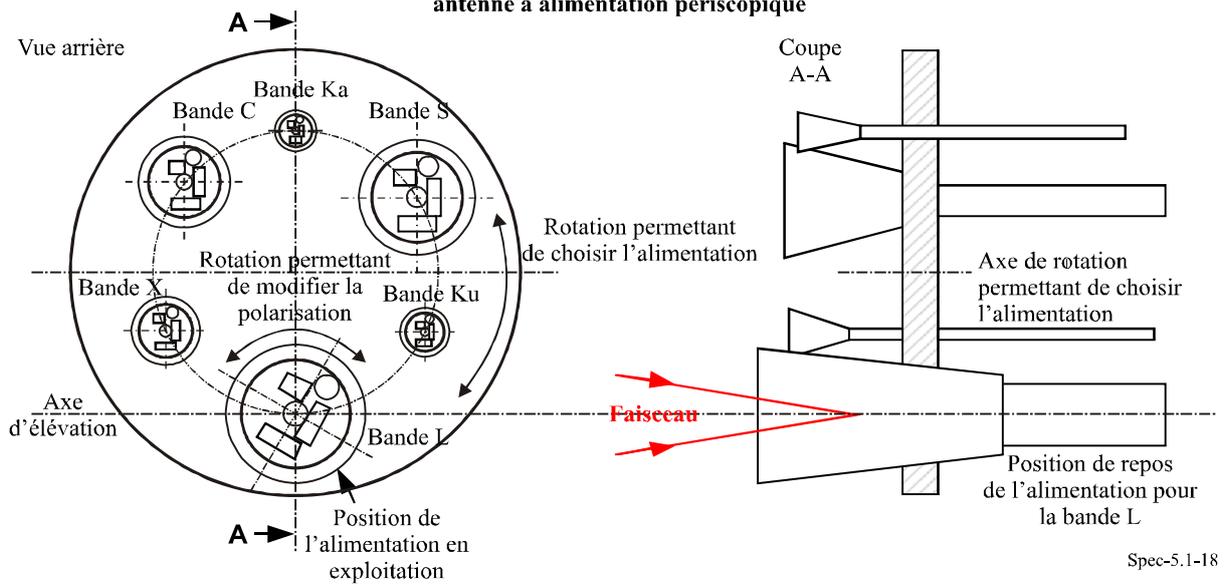


FIGURE 5.1-18

Exemple d'un système revolver multi-alimentation avec 6 alimentations pour une antenne à alimentation périscopique



Exemple: Système revolver multi-alimentation avec 8 sources d'alimentation pour une antenne à alimentation au foyer principal

Gamme de fréquences: 1-26,5 GHz sans trou de fréquence.

Les sources d'alimentation 1 à 6 (gamme de fréquences 1-12,75 GHz) sont des doublets croisés avec cavité.

Les sources d'alimentation 7 et 8 (gamme de fréquences 12,5-26,5 GHz) sont des antennes à cornet.

Dimension du boîtier externe: environ 700 mm × 700 mm × 500 mm [$L \times P \times H$].

FIGURE 5.1-19

Multi-alimentation montée au foyer principal



Spec-5.1-19

FIGURE 5.1-20

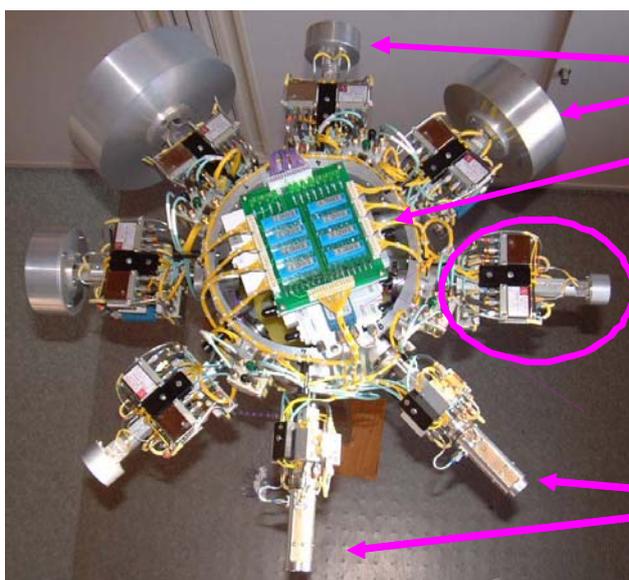
Multi-alimentation dans le boîtier externe ouvert



Spec-5.1-20

FIGURE 5.1-21

Source d'alimentation sans boîtier externe montée autour du sélecteur d'alimentation



Antenne doublet à cavité

Montage central avec sélecteur d'alimentation

Unité d'alimentation complète avec antenne doublet, AFB, polariseur, commutation de signal et ajustement de l'angle de polarisation

Antennes à cornet

Spec-5.1-21

Pour la polarisation linéaire (PL) et circulaire (PC) ainsi que l'ajustement de l'angle de polarisation de $\pm 95^\circ$, toutes les sources d'alimentation reposent sur une technique coaxiale.

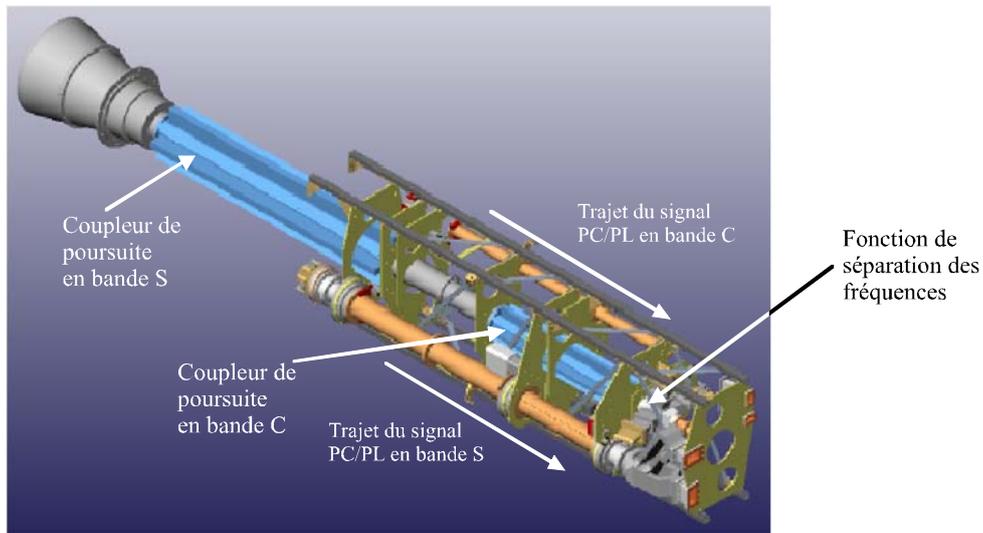
FIGURE 5.1-22

Exemple d'une combinaison de 3 bandes de fréquences dans une antenne de 12 m

Système d'alimentation pour des configurations d'antenne Cassegrain de 11 m et plus.
Commutation PC/PL, ajustement de la polarisation PL indépendant et poursuite mono-impulsion dans les deux bandes.

Bande S: 2,1-2,7 GHz

Bande C: 3,4-4,8 GHz



Spec-5.1-22

FIGURE 5.1-23

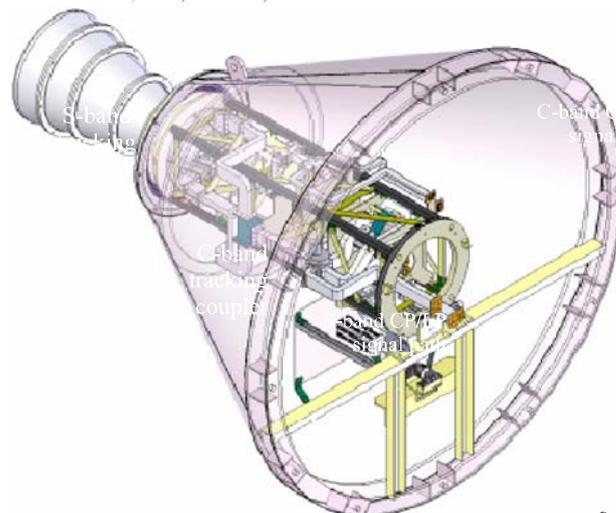
Exemple d'alimentation avec 2 bandes de fréquences très proches

Système d'alimentation pour des configurations d'antenne Cassegrain de 9 m et plus.

Bande C: 3,4-4,2 GHz, CP/LP

Bande X: 7,25-8,4 GHz, CP

Bande Ku: 10,9-12,75 GHz, CP/LP



Spec-5.1-23

Équipement de réception

Les différents éléments de l'équipement de réception figurent au Tableau 5.1-8:

TABLEAU 5.1-8

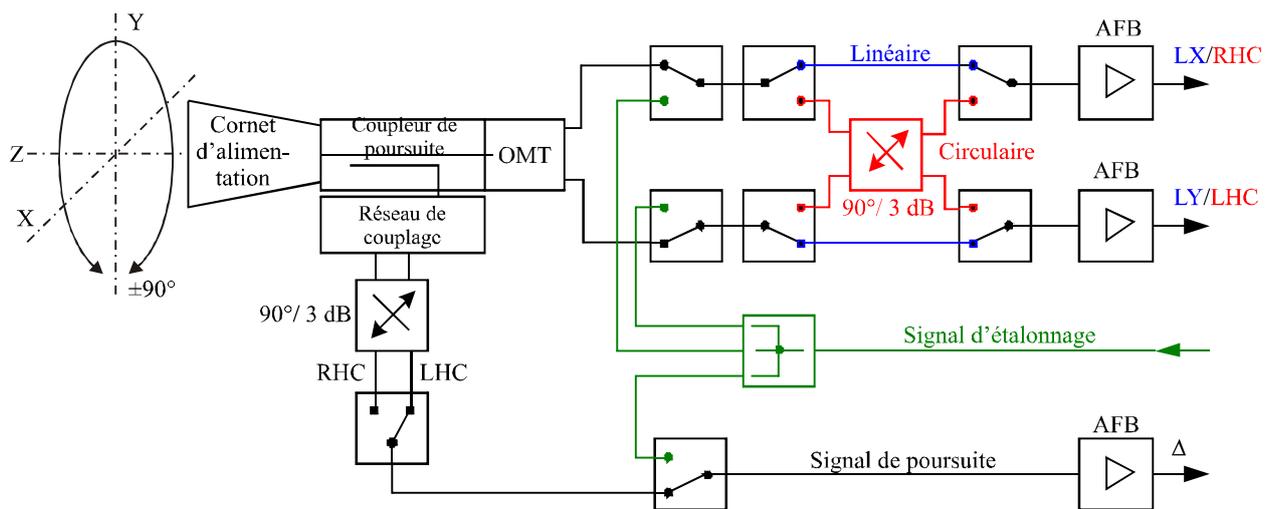
Équipement de réception d'un système d'antenne

Alimentation	Antenne à cornet, antenne doublet ou antenne à doublets croisés et réseau de couplage
Coupleur de poursuite	Couplage externe du mode TE ₂₁ pour la poursuite par antenne mono-impulsion
Ajustement de la polarisation	Système de rotation pour l'ajustement de l'angle de polarisation
Duplexeur de polarisation (OMT)	Séparation des plans de polarisation X et Y en deux canaux
AFB	Premier amplificateur avec facteur de bruit aussi petit que possible
Polariseur	Combine les canaux X et Y en RHCP et LHCP en cas de polarisation circulaire
Convertisseur-abaisseur	Convertit le signal RF en une FI large bande et/ou une FI bande étroite, par exemple FI 70 MHz
Commutation et postamplification	Commute les trajets des différents signaux et amplifie la FI pour transmission au bâtiment principal

Ces différents composants peuvent être, en fonction du type de l'antenne, physiquement distincts ou non.

FIGURE 5.1-24

Exemple de schéma de système d'alimentation avec coupleur de poursuite et polariseur



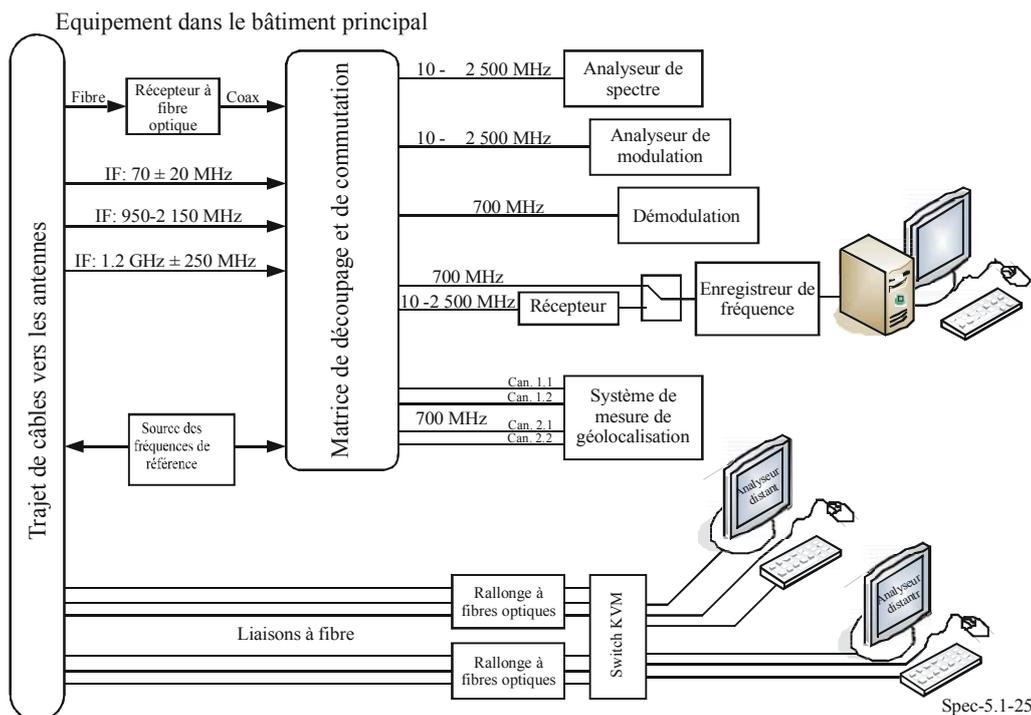
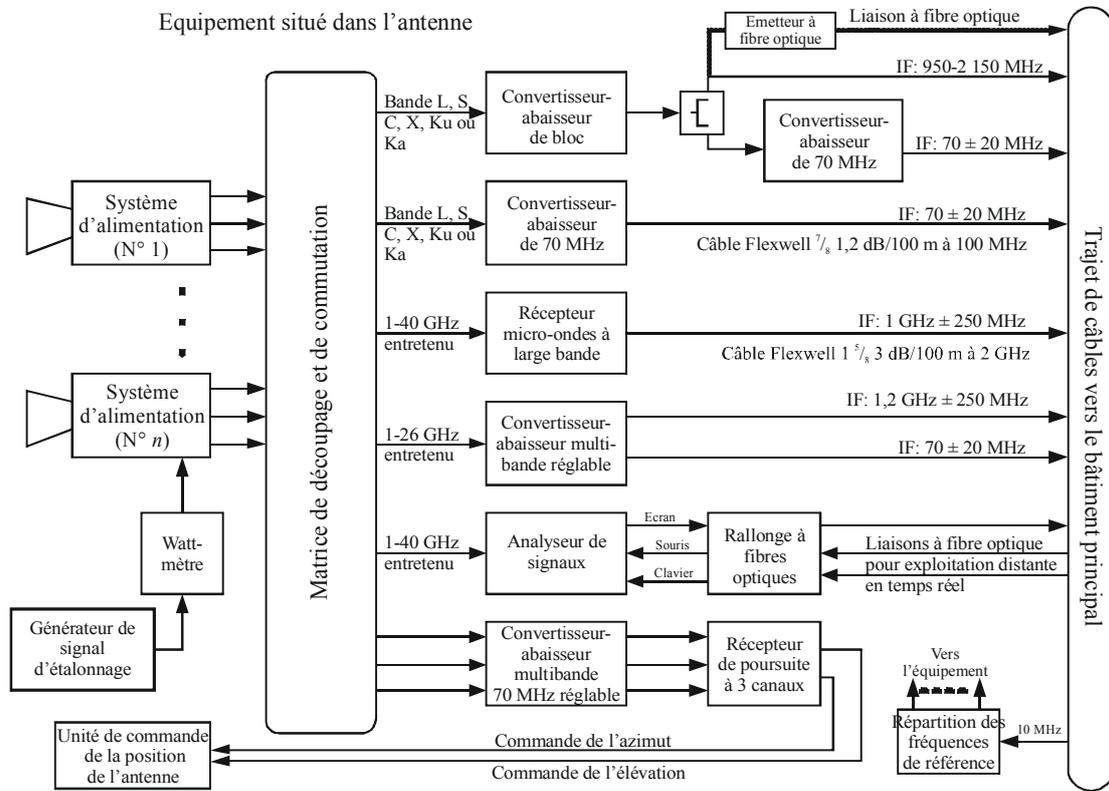
Spec-5.1-24

5.1.6.1.3 Equipements de contrôle

Les schémas suivants (Figure 5.1-25 par exemple) sont des exemples d'intégration de l'équipement de contrôle.

FIGURE 5.1-25

Intégration de l'équipement de contrôle

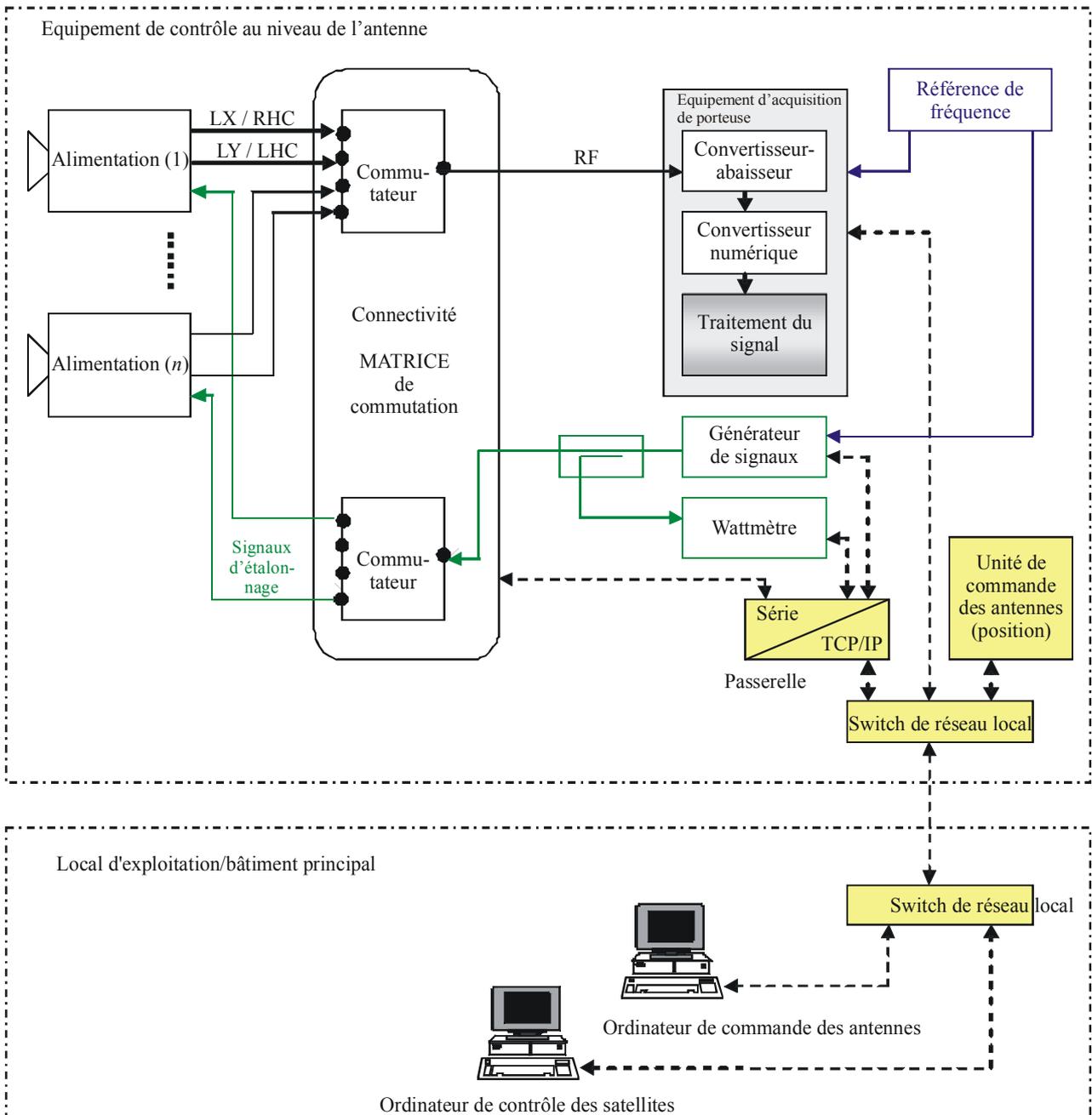


Système automatisé de contrôle des satellites

La Figure 5.1-26 présente un système de contrôle automatisé pour l'acquisition de porteuses. L'architecture matérielle de l'équipement d'acquisition de porteuses pour le contrôle de satellite repose sur un système d'étalonnage. Les points d'injection sont également présentés. Le wattmètre commande le signal d'étalonnage issu du générateur de signal.

FIGURE 5.1-26

Exemple d'un équipement automatisé de contrôle des satellites



Les fonctions de l'équipement d'acquisition de porteuses sont:

- l'acquisition des bandes de fréquences des satellites dans les bandes L, S, C, Ku et Ka;
- la détection de toutes les porteuses supérieures au bruit de fond (en règle générale, de 6 à 10 dB au-dessus du bruit de fond);
- la détermination des paramètres RF de chaque porteuse;
- la classification de l'ensemble des porteuses, y compris tous les paramètres numériques utilisés par le modulateur ainsi que la norme employée.

L'équipement d'acquisition de porteuses doit être en mesure d'analyser et de classer les porteuses jusqu'à la largeur de bande 80 MHz, ce qui couvre la plupart des répéteurs du secteur civil.

Lorsque le trafic satellitaire est connu, l'équipement d'acquisition de porteuses détecte les porteuses indésirables et, facultativement, localise les émetteurs par les méthodes FDOA et TDOA.

Dans le cas du contrôle automatisé des satellites, il convient d'effectuer les mesures suivantes:

- Mesures RF:
 - Puissance de la porteuse au niveau de l'équipement
 - p.i.r.e. de la porteuse au niveau du satellite
 - Porteuse C/N_0
 - Fréquence de la porteuse obtenue par les méthodes suivantes: méthode du barycentre, méthode par récupération, méthode de forme de porteuse et méthode de recherche de pics
 - Largeur de bande de la porteuse: méthode x dB, méthode $\beta\%$ de la puissance totale, calcul à partir du débit des symboles
 - Observations du spectre et outils d'analyse (marqueurs, zoom, spectrogramme, sélecteurs)
 - p.i.r.e. du répéteur au niveau du satellite.
- Mesures numériques:
 - Spécifications de la porteuse
 - Type de modulation
 - Débit binaire (débit d'émission)
 - Taux de correction d'erreur directe
 - Taux de Reed Solomon
 - Norme utilisée
 - Schéma de démodulation de la porteuse.
- Détection de la porteuse fondée sur la détection de densité de puissance (en règle générale, de 6 à 10 dB au-dessus du bruit de fond):
 - Actualisation de la base de données
 - Détection de la porteuse à l'intérieur des valeurs définies (le coefficient de réjection doit être supérieur à 13 dB).
- Observations du spectre, observations du spectre virtuel par simulation du G/T au niveau de l'utilisateur final.
- Spectrogramme rapide afin de visualiser les dérives rapides d'intervalle (par exemple, accès AMRT multifréquence).
- Paramètres orbitaux (précision de la position orbitale d'au moins $\pm 0,1^\circ$).
- Nécessité de faire un étalonnage pour déterminer le gain de la chaîne de réception.

Le logiciel de l'ordinateur de contrôle des satellites doit pouvoir effectuer des mesures interactives et des mesures automatiques.

Les mesures interactives permettent à l'opérateur de faire une analyse rapide des signaux. Parmi les mesures et opérations interactives, on peut citer: l'observation de multiples bandes dans de multiples formats, les signaux de transfert pour les mesures de porteuse, la commande de l'analyseur de spectre et, éventuellement, du récepteur, de l'enregistreur, de l'imprimante et du traceur.

Les mesures automatiques devraient être activées par des événements (voir Note 1) ou programmées en tâche de fond sans que la présence d'un opérateur soit nécessaire. Un ordonnanceur de tâches devrait permettre de coordonner la présence des signaux, les mesures de porteuse, le degré d'occupation du spectre et les mesures statistiques.

NOTE 1 – Par exemple, on peut lancer l'enregistrement automatique d'un signal cible et d'un signal de référence immédiatement après la détection d'un signal indésirable. Cet enregistrement permet de faciliter le travail ultérieur du module de géolocalisation.

La Figure 5.1-27 présente un exemple de copie d'écran de la station de contrôle où figurent le spectre et des informations sur le spectrogramme.

FIGURE 5.1-27

Exemple de copie d'écran montrant le spectre affiché par l'ordinateur effectuant le contrôle du satellite



Spec-5.1-27

5.1.6.1.4 Equipements de commande

Modes opératoires d'un système de commande d'antennes

Pour le contrôle des émissions radioélectriques spatiales, il faut pouvoir commander les antennes de façon simple et efficace. Il convient de prévoir un grand nombre de modes opératoires afin de permettre un pointage efficace des antennes vers des constellations de satellites difficiles à localiser. Le Tableau 5.1-9 présente les fonctions de commande d'antenne les plus courantes.

TABLEAU 5.1-9

Modes opératoires d'un système de commande d'antennes

Modes	Description	Remarque
PRESET	Mouvement vers une position prédéfinie Entrée: valeurs Az et El	
GEO PRESET	Mouvement vers une position prédéfinie Entrée: position du satellite, par exemple E19,2°	Pointe l'antenne vers une position sur l'orbite OSG sans que l'utilisateur ne calcule les valeurs Az et El
POSITION	Déplacement selon un angle défini par l'utilisateur autour de la position courante de l'antenne	Permet de déplacer manuellement l'antenne en azimut et en élévation à l'aide de quatre touches-flèches ou de boutons
VITESSE	Déplacement selon une vitesse constante définie par l'utilisateur	Principalement pour l'étalonnage et les mesures de test
POURSUITE PROGRAMMÉE	Poursuite d'un objet le long d'un trajet prédéfini avec enregistrement de l'azimut, de l'élévation, des données et du temps	
POURSUITE TLE	Poursuite d'un objet le long d'un trajet prédéfini avec des jeux de données orbitales TLE de NORAD	
POURSUITE ETOILE	Poursuite de cibles astronomiques	Option pour l'étalonnage et les mesures de test
POURSUITE AUTO	Poursuite d'un objet au moyen de signaux d'erreur de poursuite (poursuite mono-impulsion)	Nécessite un coupleur de poursuite mono-impulsion dans le système d'alimentation et un récepteur de poursuite mono-impulsion
POURSUITE PAS À PAS	Poursuite d'un objet au moyen d'un récepteur de poursuite pas à pas	Nécessite un récepteur de poursuite pas à pas, mais sans composant additionnel au niveau du système d'alimentation
POURSUITE AVEC PREDICTION D'ORBITE	Poursuite pas à pas intelligente	Option permettant d'améliorer la précision de pointage de la poursuite pas à pas
POURSUITE AVEC MEMOIRE	Poursuite utilisant les dernières données stockées de la position du satellite	
BALAYAGE SECTORIEL	Un secteur défini par l'utilisateur est balayé horizontalement/verticalement	Pratique pour trouver un satellite, par exemple un satellite de haute inclinaison
SPIRALE DE RECHERCHE	Spirale pulsée autour de la dernière position réelle	Pratique pour trouver un satellite, par exemple un satellite de haute inclinaison
GEOSYNC	Pointage vers une orbite géosynchrone prédéfinie et déplacement sur l'arc OSG	Déplacement manuel à l'aide de boutons est/ouest le long de l'arc OSG

Système de contrôle et de commande

Le système de contrôle et de commande (M&C, *monitoring and control*) est un système informatique central destiné à la commande de tous les équipements de la station de contrôle. Au poste de chaque opérateur, une interface utilisateur graphique (GUI) présente une vue d'ensemble claire et schématique des équipements et de l'état des commutateurs (voir Figure 5.1-28). Afin d'éviter les conflits d'accès à l'équipement, le système doit disposer d'un mode «édition» et d'un mode «verrouillage». Les unités de mesures sont éventuellement spécifiques au système de développement M&C et les critères sont totalement modifiables ou, seulement en mode manuel, reliés au trajet de signal du M&C. Pour un travail efficace, il convient de prévoir deux écrans: l'un pour positionner l'antenne, l'autre pour commander le dispositif.

Les équipements suivants sont commandés et surveillés:

- Système de commande des antennes pour les fonctions de pointage et de recherche.
- Système de poursuite des antennes avec récepteur de poursuite mono-impulsion ou pas à pas.
- Système d'alimentation avec commutation de polarisation et ajustement de l'angle de polarisation.
- Convertisseurs-abaisseurs, filtres et postamplificateurs.
- Toutes les unités de commutation pour la connexion et la répartition des signaux RF et FI.
- Connexion et paramétrage des unités de mesure et d'analyse.
- Lancement du logiciel de mesures automatiques.

FIGURE 5.1-28

Exemple d'interface graphique utilisateur d'un système de contrôle et de commande

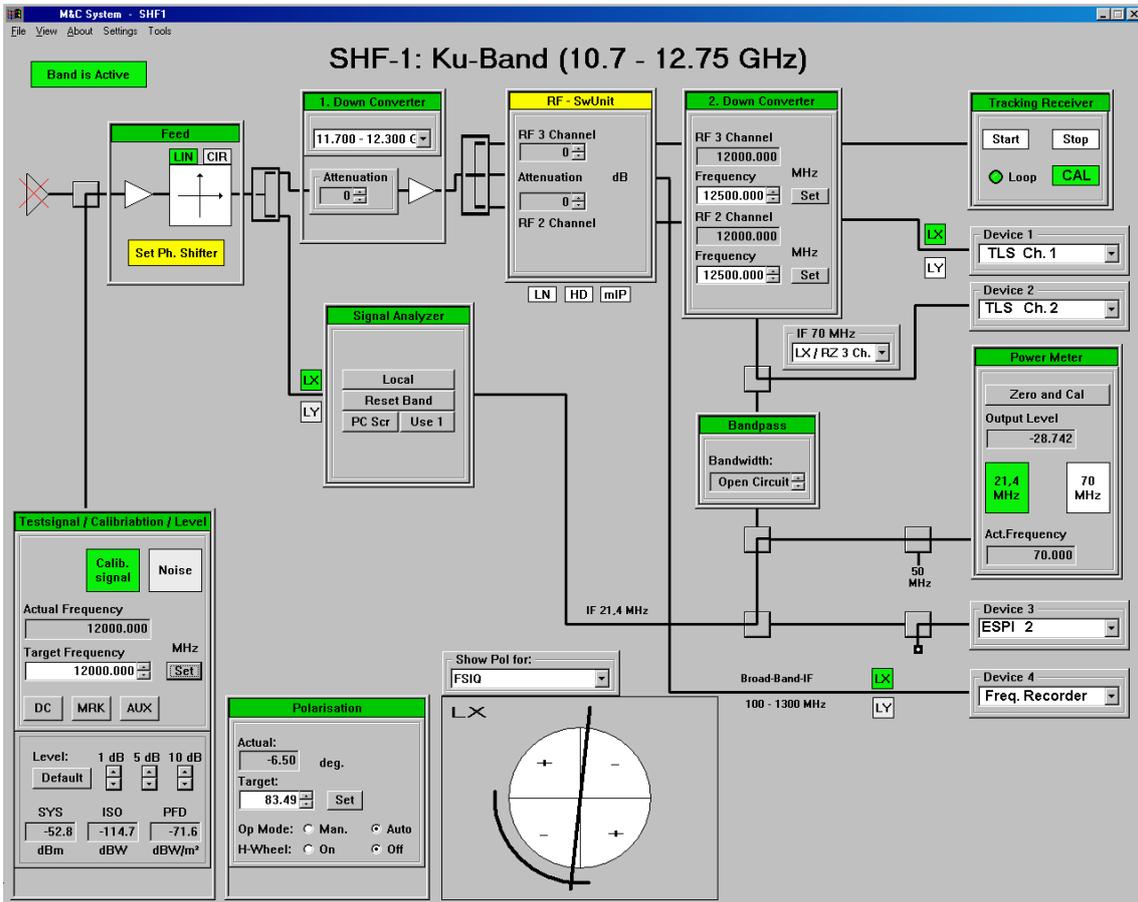


FIGURE 5.1-29
Système de mesure de géolocalisation

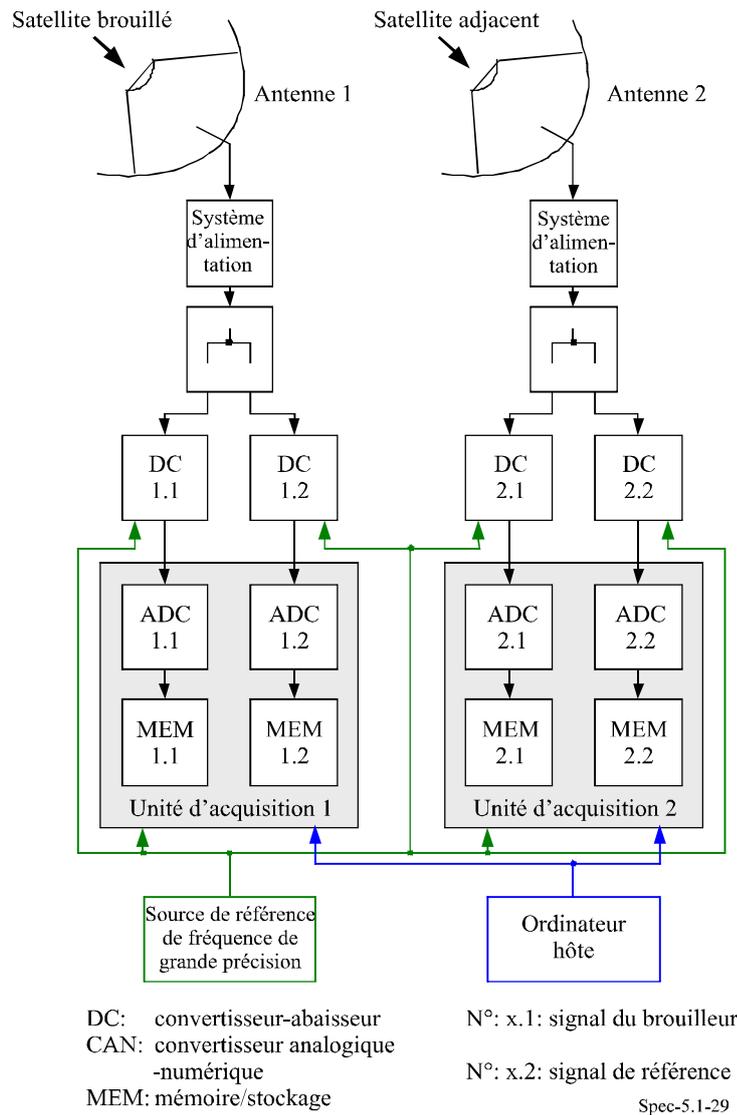
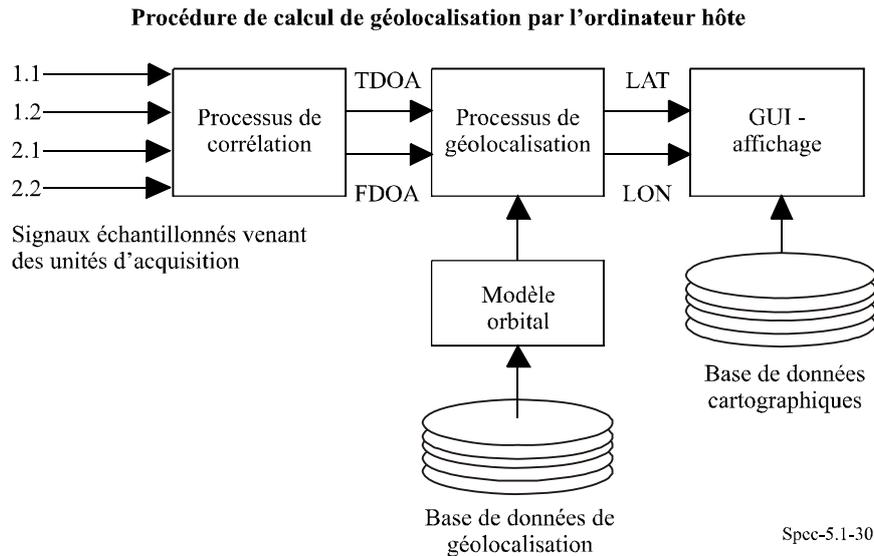


FIGURE 5.1-30



TDOA: différence entre les instants d'arrivée
 FDOA: différence de fréquence à l'arrivée
 LAT: Latitude
 LON: Longitude
 GUI: Interface graphique utilisateur

Notes:

Signaux 1.1 et 1.2 reçus par l'antenne 1 en provenance du satellite brouillé.
 Signaux 2.1 et 2.2 reçus par l'antenne 2 en provenance du satellite adjacent.
 Les signaux 1.1 et 2.1 sont des signaux du brouilleur; les signaux 1.2 et 2.2 sont les signaux de référence.

5.1.6.2 Processus de contrôle des émissions radioélectriques des satellites OSG

Ce qui suit est une description d'un système automatisé de contrôle des émissions radioélectriques des satellites OSG. L'objectif est de minimiser le nombre d'opérateurs nécessaires à la mesure de l'orbite et de la qualité des ondes radioélectriques, et ce par l'utilisation de diverses techniques.

Le système de contrôle automatisé repose sur un programme informatique possédant les fonctions suivantes:

- Commande, dont le but est de fixer la priorité des opérations.
- Enregistrement, dont le but est de programmer les mesures unitaires.
- Détection des erreurs du logiciel du système avec fonction de compte rendu aux opérateurs.
- Recherche de mesure.
- Etalonnage du système et inspection, afin de vérifier si les équipements de contrôle fonctionnent correctement.
- Compte rendu des résultats des mesures aux opérateurs.
- Stockage des satellites enregistrés et des résultats des mesures dans la base de données.

Les opérateurs de la station de contrôle radioélectrique pour les services spatiaux doivent établir le programme de contrôle, de sorte que les tâches de contrôle soient régulièrement effectuées conformément au plan de contrôle.

Au cours de la détection des sources de brouillages préjudiciables, du contrôle des nouveaux satellites et de la mesure du taux d'occupation détaillé du spectre de fréquences, il est possible de recourir simultanément au mode semi-automatique et au mode manuel.

Les éléments inscrits au programme de contrôle incluent notamment la date du contrôle, le mode (automatique ou semi-automatique), le nom du satellite, le nombre de contrôles et la priorité des tâches.

La Figure 5.1-31 présente un exemple du processus séquentiel de contrôle.

FIGURE 5.1-31
Processus séquentiel de contrôle

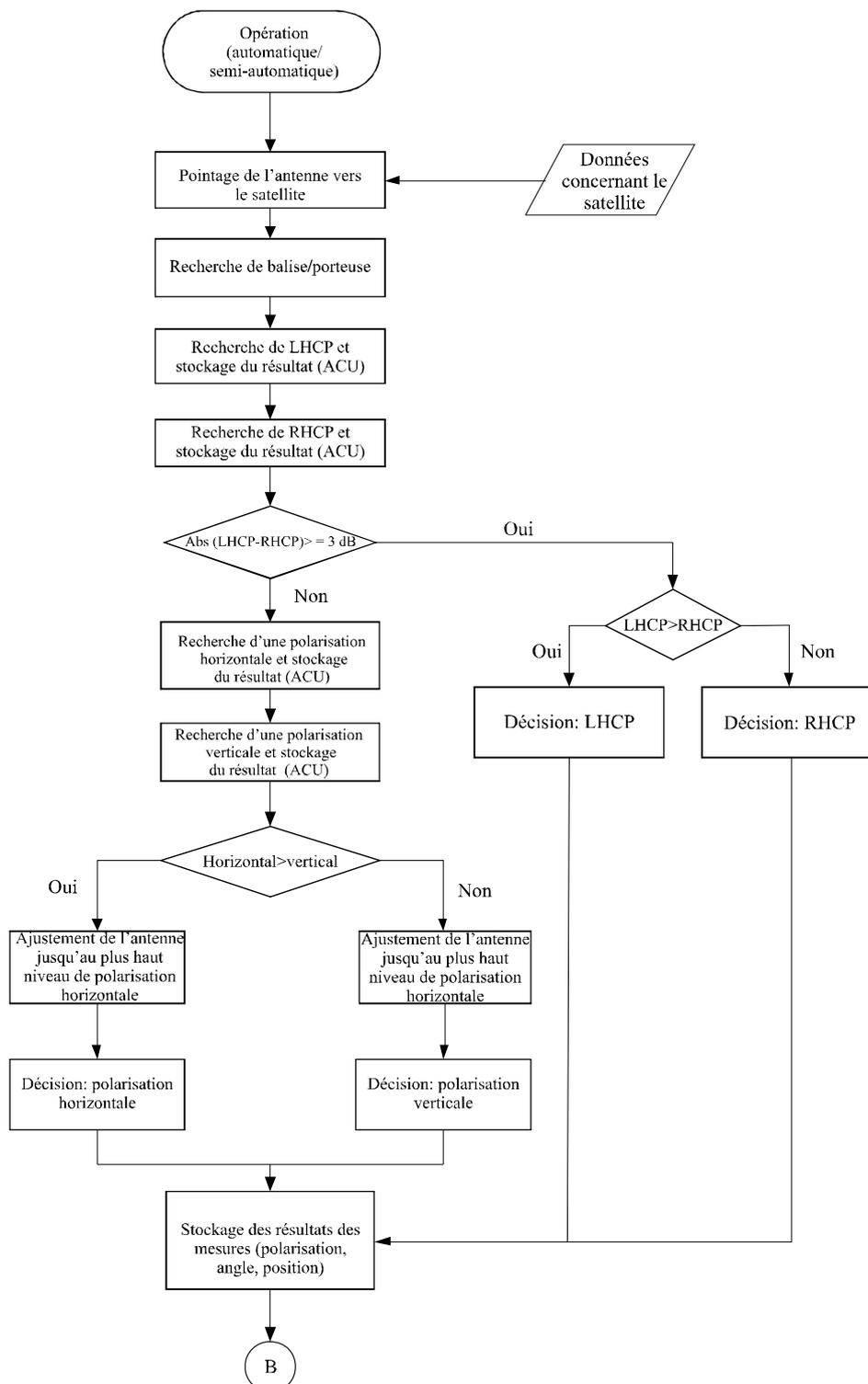
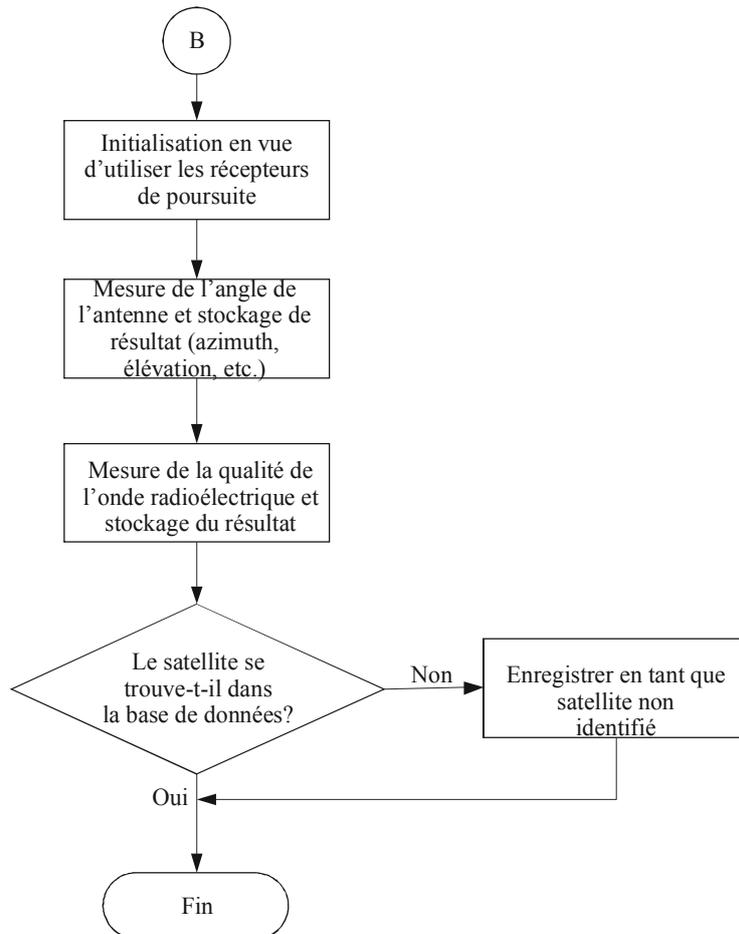


FIGURE 5.1-31 (suite)
Processus séquentiel de contrôle



Spec-5.1-31-cont

Le processus de planification prévoit notamment de mesurer la position orbitale du satellite, la polarisation, la fréquence centrale, la puissance surfacique et la largeur de bande occupée. Il importe que les équipements de la station de contrôle des émissions radioélectriques pour les services spatiaux intègrent les techniques suivantes: poursuite rapide, choix de la polarisation au moyen d'algorithmes de comparaison, repérage des fréquences centrales pour la mesure de la largeur de bande occupée, mesure de la puissance des porteuses, etc.

La polarisation est déterminée en comparant en permanence les mesures en entrée par rapport aux critères de polarisation.

En règle générale, on accorde la préférence à la méthode de poursuite par mono-impulsion, mais d'autres méthodes sont également possibles, telle la poursuite pas à pas.

L'identification des satellites est effectuée en comparant le résultat des mesures avec les informations contenues dans la base de données des satellites.

Pour améliorer la précision et la fiabilité des résultats, il convient de répéter les mesures ainsi que les corrections.

Compte tenu des caractéristiques de propagation aux hautes fréquences et de la faiblesse du signal du satellite reçu sur Terre, les mesures doivent être très fiables. Les stations de contrôle doivent en outre vérifier si le satellite fonctionne conformément aux normes et réglementations techniques qui s'appliquent.

Par ailleurs, les opérateurs enregistrent ou renouvellent le programme opératoire pour toute nouvelle demande de contrôle et toute tâche spéciale. Le stockage des procédures standard souvent utilisées permet de simplifier le processus d'enregistrement.

5.1.6.3 Contrôle précis de la longitude orbitale (radio-interférométrie)

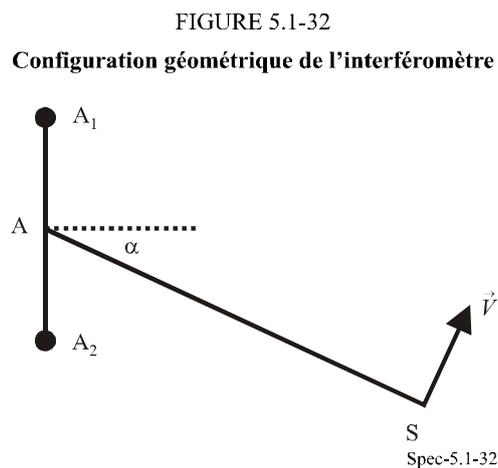
5.1.6.3.1 Introduction

Le contrôle précis des longitudes des satellites prend plus d'importance à mesure que l'orbite géostationnaire accueille un nombre croissant de satellites et donc que sa densité d'occupation augmente. Une des techniques proposées pour ce type de contrôle est la radio-interférométrie, technique sur laquelle reposent certains systèmes actuellement en développement [Kawase, 2005; Kawase, 2007].

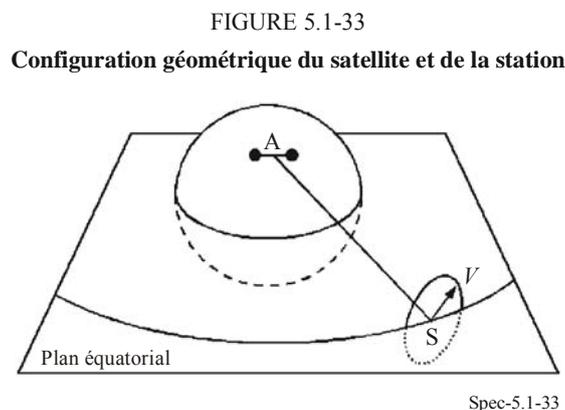
5.1.6.3.2 Principe général

On utilise un interféromètre muni de deux antennes A_1 et A_2 dont la configuration géométrique de base est décrite à la Figure 5.1-32. Les antennes forment une ligne de base A_1A_2 , dont le milieu est le point A . Les signaux du satellite S sont reçus avec un angle d'incidence α .

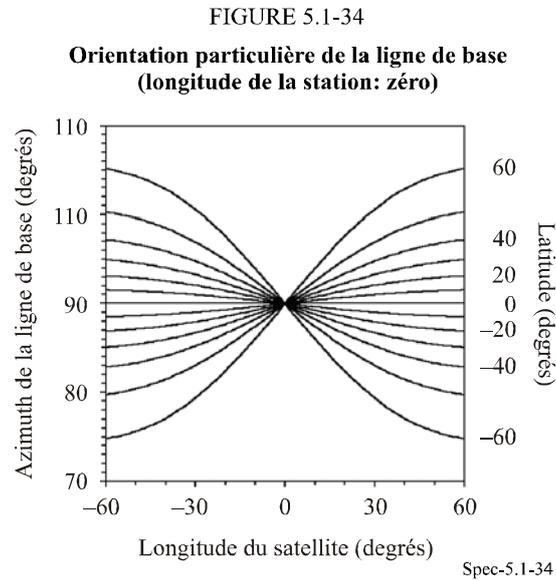
Le déphasage entre A_1 et A_2 est désigné sous le nom de «phase interférométrique». \vec{V} est un vecteur unitaire perpendiculaire à la ligne AS , situé dans le plan contenant A_1 , A_2 et S . Un déplacement du satellite le long de \vec{V} est détecté par l'interféromètre, tandis que les mouvements perpendiculaires à \vec{V} ne le sont pas. Cette détection sélective est à la base du contrôle de longitude.



L'interféromètre est placé dans une station terrienne, comme indiqué à la Figure 5.1-33. La ligne de base est placée horizontalement et son orientation est soumise à une rotation. En conséquence, le vecteur \vec{V} tourne et balaye un disque incliné.

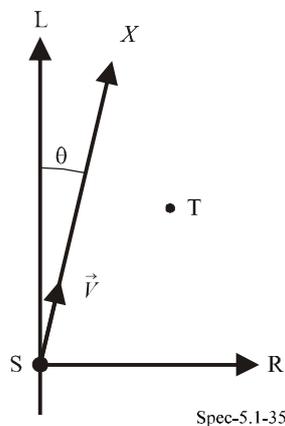


\vec{V} se trouve dans le plan équatorial pour une orientation particulière de la ligne de base, qui est est-ouest (azimut de 90°) si le satellite et la station sont à la même longitude. En règle générale, l'orientation n'est pas est-ouest; elle dépend de la configuration géométrique du satellite et de la station (voir la Figure 5.1-34). Si l'on choisit cette orientation particulière de la ligne de base, l'interféromètre n'est sensible qu'aux mouvements effectués par le satellite dans le plan équatorial.



Supposons que la position stationnaire nominale du satellite soit S, comme indiqué à la Figure 5.1-33. La position réelle T du satellite sera proche de S. Elle est projetée sur le plan équatorial, comme on le voit sur la Figure 5.1-35. La position T est mesurée par rapport à S selon les axes de coordonnées radiales et longitudinales (R et L). Le vecteur \vec{V} définit l'«axe de détection» X. L'axe des X dévie par rapport à l'axe des L d'un angle θ , qui dépend de la configuration géométrique du satellite et de la station.

FIGURE 5.1-35
Axes de coordonnées dans le plan équatorial



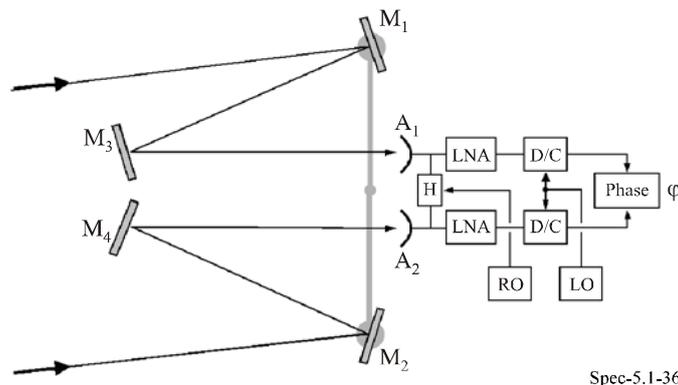
En pratique, l'angle θ est petit. Ainsi, si une station située au Japon contrôle des satellites à des élévations de 10° ou plus, θ est inférieur à 7° . De ce fait, si l'on ne tient pas compte des composantes axiales R du mouvement du satellite et si l'on considère que l'axe des $X/\cos \theta$ coïncide avec l'axe des L, on obtient un contrôle précis de la longitude. Les erreurs de contrôle sont de l'ordre de $0,0006^\circ$ pour la longitude moyenne si le satellite reste dans un créneau orbital pendant quelques jours au moins et l'erreur relative d'excentricité est de l'ordre de 0,2 %.

5.1.6.3.3 Installation de l'interféromètre

Comme indiqué aux Figure 5.1-36 et 5.1-37, l'interféromètre utilise des miroirs plans pour établir la ligne de base. Les miroirs M_1 et M_3 réfléchissent une onde incidente dans les bandes de fréquences de 11 GHz avant de la diriger vers l'antenne A_1 , et il en est de même pour M_2 , M_4 et A_2 . Les retards de phase sur les trajets réfléchis sont calculés géométriquement et supprimés de la phase interférométrique, ce qui permet à M_1M_2 de constituer la ligne de base de l'interféromètre. La ligne de base doit être réorientée pour le contrôle des satellites en différentes positions orbitales. Pour ce faire, on peut modifier la position de M_1 et M_2 et pointer à nouveau les miroirs, sans déplacer les composantes et câbles hyperfréquences pour lesquels la phase est un facteur critique. Il est possible de déplacer M_1 et M_2 car ils sont montés sur un bras rotatif. On utilise un oscillateur local (LO) commun pour la connexion de phase interférométrique et un oscillateur de référence (RO) commun pour compenser les variations de délais au niveau des équipements. Le fait de placer les antennes côte à côte permet aux oscillateurs LO et RO de diffuser leurs signaux communs sur des câbles de courte longueur, ce qui assure la stabilité des mesures de phase. Les miroirs ont une surface de 2 m^2 , les antennes ont un diamètre de 1,8 m et la longueur de la ligne de base (bras rotatif) est de 13 m.

FIGURE 5.1-36

Schéma de l'interféromètre



Spec-5.1-36

La phase interférométrique mesurée ϕ (rad) est convertie en la longitude l (degrés) du satellite à partir de la longitude nominale comme suit:

$$M = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi - \phi_S - \phi_C) \frac{r_S}{B \cos \alpha \cos \theta} \tag{5.1-14}$$

$$l = \frac{180}{\pi} \frac{M}{R_S} \tag{5.1-15}$$

où:

R_S : rayon orbital nominal, $42\,165 \times 10^3$ (m)

λ : longueur d'onde du signal reçu (m)

r_S : distance AS (m)

- B : longueur de la ligne de base A_1A_2 (m)
- α : angle d'incidence
- θ : déviation de l'axe des X
- φ_S : phase interférométrique pour le satellite en position nominale (rad)
- φ_C : correction de la phase interférométrique (rad)
- l : longitude du satellite (degrés) (une valeur positive indique une longitude est, une valeur négative une longitude ouest)
- φ : phase interférométrique mesurée (rad).

FIGURE 5.1-37

Site d'interférométrie au Japon

Spec-5.1-37

La constante φ_S est calculée à partir de la configuration géométrique du satellite et de l'interféromètre. De petites erreurs dans le positionnement des éléments A_1 , A_2 , M_3 et M_4 peuvent entraîner une erreur de phase quasiment constante, mais celle-ci est corrigée par φ_C .

Une ambiguïté sur les phases de 360° dans la phase mesurée entraîne une ambiguïté de $0,1^\circ$ dans la longitude du satellite. Pour lever cette ambiguïté et déterminer la constante de correction φ_C , on procède comme suit: le bras qui constitue la ligne de base subit une rotation autour de son centre fixe C sur un tour; la phase $\varphi - \varphi_S$ varie en conséquence, comme le montre la Figure 5.1-38, avec des sauts de phase de 360° à 0° . Ces sauts sont reconnectés, comme indiqué à la Figure 5.1-39.

FIGURE 5.1-38
Variations de phase avec la rotation du bras

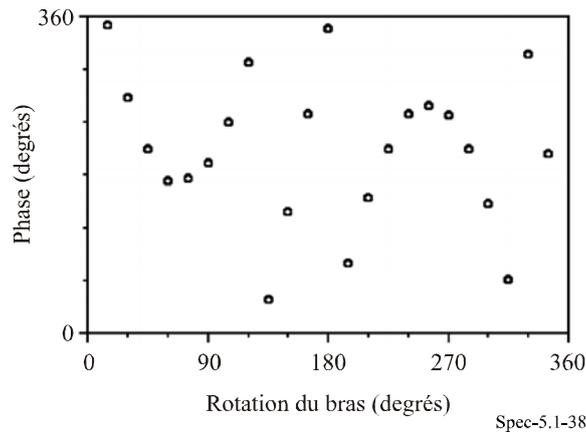
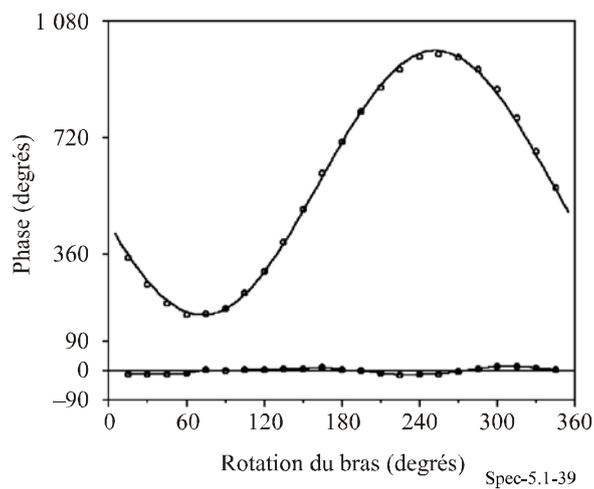


FIGURE 5.1-39
Reconnexion de phase et ajustement du modèle



L'angle de phase $\varphi - \varphi_S$ est modélisé en fonction de l'angle de rotation du bras; l'azimut du satellite, l'élévation du satellite et φ_C sont inclus en tant que paramètres. La fonction de modélisation est ajustée à la phase reconnectée, comme on le voit à la Figure 5.1-39 (courbe à ligne continue). L'azimut et l'élévation ainsi estimés permettent de lever l'ambiguïté et de déterminer la phase de correction φ_C . Il faut faire subir au bras représentant la ligne de base une rotation sur un tour avant de contrôler un satellite inconnu.

5.1.6.3.4 Exemple de contrôle

La Figure 5.1-40 donne un exemple de contrôle de longitude. L'interféromètre est étalonné en mode de poursuite optique et à partir de déterminations d'orbite. La Figure 5.1-41 correspond aux périodes de longue durée et une manœuvre de maintien en position est-ouest a lieu au point marqué «*». On détermine ainsi avec précision le taux d'occupation de la longitude du satellite. Si deux satellites opèrent à proximité l'un de l'autre, leurs longitudes peuvent être contrôlées séparément. Ainsi, par soustraction, il est possible de tracer leur différence de longitude, comme on le voit à la Figure 5.1-42. Le contrôle de la différence supprime les fluctuations atmosphériques communes aux satellites très proches l'un de l'autre et, ainsi, le bruit associé aux données à la Figure 5.1-42 est inférieur à celui de la Figure 5.1-41. Ce procédé est utile pour obtenir un contrôle précis de la longitude pour des satellites opérant à proximité l'un de l'autre.

FIGURE 5.1-40

Contrôle de longitude, interféromètre (-) et mode optique (o), satellite situé à 144° à l'est

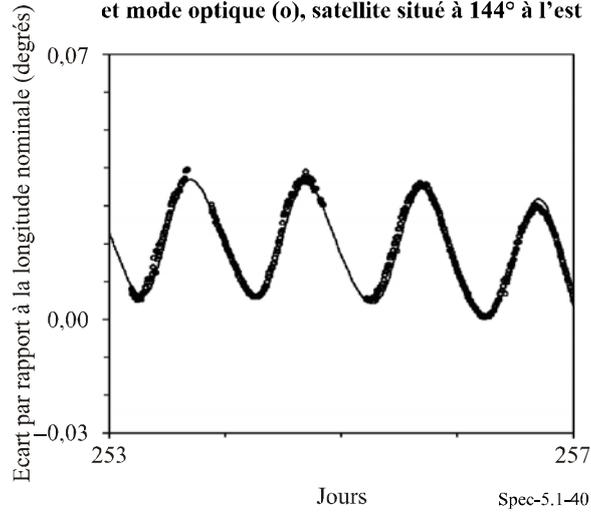


FIGURE 5.1-41

Correction est-ouest pendant le contrôle, satellite situé à 124° à l'est

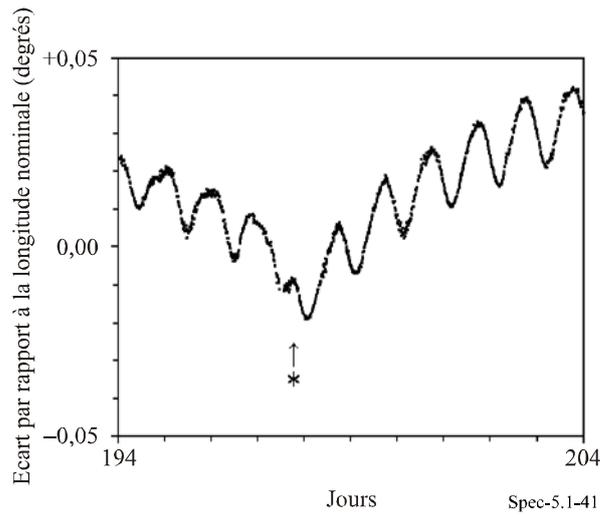
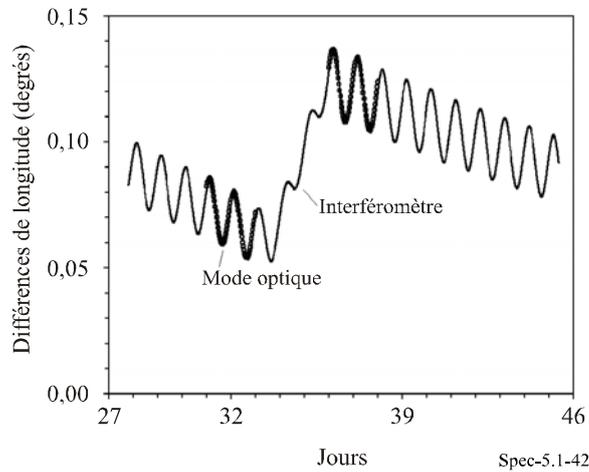


FIGURE 5.1-42

Contrôle des différences de longitude entre deux satellites situés à 110° à l'est



5.1.6.3.5 Résumé

La radio-interférométrie peut être spécifiquement utilisée pour contrôler les longitudes des satellites géostationnaires. Des antennes à faible ouverture sont suffisantes et le recours à des miroirs mobiles assure la stabilité des mesures de phase. Cette méthode de contrôle est particulièrement utile lorsque les satellites opèrent à proximité l'un de l'autre en orbite géostationnaire.

5.1.7 Exemples de résultats fournis par le contrôle des émissions

5.1.7.1 Enregistrement des bandes de fréquences en ondes métriques (VHF)

Les systèmes d'enregistrement du spectre radioélectrique se prêtent particulièrement bien au contrôle, via une antenne équidirective, des bandes de fréquences du point de vue de l'occupation par les émissions provenant de stations spatiales sur orbite basse, aux fréquences inférieures à 1 000 MHz.

La structure du schéma d'occupation (courbe Doppler) dépend des paramètres orbitaux du satellite; elle est de qualité «empreinte digitale». On peut observer des écarts dans la fréquence de réception, mais aussi dans la période de révolution ($PERIOD_{raw}$), définie comme la moyenne de plusieurs périodes consécutives, et dans les instants de réception prévus. Pour déterminer la période de révolution avec une bonne précision ($PERIOD_{fine}$), il est recommandé d'appliquer une méthode par itération, en utilisant des enregistrements effectués sur plusieurs jours, méthode basée sur les équations suivantes:

$$PERIOD_{raw} = T_2 - T_1 \quad (5.1-15)$$

$$PERIOD_{fine} = (T_x - T_1)/n \quad (5.1-16)$$

T_x est le point central de la fenêtre de réception un jour ou plusieurs jours plus tard. Dans l'équation (5.1-16), le diviseur n est un nombre fictif de révolutions. On le modifie jusqu'à obtenir la divergence minimale entre le résultat souhaité pour $PERIOD_{fine}$ et $PERIOD_{raw}$. En procédant ainsi, on peut réduire à quelques dixièmes de minute, après une période de 24 h seulement, l'erreur de mesure sur la durée d'une révolution. Cette durée de révolution et les caractéristiques de la séquence d'enregistrement sont des données fiables pour l'identification d'un satellite.

Une autre méthode consiste à utiliser une grille temporelle ajustable, que l'on superpose au spectrogramme des émissions satellitaires enregistrées sur une période de deux jours ou plus. La correspondance des graduations temporelles et des émissions satellitaires permet de trouver $PERIOD_{raw}$. Dans l'exemple présenté en Figure 5.1-43, $PERIOD_{raw} = 112$ min.

Pour déterminer la période exacte, il est nécessaire, dans un second temps, de faire une recherche dans la base de données de la NASA.

L'opération consiste à rechercher les satellites dont la période de révolution est proche du résultat trouvé, soit 112 min. La Figure 5.1-44 montre la base de données de la NASA-SSR, dans laquelle on a encadré les satellites correspondants. Il faut ensuite calculer, grâce aux TLE (*two-line elements*) associés, la durée de visibilité de ces satellites au niveau de la station de contrôle. Le système d'enregistrement des fréquences peut alors afficher ces fenêtres de visibilité en superposition avec le spectrogramme des émissions satellitaires reçues.

Si les fenêtres de visibilité correspondent à toutes les émissions satellitaires enregistrées, le satellite est identifié. La Figure 5.1-45 montre les fenêtres de visibilité pour le satellite S80/T de période de révolution 111,9 min. Une fois les paramètres orbitaux connus, il est possible d'utiliser une antenne directive pour poursuivre le satellite afin d'effectuer des mesures complémentaires.

FIGURE 5.1-43

Enregistrement des taux d'occupation des fréquences, estimation de la durée de révolution

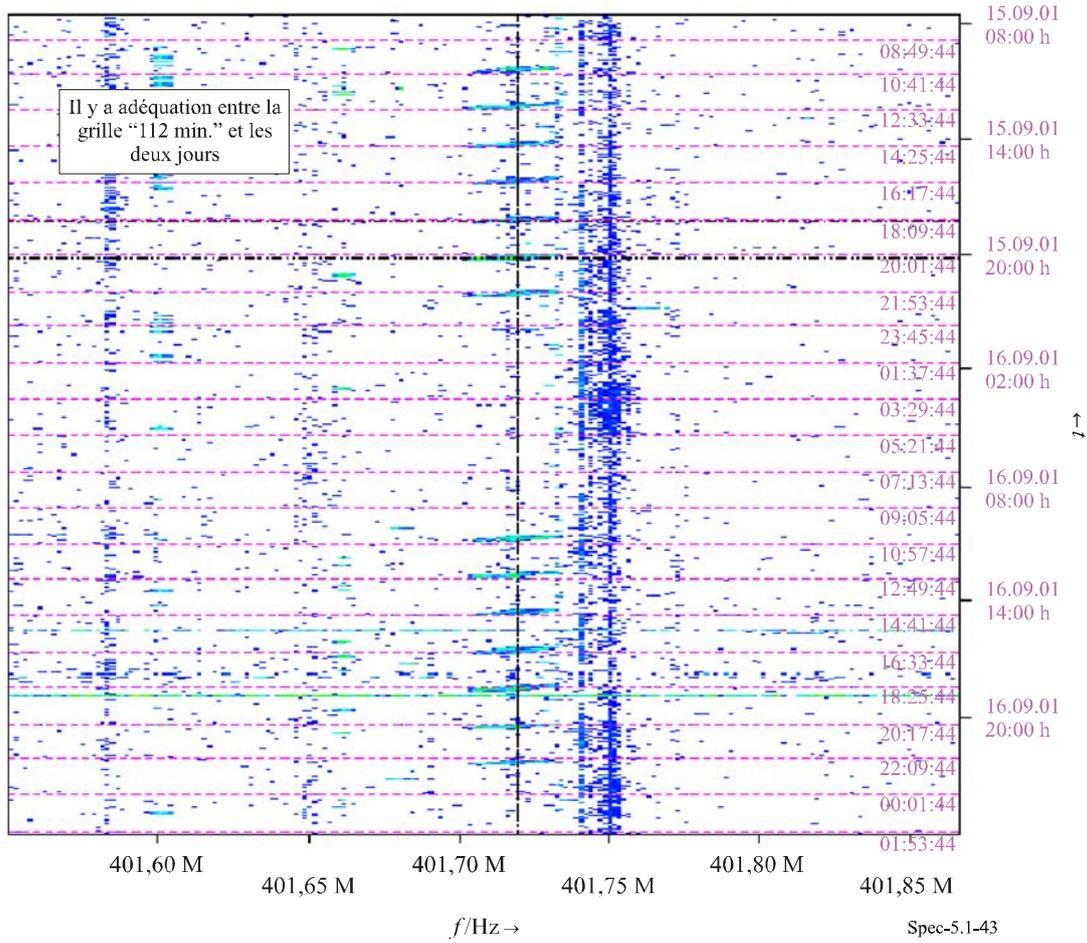


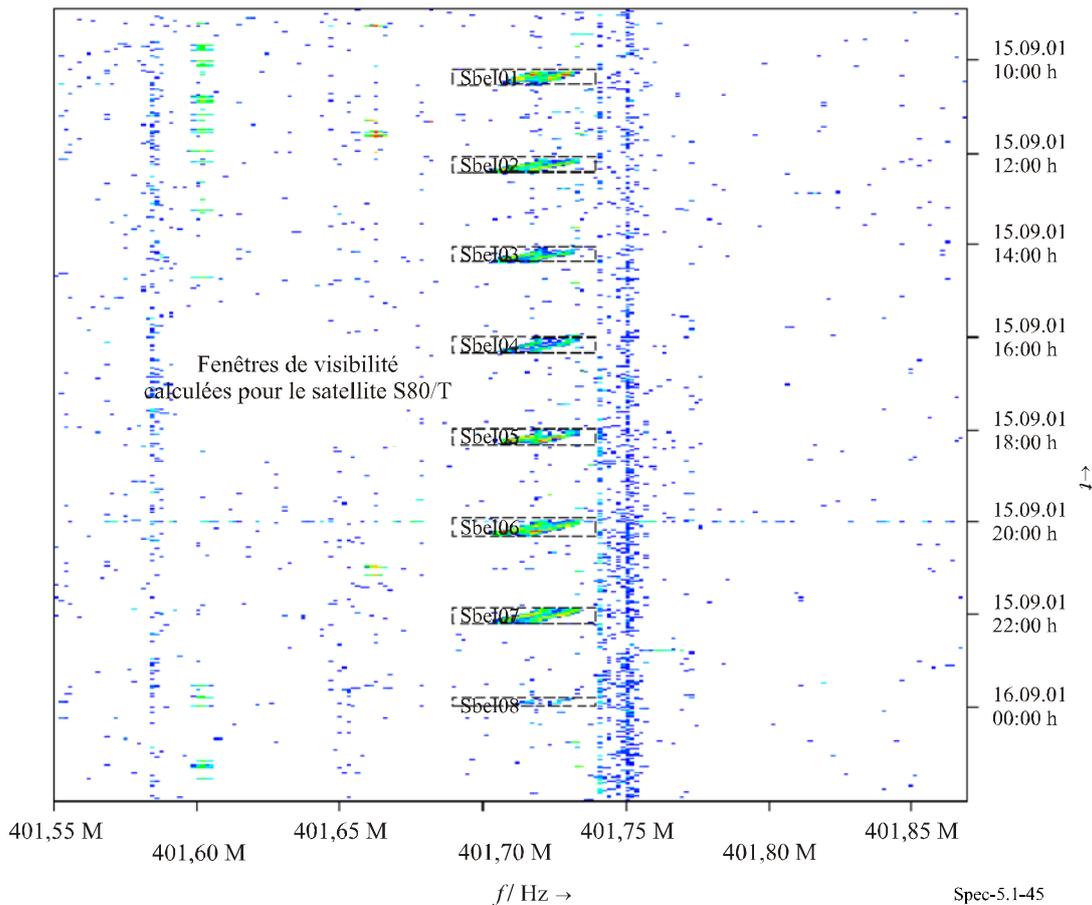
FIGURE 5.1-44

Recherche dans la base de données NASA-SSR

INT-ID	CAT	SRC	PERIOD	INCL	APOG.	PERIG.	RCS	NAME	DATE
1991-077E	21788	CIS	113,7	82,6	1412	1384	1,8488	COSMOS 2188	12.11.91
1990-114F	21033	CIS	113,7	82,6	1410	1386	2,2032	COSMOS 2119	22.12.90
1989-074B	20233	CIS	113,7	82,6	1410	1386	1,7514	COSMOS 2039	14.09.89
1988-002F	18793	CIS	113,7	82,6	1411	1384	1,9042	COSMOS 1914	15.01.88
1987-074A	18334	CIS	113,7	82,6	1409	1387	2,1058	COSMOS 1875	07.09.87
1987-026B	17583	CIS	113,7	82,6	1411	1385	2,2787	COSMOS 1828	13.03.87
1985-003C	15471	CIS	113,7	82,6	1413	1383	1,3662	COSMOS 1619	15.01.85
1992-052A	22076	US	112,4	66	1344	1332	10,6361	TOPEX/POSEIDON	10.08.92
1990-013C	20480	JPN	112,2	99,1	1744	912	0,3319	JAS 1B (FUJI 2)	07.02.90
1990-013B	20479	JPN	112,2	99,1	1743	912	0,4893	DEBUT (ORIZURU)	07.02.90
1992-052C	22078	FR	111,9	66,1	1325	1305	0,4416	SBU/1	10.08.92
1992-052B	22077	KOR	111,9	66,1	1325	1307	0,2912	OSCAR 23 (KITSAT 1)	10.08.92
1994-046A	23191	US	110,6	70	2156	355	3,8606	APEX	03.08.94
2000-075C	26621	SWED	110,5	95,4	1799	701	0,1528	MUNIN	21.11.00
1989-086A	20305	CIS	110,4	82,6	1251	1238	11,6301	METEOR 3-3	24.10.89
1995-059B	23711	US	109,7	100,5	1493	934	13,2016	SURFSAT	04.11.95
1994-003B	22970	GER	109,4	82,6	1208	1185	7,6481	TUBSAT B	25.01.94
1994-003A	22969	CIS	109,4	82,6	1208	1186	41,1628	METEOR 3-6	25.01.94
1991-030A	21232	CIS	109,4	82,6	1208	1188	9,5992	METEOR 3-4	24.04.91
1991-056A	21655	CIS	109,3	82,6	1206	1187	7,8738	METEOR 3-5	15.08.91
1988-064A	19336	CIS	109,3	82,5	1208	1184	8,0195	METEOR 3-2	26.07.88
1985-109A	16184	CIS	109,3	82,6	1212	1189	8,4445	METEOR 3-1	24.10.85

FIGURE 5.1-45

Fenêtres de visibilité dans l'enregistrement des taux d'occupation des fréquences



5.1.7.2 Calcul des paramètres orbitaux à partir des mesures angulaires sur les antennes

L'identification d'un satellite est rendue plus facile et même, dans certains cas, elle n'est possible que si l'on utilise les paramètres orbitaux calculés à partir de mesures d'angles effectuées sur les antennes. Quant à savoir si la détermination est suffisamment précise ou non, cette question dépend en grande partie de la précision de la mesure angulaire, ainsi que de la longueur et des caractéristiques de l'arc d'orbite exploré. L'exemple traité ci-après devrait permettre de formuler des conclusions spécifiques concernant la précision de calcul réalisable; ces conclusions ne sont toutefois pas nécessairement d'application universelle. Cette étude repose sur une comparaison entre les données d'éphéméride de la station spatiale NOAA10, publiées avec un bon degré de précision et utilisées par conséquent comme données de référence, et les données d'éphéméride obtenues d'après des mesures d'angles sur les antennes, et sur une comparaison entre les durées de visibilité, l'azimut et l'élévation calculés sur la base des deux groupes de données d'éphéméride pour un trajet, environ 24 heures plus tard.

Avec la technique de la mono-impulsion, on obtient, dans la bande des 1 700 MHz considérée, une précision d'environ $0,12^\circ$ pour la mesure d'angle avec l'antenne disponible (réflecteur parabolique de 12 mètres) (voir aussi le § 5.1.3.5). L'angle d'élévation maximal de l'orbite explorée était de l'ordre de 60° au-dessus du plan horizontal.

On utilise trois ensembles de données de mesure d'angles (azimut/élévation/temps) pour une première détermination mathématique de l'orbite, suivie du calcul des paramètres orbitaux. Pour affiner les résultats, on effectue ensuite un calcul paramétrique afin d'obtenir une solution se rapprochant le plus possible des valeurs angulaires fournies par la série de mesures pour l'antenne [Montenbruck, 1989; Montenbruck et Pfleger, 1991].

Le Tableau 5.1-10 et la Figure 5.1-46 donnent les résultats de ces comparaisons. Lorsqu'ils sont utilisés comme moyens d'identification d'un satellite, les paramètres indiqués dans le Tableau 5.1-10 facilitent considérablement cette identification. Toutefois, quand toutes les données d'éphéméride sont utilisées pour la prédétermination de l'azimut et de l'élévation en fonction du temps, on observe des écarts qui augmentent en même temps que l'intervalle de temps par rapport à l'époque considérée. Ce phénomène est dû aux limitations imposées à la précision lors du calcul des paramètres orbitaux à partir des mesures d'angles sur un seul trajet du satellite. En revanche, les conditions de réception du satellite sont bien meilleures pendant les orbites suivantes. La Figure 5.1-46 montre les écarts observés dans les angles d'azimut et d'élévation pendant un trajet du satellite après un délai de 24 h (après 14 révolutions), sur la base de la détermination initiale de l'orbite. Les courbes calculées sont décalées de -1 minute pour compenser le délai.

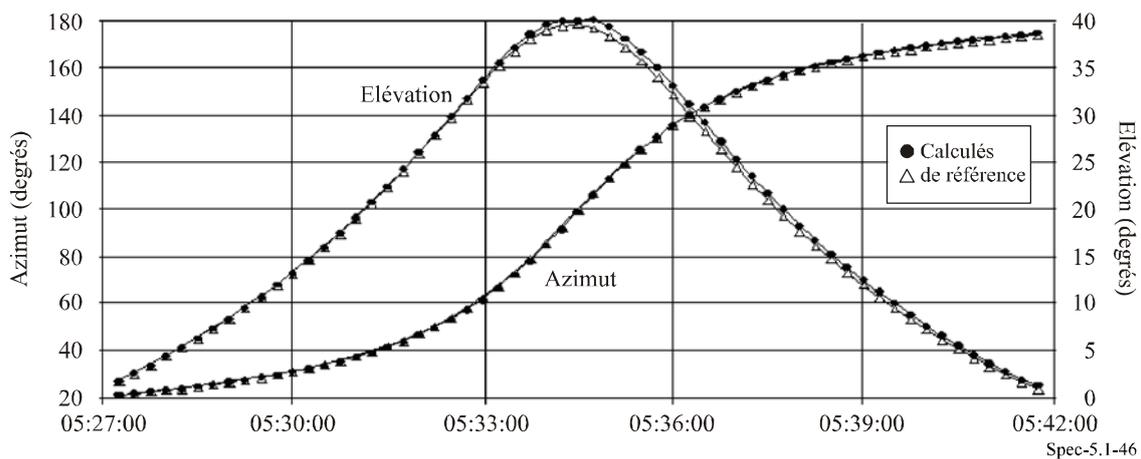
TABLEAU 5.1-10

Comparaison entre les paramètres orbitaux de référence et les paramètres orbitaux calculés (première détermination de l'orbite)

Paramètres orbitaux de NOAA10	Paramètres de référence	Paramètres calculés
Périgée (km)	807	808
Apogée (km)	825	830
Demi-grand axe (km)	7 187	7 190
Excentricité	0,0012156	0,0015
Inclinaison (degrés)	98,5121	98,78
Période de révolution (min)	100,781	100,85

FIGURE 5.1-46

Comparaison entre les angles d'antenne calculés à partir respectivement des paramètres orbitaux de référence et des paramètres orbitaux mesurés

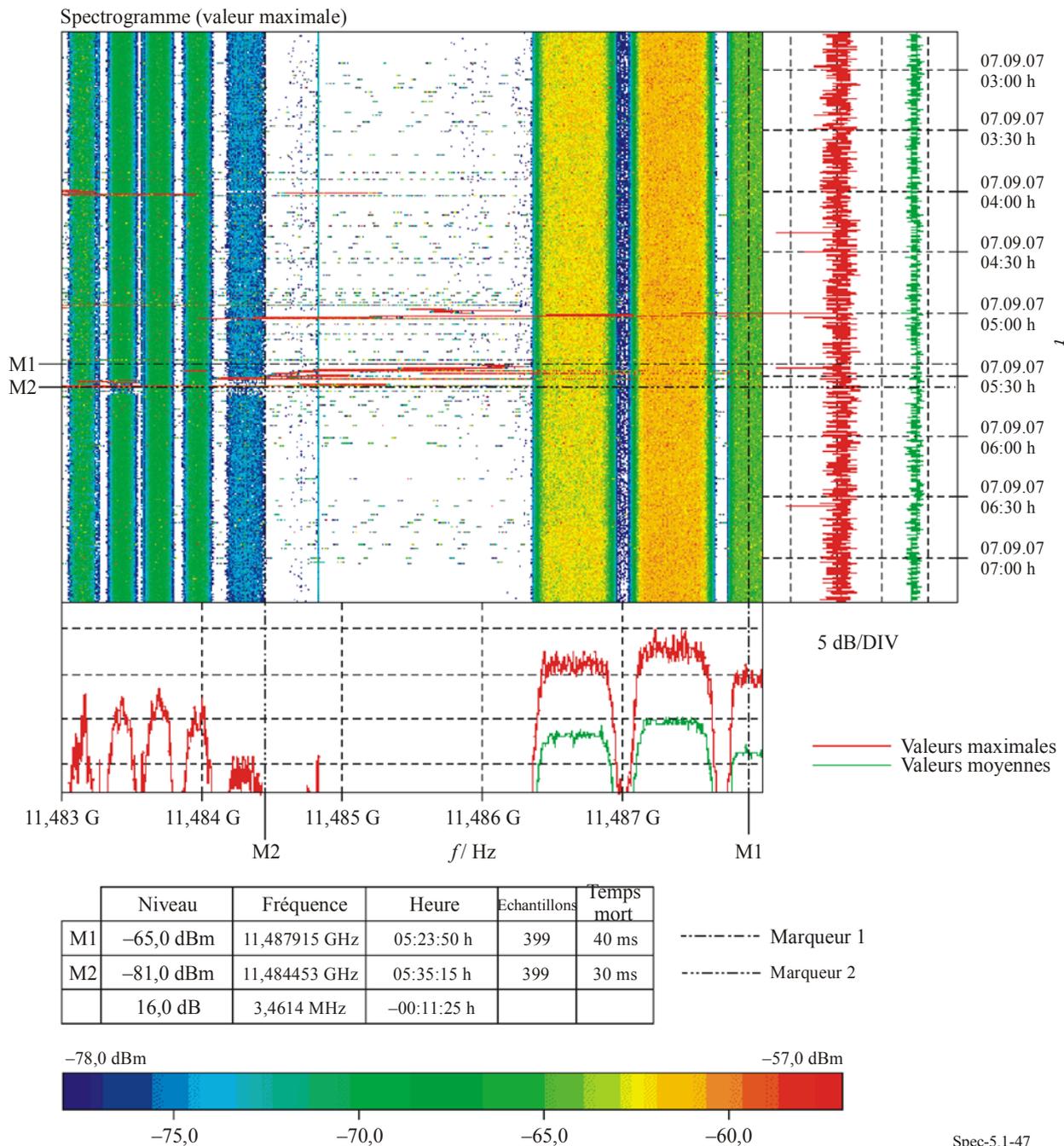


5.1.7.3 Mesures du degré d'occupation des répéteurs

La Figure 5.1-47 montre le résultat obtenu en mesurant le degré d'occupation d'un répéteur avec un système d'enregistrement des fréquences. Le spectrogramme indique que l'occupation du répéteur présente une section inutilisée dans la zone médiane de la gamme des fréquences affichées ainsi qu'un signal de brouillage temporaire de forte puissance.

FIGURE 5.1-47

Mesures du taux d'occupation des répéteurs



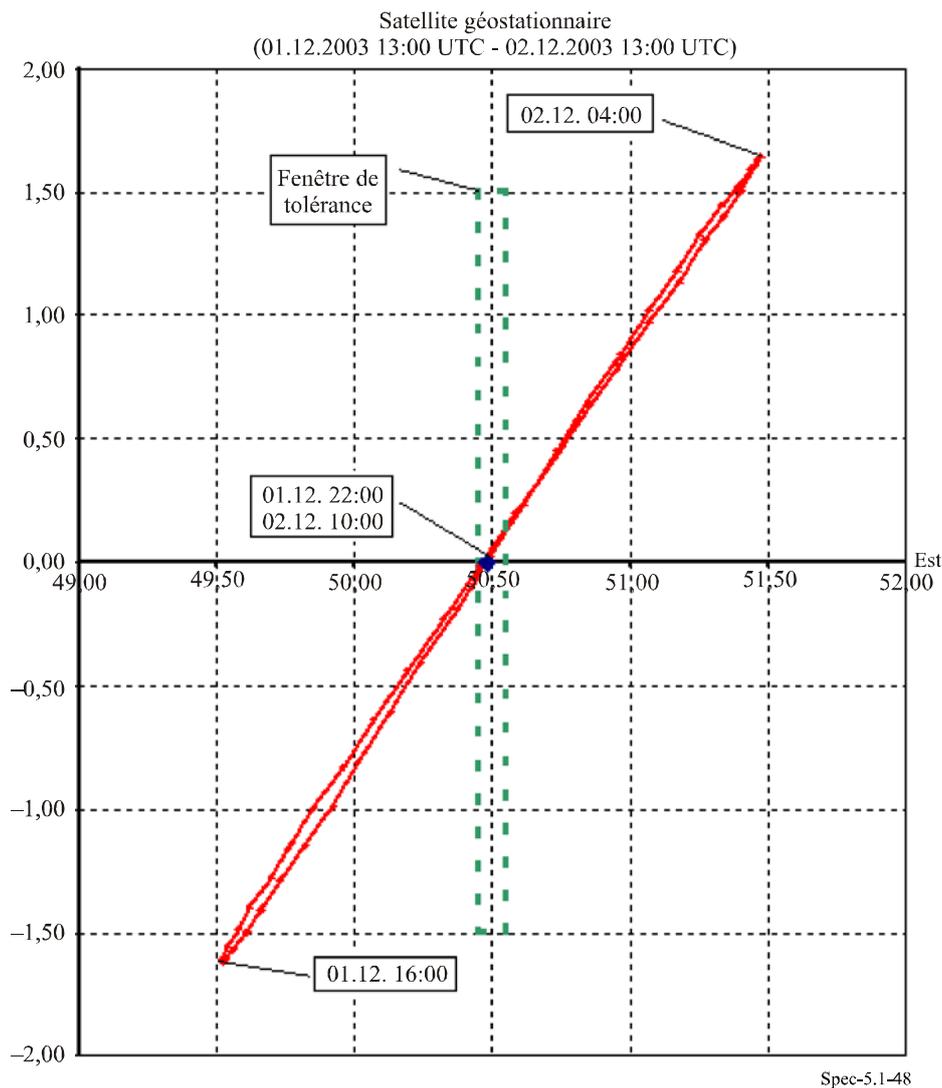
Le signal brouilleur traverse, rapidement et en décroissant, l'ensemble du répéteur. Le signal reçu par une antenne directive est connecté à l'enregistreur de fréquences dans la gamme FI. Le signal est numérisé et présenté, en direct, sur l'enregistreur de fréquences sous la forme d'un spectrogramme obtenu par FFT. Les spectres, enregistrés en continu sur un disque dur, sont disponibles pour un traitement ultérieur en différé. Dans le spectrogramme, les différentes couleurs représentent le niveau de puissance. La gamme des puissances affichées est ajustable par paramétrage de la gamme de couleurs. Il est possible de modifier l'aspect du spectrogramme dans la dimension des fréquences et dans la dimension temporelle: en effectuant un zoom avant, on peut afficher une courte période d'observation dans les moindres détails; en effectuant un zoom arrière, on obtient une vue générale correspondant à une longue période d'observation. Les lignes de marquage fréquentiel et de marquage temporel se trouvent à droite et le spectrogramme correspondant est affiché au-dessous.

5.1.7.4 Inclinaison des satellites OSG

Les courbes de la Figure 5.1-48 ont été tracées d'après des observations portant sur la position d'un satellite OSG. Ces observations, faites à intervalles de 30 min, mettaient en œuvre une antenne parabolique de 12 m, l'ouverture de faisceau à mi-puissance étant de $0,15^\circ$. En application de la technique de poursuite mono-impulsion, les données de pointage de l'antenne ont été recueillies automatiquement après une première localisation du satellite par un procédé manuel. Les positions du satellite sont enregistrées sur une période de 24 h et les résultats sont calculés pour donner la figure en «8». Les renseignements ainsi recueillis mettent en évidence l'écart du satellite par rapport à sa position orbitale nominale et fournissent une référence pour des observations ultérieures.

FIGURE 5.1-48

Inclinaison des satellites géostationnaires (figure en «8»)



5.1.7.5 Résultat et présentation d'une mesure de géolocalisation

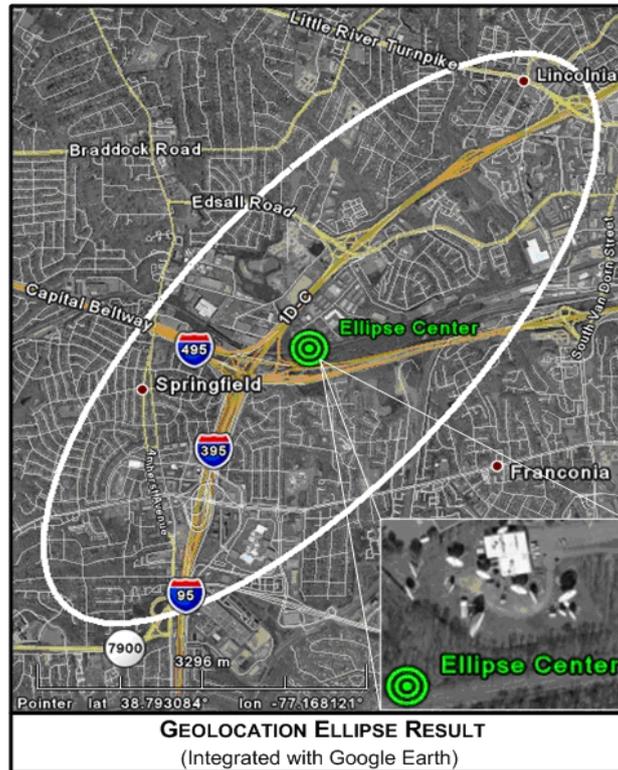
La Figure 5.1-49 a été obtenue à partir d'une mesure de géolocalisation TDOA et FDOA d'une station terrienne inconnue en liaison montante. Le résultat se présente généralement sous la forme d'une zone elliptique, sur laquelle on peut afficher, par superposition, une carte numérique pour une meilleure compréhension. La forme et l'orientation de l'ellipse peuvent varier de façon importante en fonction de plusieurs paramètres: le nombre de mesures effectuées, le moment de la journée où les mesures sont effectuées, le type de modulation du signal observé, la corrélation S/N , etc.

Les paramètres permettant de définir l'ellipse comprennent notamment:

- la longueur du demi-grand axe;
- la longueur du demi-petit axe;
- l'angle du demi-grand axe (ou demi-petit axe) par rapport à une direction de référence;
- les coordonnées du centre;
- le degré de confiance.

FIGURE 5.1-49

Résultats de la géolocalisation d'une station terrienne émettant vers un satellite GSO (1)



Spec-5.1-49

Centre de l'ellipse

Ellipse résultant de la géolocalisation
(intégrée à une image Google Earth)

Le Tableau 5.1-11 donne les paramètres de l'ellipse résultant de la géolocalisation présentée à la Figure 5.1-49.

TABLEAU 5.1-11

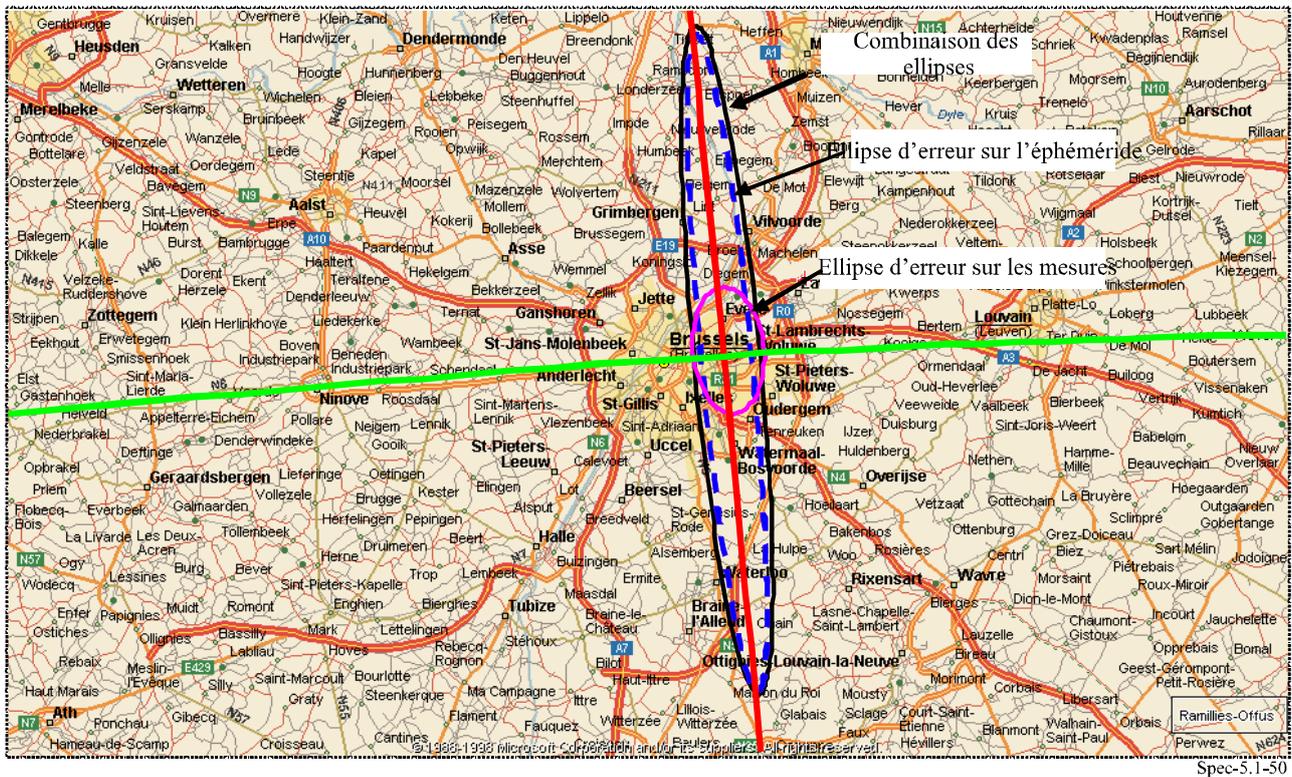
Paramètres de l'ellipse résultant de la géolocalisation correspondant à la Figure 5.1-49

Latitude (degrés)	N 38,793
Longitude (degrés)	O 77,168
Demi-grand axe (km)	8,679
Demi-petit axe (km)	3,338
Angle (degrés)	51,5
Degré de confiance (%)	95

La Figure 5.1-50 présente, sur une carte, le résultat de la mesure de géolocalisation ainsi que l'ellipse d'erreur. La très grande ellipse correspondant à l'erreur d'éphéméride montre les inexactitudes de la position et des vitesses du satellite. Dans un tel cas, il conviendrait d'effectuer une mesure de compensation de l'erreur d'éphéméride.

FIGURE 5.1-50

Résultats de la géolocalisation d'une station terrienne émettant vers un satellite GSO (2)



Références

- BARDELLI R., HAWORTH D., et SMITH N. [1995] Interference Localisation for the EUTELSAT Satellite System, Proc. GLOBECOM-95, Singapour.
- DÜSPOHL, K. [2006] Vertex, Monitoring Ground Station Antennas. 9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mayence, Allemagne.
- KOETS, M.A. et BENTLEY, R.T. [1999] Satellite Based Geolocation Using a Single Geosynchronous Satellite and an Inverse Doppler Technique. Southwest Research Institute, San Antonio, Etats-Unis d'Amérique.
- LEUPELT, U. et GIEFING, A. [1981] 12-m-Cassegrain-Antenne mit umschaltbarem Speisesystem (antenne Cassegrain de 12 m avec système d'alimentation commutable). *NTZ*, Vol. 34, p. 570-575.
- MAHNER, H. [1970] Telemetrie- und Trackingempfänger für Satelliten-Bodenstationen (Un récepteur de télémesure et de poursuite pour stations terriennes), *Siemens-Zeitschrift* 44, édition spéciale «Beiträge zur Raumfahrt», p. 108-112.
- MONTENBRUCK, O. [1989] *Practical Ephemeris Calculations*. Springer Verlag, Heidelberg.
- MONTENBRUCK, O. et PFLEGER, T. [1991] *Astronomy on the Personal Computer*. Springer Verlag Heidelberg.
- NEWELL, A.C., STUBENRAUCH, C.F. et BAIRD, R.C. [1986] Calibration of Microwave Antenna Gain Standards. *Proc. IEEE*, Vol. 74, 1, p. 129-132.
- NEWELL, A.C., BAIRD, R.C. et WACKER, P.F. [1973] Accurate Measurement of Antenna Gain and Polarization at Reduced Distances by an Extrapolation Technique. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-21, 4, p. 418-430.

- SATOH, T. et OGAWA, A. [1982] Exact gain measurement of large aperture antennas using celestial radio sources. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, **1**, p. 157-161.
- SCHILLER, M. et SIGL, G. [2006] Sinan, Design and Advantages of a Compact Multiple Band Feed System. 9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mayence, Allemagne.
- SCHWERDTFEGER, R. [2006] Vertex RSI, Multi-function Earth Station Antennas. 9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mayence, Allemagne.
- STEIN, S. [1981] Algorithms for Ambiguity Function Processing. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-29, **3**.
- KAWASE S. [janvier 2005] Interferometric monitoring of satellite longitudes. *Int. J. Sat. Comm. and Networking*, Vol. 23, p. 67-76.
- KAWASE S. [avril 2007] Radio interferometer for geosynchronous-satellite direction finding. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 43, p. 443-449.

Bibliographie

- BENTLEY, R.T., JOHNSON, R. et CASTLES, M.P. [1996] Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, Etats-Unis d'Amérique.
- BUCERIUS, H. et SCHNEIDER, M. [1966] Himmelsmechanik I-II (Trigonométrie sphérique I-II); Bd. 143/144, Bibliographisches Institut; Mannheim, Allemagne.
- CAPELLARI, J.O., VELEZ, C.E. et FUCHS, A.J. [1976] Mathematical Theory of the Goddard Trajectory Determination System. Goddard Space Flight Center; Greenbelt, Maryland, Etats-Unis d'Amérique.
- GOULD, R.G. et LUM, Y.F. [1976] *Communications satellite systems: An overview of the technology*. IEEE Press.
- GREEN, R.M. [1985] *Spherical Astronomy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HARTL, P. *Fernwirktechnik der Raumfahrt (La télécommande en astronautique)*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo.
- HERTLER, E. et RUPP, H. *Nachrichtentechnik über Satelliten (Télécommunications par satellite)*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo.
- KAISER, W. et LOHMAR, U. [1981] *Kommunikation über Satelliten (Communications par satellite)*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo.
- KOCH, G. [1972] Antennenprobleme beim Weltraumfunk (Conception des antennes pour les communications spatiales). *NTG-Fachberichte*, Vol. 43, p. 101-123.
- KRIETENSTEIN, K. [1994] Das Ohr am Orbit, Eine Darstellung von Arbeitsweisen der Funkmeßstelle Leeheim des BAPT (L'oreille en orbite, exposé sur les méthodes de mesure de la station de contrôle de Leeheim pour les services de radiocommunications spatiales de l'Administration fédérale allemande des postes et télécommunications), *telekom praxis*, 8/94, Schiele & Schön GmbH, 10969 Berlin.
- MAHNER, H. [1970] Telemetrie- und Trackingempfänger für Satelliten-Bodenstationen (Télémétrie et récepteur de poursuite pour les stations terriennes de systèmes à satellites). *Siemens-Zeitschrift* 44, édition spéciale «Beiträge zur Raumfahrt», p. 108-112.
- MIYA, K. [1975] *Satellite Communications Engineering*. Lattice Co., Tokyo, Japon.
- MOENS, C. et ROESEMS, K. [1974] Nachführ- und Datenempfänger für Bodenstationen von Satellitensystemen (Un récepteur de poursuite et de signaux de données pour les stations terriennes des systèmes à satellites). *Elektrisches Nachrichtenwesen*, International Telephone and Telegraph Corporation, Vol. 49, **3**, p. 315-323.

ÖHL, H. et GÖSSL, H. [1978] Die Eigenschaften der Antennen der zentralen Deutschen Bodenstation (ZDBS) (Caractéristiques des antennes de la station terrienne centrale de la République fédérale d'Allemagne (ZDBS)). *Mikrowellenmagazin*, Vol. 4, 1, p. 10-14.

SIEMENS-ZEITSCHRIFT [1970] Beiheft, Beiträge zur Raumfahrt (Exposés sur l'astronautique). Vol. 44.

Transmitter Location Systems, LLC [2005] TLS Model 2000 Operation and Maintenance Manual.

UIT [1988] Specifications of transmission systems for the broadcasting-satellite service.

UIT-R Manuel sur les communications par satellite, 3^e édition, 2002, Wiley, New York, Etats-Unis d'Amérique.

UNGER, J.W.H. [1976] *Literature survey of communication satellite systems and technology*. IEEE Press.

WOOD, P.J. [1980] *Reflector antenna analysis and design*. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, Royaume-Uni.

Recommandations de l'UIT-R

NOTE – Dans chaque cas, il convient d'utiliser la dernière édition de la Recommandation.

Recommandation UIT-R BO.650 – Normes applicables aux systèmes de télévision conventionnelle pour la radiodiffusion par satellite dans les canaux définis par l'Appendice 30 du Règlement des radiocommunications.

Recommandation UIT-R S.446 – Dispersion de l'énergie de la porteuse pour des systèmes employant une modulation angulaire par des signaux analogiques ou une modulation numérique dans le service fixe par satellite.

Recommandation UIT-R S.484 – Maintien en position en longitude des satellites géostationnaires du service fixe par satellite.

Recommandation UIT-R S.673 – Termes et définitions concernant les radiocommunications spatiales.

Recommandation UIT-R SM.1681 – Mesure des émissions de faible niveau en provenance de stations spatiales par des stations terriennes de contrôle utilisant des techniques de réduction du bruit.

ANNEXE 1

PLANIFICATION DU SYSTÈME DE CONTRÔLE ET APPELS D'OFFRES

		<i>Page</i>
A1	Questions à prendre en considération par les autorités de réglementation avant de lancer un appel d'offres	161
A2	Vue d'ensemble d'un processus d'appel d'offres	161
A3	Etape préparatoire – Planification	162
A3.1	Concept d'un système de contrôle des émissions radioélectriques	163
A3.2	Etude de faisabilité	163
A3.2.1	Objectif de l'étude de faisabilité	163
A3.2.2	Contenu et structure de l'étude de faisabilité	164
A3.3	Plan d'exploitation (<i>Business plan</i>)	165
A3.4	Planification et conception du système	166
A3.4.1	Examen des textes de loi (et aspects juridiques) existants	166
A3.4.2	Examen des procédures (et méthodes) existantes	167
A3.4.3	Examen des capacités de mesure existantes	167
A3.4.4	Evaluation du marché	167
A3.4.5	Base de données de gestion du spectre	167
A3.4.6	Analyse de l'ingénierie des programmes	167
A3.4.7	Evaluation du système national de gestion du spectre et définition du système de contrôle national	168
A3.4.8	Evaluation des matériels et des logiciels	168
A3.4.9	Gestion nationale du projet	168
A3.5	Elaboration des spécifications du système	168
A3.5.1	Centres nationaux et régionaux et stations de contrôle	168
A3.5.2	Spécifications générales des équipements	172
A3.5.3	Véhicules et dispositifs de contrôle	173
A3.5.4	Logiciel	173
A3.5.5	Spécifications générales des unités des systèmes de contrôle	173
A3.5.6	Spécifications concernant les services	174
A3.6	Formation	174
A3.7	Maintenance et réparations	175
A3.8	Documentation	175

A4	Etape de mise en œuvre – processus d'appel d'offres.....	175
A4.1	Spécimen d'avis pour les appels d'offres concernant le contrôle du spectre	175
A4.1.1	Le dossier relatif à l'avis d'appel d'offres pour le contrôle du spectre doit comprendre les éléments suivants	175
A4.2	Modèle de l'offre du soumissionnaire	178
A4.2.1	Introduction.....	178
A4.2.2	Caractéristiques techniques générales.....	178
A4.2.3	Fonctions du système	178
A4.2.4	Méthodes de développement du système	178
A4.2.5	Garanties techniques	178
A4.2.6	Description détaillée des éléments suivants	179
A4.2.7	Présentation des références	179
A4.2.8	Diagramme fonctionnel du système.....	179
A4.2.9	Prix	179
A4.3	Modèle de contrat.....	179
A4.4	Evaluation et comparaison des offres et attribution du marché	181
A4.4.1	Procédures définies par l'UIT.....	182
A4.4.2	Procédures définies par la Banque mondiale COÛT ou PRIX	182
A4.4.3	Procédures dans le cas où l'administration (l'acheteur) n'est pas tenue de suivre les procédures de l'UIT ou de la Banque mondiale	185
A5	Etape finale – Procédure de réception.....	185
A5.1	Réception en usine	185
A5.2	Procédure d'essai de réception sur site	185
A5.2.1	Réception (ou réception provisoire dans le cas de la réception provisoire et définitive).....	185
A5.2.2	Réception définitive	186
	Complément 1 à l'Annexe 1 – Exemple de l'UIT concernant l'analyse technique des offres.....	187
	Appendice 2 à l'Annexe 1 – Exemple de l'UIT concernant les évaluations commerciale et juridique	192

A1 Questions à prendre en considération par les autorités de réglementation avant de lancer un appel d'offres

Une autorité nationale de réglementation des radiocommunications doit interpréter et mettre en œuvre les dispositions du Règlement des radiocommunications (RR) de l'UIT, qui a la valeur d'un traité international. Elle doit également mettre en application les dispositions réglementaires de la législation nationale et les règles relatives aux radiocommunications élaborées en conséquence. Elle veille en outre au respect des dispositions définies dans les autorisations ou licences accordées aux divers exploitants de systèmes hertziens répartis dans l'ensemble du pays. L'organisme de contrôle est l'organisme de l'autorité nationale qui opère sur le terrain et qui est chargé de fournir des données d'ordre pratique pertinentes pour la gestion du spectre, y compris le contrôle et la réglementation des réseaux hertziens, l'objectif étant d'assurer un fonctionnement sans brouillage de tous les réseaux.

L'organisme de contrôle est investi de toutes les responsabilités nécessaires pour faire un usage cohérent et étendu des radiocommunications dans le pays. Les aspects ci-après sont liés à la planification, à la coordination et à la réglementation du spectre dans le cadre national:

- a) Optimisation de l'utilisation du spectre radioélectrique en appliquant les normes et pratiques internationales les plus récentes pour la gestion du spectre et les fonctions de contrôle des radiocommunications hertziennes.
- b) Utilisation et protection des ressources orbite/fréquence pour les systèmes à satellites et autres systèmes spatiaux nationaux en publiant, notifiant et enregistrant les systèmes nationaux auprès de l'UIT et en assurant une protection constante contre les nouveaux systèmes d'autres pays.
- c) Identification des besoins en spectre pour les nouveaux réseaux sans fil et attribution à ces réseaux de ce qui leur convient en matière de fréquence(s), de puissance, de largeur de bande, d'émission, d'heures d'exploitation et d'autres paramètres techniques dans le cadre de dispositions adéquates en matière d'exploitation et sur le plan réglementaire et administratif.
- d) Autorisation de l'installation et de l'exploitation de stations hertziennes en spécifiant tous les paramètres techniques et d'exploitation nécessaires tels que la fréquence d'exploitation, la puissance, l'émission, les heures d'exploitation, etc.
- e) Etablissement des règlements, paramètres techniques et normes régissant l'utilisation de chaque bande de fréquences ou d'une fréquence particulière par les stations de différents services de radiocommunication, compte tenu des règlements et accords internationaux existants.
- f) Réalisation de travaux de coordination spéciaux pour l'utilisation de systèmes/équipements radioélectriques dans des situations particulières telles que les catastrophes naturelles, etc.
- g) Tenue et mise à jour de toutes les informations concernant les systèmes de radiocommunications autorisés, par exemple fréquences, emplacement des stations, puissance, indicatifs d'appel, etc.

Le contrôle des émissions radioélectriques, en tant qu'élément important du processus de gestion du spectre radioélectrique, concourt à la mise en œuvre de toutes ces fonctions. Il joue un rôle important dans la planification, l'ingénierie, la compatibilité électromagnétique et pour ce qui est d'assurer le respect des paramètres autorisés ou définis dans les licences. En fait, le contrôle représente en quelque sorte les yeux et les oreilles du processus de gestion du spectre radioélectrique.

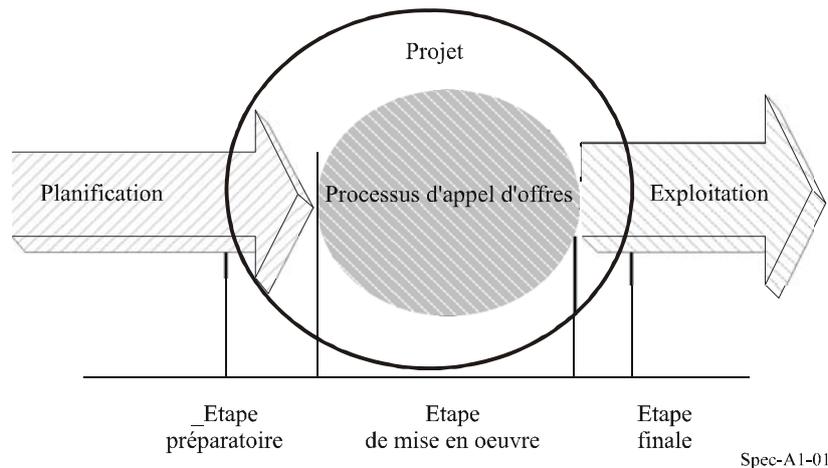
Les autres chapitres du présent Manuel sur le contrôle du spectre renferment un grand nombre de descriptions détaillées concernant tous les types de stations de contrôle, d'équipements et de procédures. On trouvera dans la présente Annexe un aperçu général des travaux de planification, des études et des procédures qu'il faut mettre en place pour développer un système de contrôle d'ampleur nationale ou une station de contrôle fixe ou mobile.

Le spectre des fréquences radioélectriques doit être utilisé d'une manière équitable, économique, efficace et rationnelle. Pour ce faire, il est nécessaire de garantir une bonne répétabilité des fréquences et d'utiliser des équipements et des systèmes de contrôle adéquats.

A2 Vue d'ensemble d'un processus d'appel d'offres

Lorsqu'une administration nationale décide de mettre en place un système de contrôle à l'échelle du pays, une nouvelle station de contrôle locale ou ne serait-ce qu'un système de mesure mobile, elle doit envisager son projet en trois étapes (voir Figure A1-1).

FIGURE A1-1
Les trois étapes d'un projet structuré



Etape préparatoire – Planification:

- Concept d'un système de contrôle des émissions radioélectriques.
- Etude de faisabilité.
- Plan d'exploitation (*Business plan*).
- Planification système.
- Spécifications des systèmes.

Etape de mise en œuvre – Processus d'appel d'offres:

- Avis de lancement des appels d'offres publics d'achat (prise en compte de la compétence des soumissionnaires, clauses de disqualification pour non-respect du contrat).
- Appel aux soumissions (notamment fournir aux soumissionnaires des précisions concernant les spécifications).
- Présentation des offres par les soumissionnaires.
- Evaluation des offres reçues (y compris demandes de précision).
- Décision d'adjudication du contrat.
- Signature et entrée en vigueur du contrat.

Etape finale – Procédure de réception, exploitation:

- Fabrication, procédures de réception provisoire et définitive.
- Formation, maintenance et fourniture de pièces de rechange.
- Début de l'exploitation.

A3 Etape préparatoire – Planification

Cette section décrit les différentes étapes qui sont censées mener à l'appel d'offres concernant la mise en place, en tout ou partie, d'un système de contrôle et qui se terminent par la passation d'un marché d'achat de matériel.

En cas de remplacement d'une partie d'un système de contrôle existant ou d'une pièce particulière d'un équipement, certaines de ces étapes ne s'appliquent pas.

S'il s'agit de mettre en place un système de contrôle totalement nouveau, on veillera à élaborer les spécifications de base du système, de sorte que ce dernier réponde aux besoins de contrôle de l'organisme de réglementation, au budget disponible, etc.

Les étapes suivantes sont décrites ci-après:

- Concept d'un système de contrôle des émissions radioélectriques.
- Etude de faisabilité.
- Plan d'exploitation (*Business plan*).
- Planification et conception du système.
- Elaboration des spécifications du système.

A3.1 Concept d'un système de contrôle des émissions radioélectriques

Comme indiqué au Chapitre 1 du présent Manuel, la gestion du spectre désigne le processus global permettant de réglementer et d'administrer l'utilisation du spectre de radiofréquences. L'objectif de la gestion du spectre est de maximiser l'efficacité d'utilisation du spectre et de minimiser les brouillages. Les règles et réglementations, fondées sur la législation pertinente, constituent une base réglementaire et juridique sur laquelle s'appuie le processus de gestion du spectre. Les informations techniques et administratives nécessaires au processus proviennent de bases de données, dans lesquelles figurent notamment l'ensemble des renseignements concernant tous les utilisateurs autorisés du spectre. L'analyse des informations contenues dans ces bases de données simplifie le processus de gestion du spectre et permet de prendre des décisions concernant l'attribution du spectre, des fréquences et des licences. Entre autres choses, le contrôle du spectre fournit les moyens nécessaires pour maintenir l'intégrité du processus de gestion du spectre; il peut se définir comme un processus d'observation du spectre radioélectrique et de compte rendu sur son utilisation.

Pour définir le concept du point de vue de l'exploitation, il convient d'examiner les aspects suivants:

- Automatisation de la gestion des données et du contrôle du spectre au moyen des logiciels adéquats. Les logiciels et équipements nécessaires sont spécifiquement conçus pour les activités de contrôle du spectre. En conséquence, il est primordial de prévoir le matériel adéquat pour ces activités.
- Développement du contrôle automatisé du spectre, des études du bruit radioélectrique et des installations de radiogoniométrie, à la fois en mode fixe et en mode mobile (capacité jusqu'à 3 GHz).
- Installations de contrôle spécialisées pour les bandes hyperfréquences et supérieures et pour les services spécialisés (jusqu'à 50 GHz et au-delà).
- Développement des installations de contrôle des systèmes à satellites géostationnaires (OSG) et non géostationnaires (non OSG).
- Structure de l'organisme (personnel) et interaction de celui-ci avec d'autres organismes, en particulier par les activités de gestion du spectre.
- Infrastructure existante et requise.
- Formation du personnel pour l'acquisition de compétences institutionnelles et le renforcement des capacités, etc.

Ces aspects sont traités dans les sections ci-après.

Une fois défini le concept du point de vue de l'exploitation, on procédera à une analyse coûts/avantages, afin de voir si les objectifs de l'administration seront atteints avec une bonne rentabilité. Cette analyse s'impose dans tous les cas, qu'il s'agisse de mettre en place un système nouveau ou de moderniser/modifier un système existant.

A3.2 Etude de faisabilité

A3.2.1 Objectif de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité est un élément fondamental du début du processus d'appel d'offres. Elle permet d'analyser différentes solutions, d'étudier les répercussions des développements sur les capacités de mesure futures et de trouver la meilleure solution, ce qui comprend notamment une étude d'impact sur les responsabilités en matière de gestion de spectre dans le cas où il serait décidé de ne pas mettre en place de nouvel équipement.

L'étude de faisabilité doit également répondre à la question suivante: quels avantages les autorités, la société de l'information et les utilisateurs du spectre peuvent-ils attendre du développement technique envisagé?

Lors de l'élaboration du planning technique des dispositifs ou systèmes de contrôle, il convient de prendre en compte les possibilités techniques, la durée de vie et l'usure des dispositifs ou systèmes existants.

Au cours de la planification et du développement des dispositifs ou systèmes de mesure, on veillera à spécifier et à prendre en compte les éléments suivants:

- Zones de couverture du contrôle, qui dépendent:
 - des responsabilités de l'organe de réglementation;
 - de la taille du pays;
 - de la densité d'utilisation du spectre dans le pays;
 - de la nécessité de disposer d'autres éléments fonctionnels de la gestion du spectre: planification des fréquences, services d'attribution des licences et de contrôle de la bonne application des règles;
 - de la responsabilité du service de contrôle;
 - des projets futurs d'utilisation des radiocommunications dans le pays.
- Mesures imposées par la réglementation.
- Spécification(s) technique(s) de l'équipement intervenant dans ces mesures.
- Nécessité de disposer d'un système de mesure complet ou d'un système de mesure spécifiquement conçu pour effectuer certains types de mesure.
- Nombre et emplacement des stations fixes (distantes).
- Fonctions des unités de contrôle mobiles.
- Nombre et type des unités mobiles.
- Achat d'un système clés en main ou assemblage de composants.
- Intégration dans un système existant ou achat d'un système autonome.
- Nécessité d'avoir un accès distant aux bases de données de gestion des mesures et/ou des fréquences.
- Degré de dépendance vis-à-vis d'un fournisseur unique.
- Prix et coût de maintenance.

Les efforts déployés pour les études de faisabilité et les frais liés aux contributions externes seront proportionnels à la valeur de l'investissement.

A3.2.2 Contenu et structure de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité, pour atteindre son but, doit préciser très exactement l'objectif technique visé, la structure, la procédure de mise en œuvre, les ressources nécessaires (financières et humaines), les différentes solutions envisageables et sa date de fin prévue.

L'étude doit s'intéresser en détail aux sujets suivants:

- Définition du sujet de l'étude.
- Environnement réglementaire et juridique et analyse du marché des communications.
- Spécification de la raison d'être et du but de l'étude:
 - Historique et raisons qui justifient le besoin d'un nouveau système de contrôle.
 - Structure du système de contrôle à mettre en œuvre.
 - (Nouvelles) tâches à exécuter pour le service de contrôle, y compris les gammes de fréquences à couvrir, etc.
 - Equipement existant dépassé, qui ne répond pas aux besoins en matière de mesures.
 - Facilité d'utilisation et intégration de l'équipement de mesures existant.
 - Nécessité de fournir aux services de contrôle un ou des systèmes techniques de pointe.
 - Nécessité pour l'équipe de contrôle de fournir un travail plus effectif et plus efficace.
 - Nombre de personnes nécessaires pour exploiter un nouveau système.

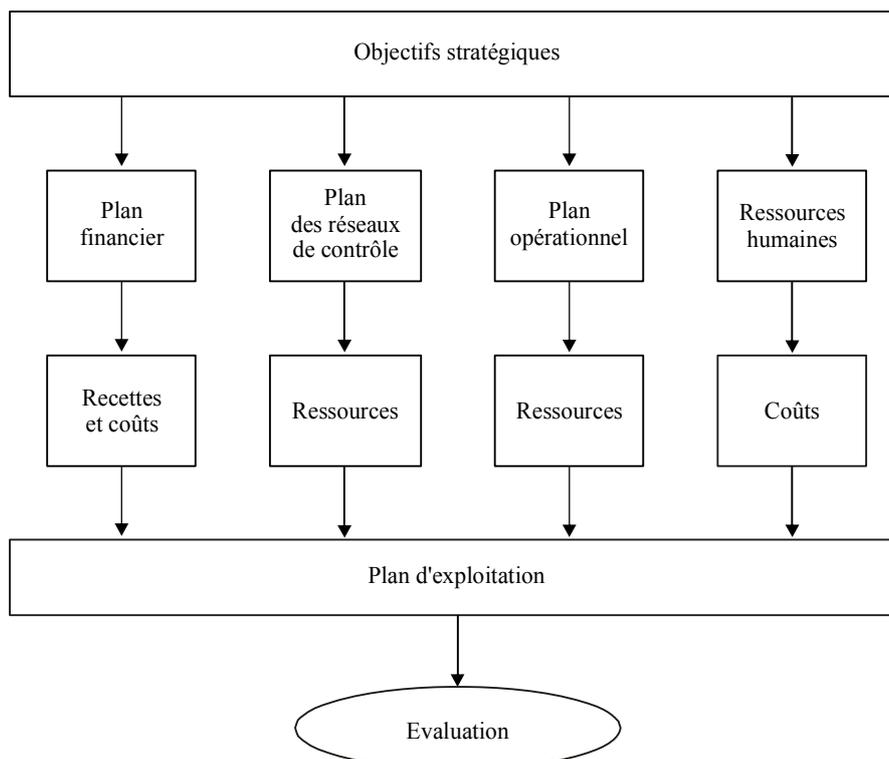
- Compétences techniques requises du personnel.
- Système informatique et gestion des données.
- Analyse économique.
- Autres solutions de mise en œuvre du projet.
- Développements ultérieurs attendus.
- Calendrier de l'étude.
- Planification des ressources:
 - Ressources humaines (pour les étapes de préparation, de mise en œuvre et d'exploitation).
 - Ressources financières (pour les étapes de préparation, de mise en œuvre et d'exploitation).
- Gestion des risques:
 - Identification des facteurs de risque.
 - Classification des risques.
 - Analyse des conséquences liées aux risques.
 - A la lumière des analyses, élaboration d'une politique adaptée de gestion des risques.

A3.3 Plan d'exploitation (*Business plan*)

Une étude des spécifications du système (plan d'exploitation) est réalisée par l'administration et/ou par des consultants.

Un appel d'offres peut également être nécessaire si l'équipement doit être remplacé et si certaines parties du processus (voir la Figure A1-2) doivent être modifiées.

FIGURE A1-2
Gestion au niveau national du plan d'exploitation du système de contrôle



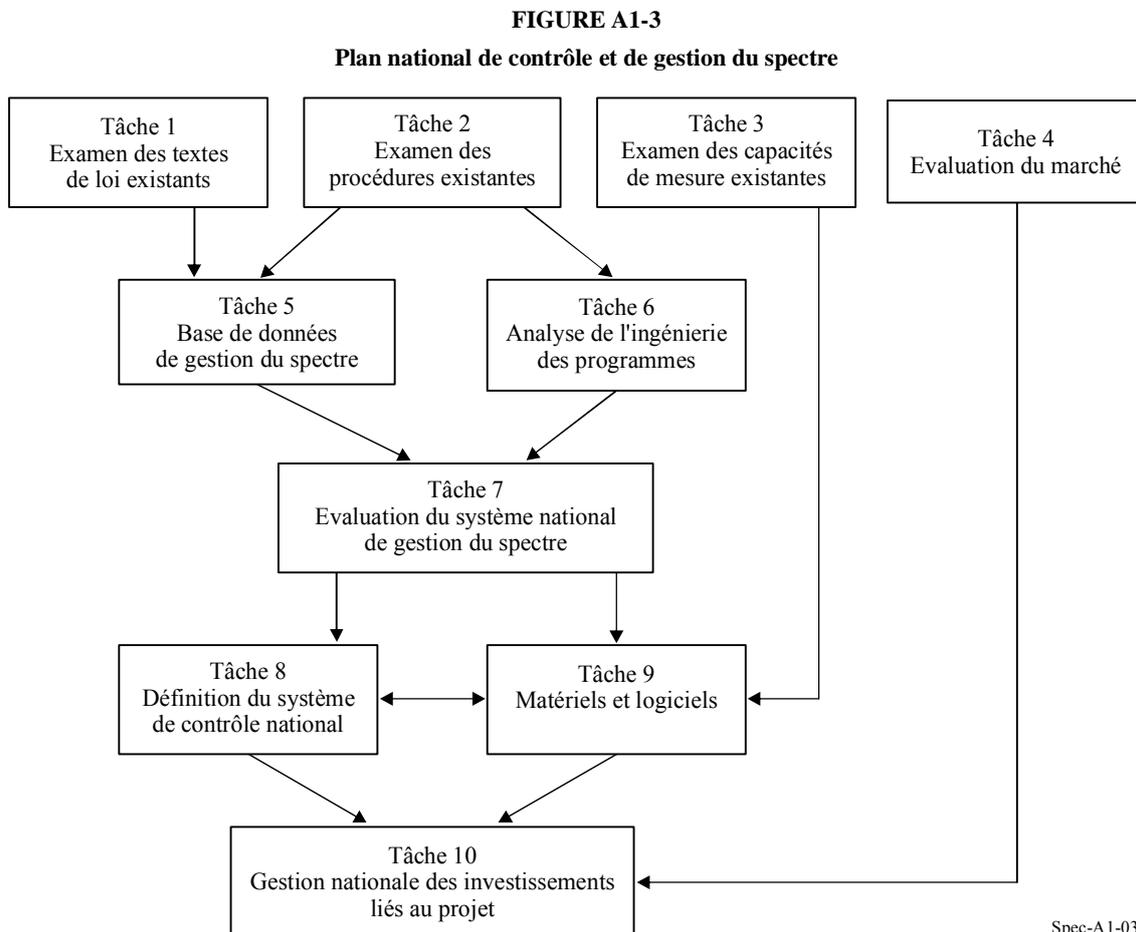
A3.4 Planification et conception du système

La présente section propose une approche technique ainsi qu'une méthode permettant de définir un ensemble de conditions en vue de la création d'un système national de gestion et de contrôle du spectre qui tienne compte des objectifs décrits dans les chapitres précédents. De la même manière, les principes énoncés permettent d'établir une structure de gestion du spectre s'articulant sur les fonctions de base à assurer, ainsi qu'il est décrit dans le Manuel de l'UIT-R sur la gestion nationale du spectre.

Certaines de ces fonctions peuvent être regroupées ou au contraire subdivisées selon les pratiques habituelles et ressources du pays considéré, ce qui détermine la taille de l'organisme de contrôle.

Compte tenu de tous les aspects juridiques et techniques découlant de la gestion du spectre dans un environnement mondial, la méthode décrite s'appuie sur un découpage en 10 tâches (Figure A1-3).

Ce modèle part du principe que le coût du terrain, de la construction des bâtiments et de la connexion aux services publics (eau, voirie, téléphone, électricité, combustibles, etc.) est pris en charge par l'organisme qui émet l'appel d'offres.



A3.4.1 Examen des textes de loi (et aspects juridiques) existants

La Tâche 1 permettra à l'administration de bien connaître les lois, nouvelles et existantes, au niveau régional et mondial, qui réglementent l'utilisation du spectre. Ces études, associées à la connaissance de la législation nationale, permettent d'établir un cadre juridique national adéquat.

A3.4.2 Examen des procédures (et méthodes) existantes

Cette tâche (Tâche 2) concerne les personnes chargées de la gestion et du contrôle du spectre. L'organisation prévue par le régulateur ainsi que les opérations de gestion doivent être examinées et évaluées. Il conviendra de bâtir un cadre pour harmoniser comme il se doit les demandes de licences, l'attribution et l'assignation des fréquences ainsi que les paiements afférents. Ces informations serviront à créer un système général de traitement de données correspondant aux besoins en matière de gestion et de contrôle du spectre.

A3.4.3 Examen des capacités de mesure existantes

Pendant la phase de planification du développement, il convient de faire le point sur la capacité et l'adéquation des dispositifs de mesure existants. On déterminera quelles sont les capacités de mesure spécifiques qui suffisent à maintenir le niveau actuel et celles que le projet doit améliorer pour répondre aux exigences à venir.

On examinera en outre l'éventualité de l'intégration de matériels acquis récemment dans le ou les systèmes existants.

Par ailleurs, il conviendra de faire le point sur les besoins futurs en ressources humaines au vu des nouvelles opérations de mesure à effectuer.

A3.4.4 Evaluation du marché

L'utilisation et la capacité d'utiliser le spectre radioélectrique sont des conditions essentielles au bon fonctionnement du marché des communications. Le spectre étant une ressource naturelle limitée, la seule façon de répondre aux demandes croissantes du marché des communications est de mettre en place de nouvelles technologies de modulation (transition vers le numérique par exemple) et d'ouvrir de nouvelles bandes de fréquences. Lors de la planification du développement d'un système de contrôle du spectre, les concepteurs doivent avoir pleinement conscience des demandes, sur le marché des communications, d'utilisation du spectre sur le long terme, des caractéristiques des nouvelles techniques de modulation et des nouvelles bandes de fréquences en attente d'ouverture. Au vu du développement rapide des systèmes de mesure, on veillera tout particulièrement à prévenir l'obsolescence du nouveau système, sans oublier qu'elle peut survenir peu de temps après la première mise en exploitation.

A3.4.5 Base de données de gestion du spectre

Pour une gestion efficace du spectre dans le pays, la base de données de gestion du spectre doit permettre d'analyser les éléments contenus dans la base d'un point de vue tant qualitatif que quantitatif. Il est donc nécessaire d'analyser les données (données existantes sous forme papier ou électronique) et de les intégrer dans le nouveau système de traitement de l'information, qui pourra rationaliser le flux d'informations et veiller à son stockage (voir la Recommandation UIT-R SM.1413 – Dictionnaire de données des radiocommunications aux fins de la notification et de la coordination).

A3.4.6 Analyse de l'ingénierie des programmes

Il convient de déterminer les fonctionnalités et modules d'application d'ingénierie nécessaires, lesquels doivent viser principalement les points suivants:

- assignation des fréquences;
- analyse des systèmes d'ingénierie;
- brouillages et compatibilité électromagnétique;
- calcul de la facturation des redevances;
- inspection;
- ratification – agrément;
- rapports/ratios.

Ces modules logiciels d'application doivent être directement reliés à la base de données de gestion administrative. Le Chapitre 7 du Manuel de l'UIT-R sur la gestion nationale du spectre contient une liste des modules de base requis et des modules facultatifs.

A3.4.7 Evaluation du système national de gestion du spectre et définition du système de contrôle national

Ces tâches permettent de déterminer les capacités de contrôle des fréquences et les besoins d'un système de contrôle national efficace. Dans le cas idéal, un système de réglementation nécessite l'établissement de services administratifs nationaux et régionaux et de divers types de stations de contrôle. Dans certains cas, les services administratifs et les stations de contrôle peuvent être hébergés dans les mêmes bâtiments, sachant que toutes les stations de contrôle ne bénéficieront pas des mêmes installations. Certaines stations ne devront contrôler que les ondes métriques et décimétriques tandis que d'autres devront surveiller les fréquences inférieures aux ondes métriques et/ou supérieures aux ondes décimétriques. La localisation d'émetteurs et de sources de brouillage inconnus constituera une activité importante nécessitant des fonctions de radiogoniométrie adéquates, y compris des stations mobiles.

Les premiers objectifs du système de contrôle des émissions radioélectriques sont d'assister les principales activités nécessaires à la gestion nationale du spectre et de vérifier la conformité avec les fréquences attribuées par l'UIT au niveau régional et mondial, mais aussi dans le cadre d'accords bilatéraux. Pour être efficace, le système de contrôle doit couvrir en permanence les principaux centres de population du pays. Les tâches et activités à réaliser par les systèmes de contrôle, ainsi que les équipements nécessaires, sont décrits dans le présent Manuel. Les spécifications techniques et le fonctionnement des systèmes de contrôle réglementaire nationaux seront documentés. Les tâches considérées doivent également viser les bases de données, existantes et/ou à créer, de gestion des fréquences, ainsi que les progiciels de planification connexes, qui seront nécessaires pour appliquer la politique élaborée.

A3.4.8 Evaluation des matériels et des logiciels

Selon les besoins apparus lors de l'exécution des tâches 5, 7 et 8 en matière de traitement des données (matériels et logiciels) et d'équipement des véhicules d'inspection, les experts responsables de cette tâche doivent optimiser et/ou appliquer les solutions trouvées, selon des critères de coût de maintenance/formation.

A3.4.9 Gestion nationale du projet

Après la phase de conception du réseau, le chef de projet, l'ingénieur spécialiste des données et l'analyste financier définissent les dépenses d'équipement et les besoins en matière d'investissement pour le réseau de contrôle du spectre. On suppose que le réseau national peut être construit, en partie, avec les moyens existants ou en développant les infrastructures déjà disponibles. Il faudra en outre évaluer les contraintes budgétaires que le pays souhaite éventuellement imposer au programme de contrôle du spectre et qu'il conviendra de respecter lors de l'élaboration du concept et des spécifications du système. Si le budget est limité, la commission compétente pourra formuler des recommandations concernant un programme échelonné dans le temps qui satisfasse aux contraintes budgétaires et aux besoins immédiats en matière de contrôle du spectre. Conformément à cette étude (exposé concernant l'investissement nécessaire pour le projet), la commission établit un rapport sur le projet, accompagné des documents d'appels d'offre, pour présentation aux autorités nationales.

A3.5 Elaboration des spécifications du système

A3.5.1 Centres nationaux et régionaux et stations de contrôle

Le plus souvent, les administrations des petits pays ont un centre de contrôle national et un nombre approprié de stations de contrôle fixes et/ou mobiles, qui relèvent directement du centre de contrôle national. Les administrations des grands pays peuvent juger souhaitable de disposer de centres de contrôle régionaux en plus du centre national. Dans les deux cas, le centre de contrôle national peut également comprendre un centre national de gestion du spectre, qui assure alors la gestion et le contrôle intégré et automatisé du spectre radioélectrique.

Les stations de contrôle mobiles, qui viennent compléter le réseau des stations fixes, assurent en pratique les mêmes fonctions que ces dernières, mais présentent l'avantage d'une installation facile, à peu près n'importe où sur le territoire, l'objectif étant de pouvoir contrôler plusieurs zones.

Selon leur spécificité, certaines stations de contrôle mobiles (camionnettes de recherche de brouillages, mesure de couverture, mesure de réseaux hyperfréquences) peuvent effectuer des mesures spécialisées. Pour déterminer leur type et leur nombre, on s'attachera, pendant l'étape de planification, à réaliser la meilleure structure possible et à optimiser les capacités de mesure. Pour évaluer le nombre nécessaire de stations mobiles, il convient d'utiliser comme premier critère la fréquence requise des opérations de mesure.

Lors de l'étape de définition des capacités de mesure du système, on tiendra compte, pour déterminer le nombre nécessaire de stations fixes, de la taille et des conditions géographiques de la zone ainsi que de la gamme de fréquences à contrôler.

Pour concevoir une station de contrôle mobile, il faut trouver un compromis entre la taille de l'équipement, le budget et les contraintes d'espace et de poids du véhicule, et donc déterminer s'il faut prévoir un véhicule polyvalent ou un véhicule spécialisé pour la mission à réaliser.

Autre critère important à examiner: l'existence, dans le pays, d'un réseau de maintenance et de fournisseurs de pièces de rechange pour les véhicules choisis.

A3.5.1.1 Organisation, nombre de postes opérateurs et équipement des stations de contrôle

Les éléments suivants sont à définir:

Centre de commande/station de contrôle	Organisation/tâches/moyens/interactions
Rang hiérarchique	National/régional/local/autre
Répartition des responsabilités	Gamme de fréquences (par exemple, des ondes myriamétriques jusqu'aux ondes décamétriques et/ou métriques/décimétriques et/ou centimétriques) Services à contrôler, domaines de services Liste des stations de contrôle devant être commandées directement et des stations mobiles Liste des centres de commande asservis de rang inférieur
Organisation du travail	Architecture(s) des systèmes informatiques ou des réseaux existants, logiciels d'automatisation Pour le nombre de postes opérateurs, indiquer: – l'horaire d'exploitation/le nombre d'équipes; – le rang hiérarchique et le partage des responsabilités entre opérateurs; – les procédures de suivi pour les tâches, rapports et documents (préciser). Méthodes et ressources d'archivage (données, audio, intervalle...) Ressources disponibles pour l'élaboration des rapports Problèmes de sécurité et procédures afférentes
Description du poste de travail	Commande de tout ou partie des fonctions remplies par les stations distantes Programme ou tâches automatisées et planifiées s'exécutant hors ligne dans les stations distantes Calcul des emplacements et affichage des résultats Accès à la base de données pour consulter les fichiers techniques de gestion des fréquences (interactivité) Affichage d'informations d'ordre géographique Production de rapports par voie automatique Temps de réponse prévu (à préciser pour chaque tâche) Nombre maximum de connexions simultanées avec des stations distantes et nature des connexions (données, son de qualité vocale ou de qualité radiodiffusion, etc.) Nombre maximum d'enregistrements simultanés (s'ils sont effectués dans le centre de commande) Interface homme-machine: langue(s), système d'exploitation et base de données

Centre de commande/station de contrôle	Organisation/tâches/moyens/interactions
Interaction avec le système de gestion des fréquences	Existe-t-il un système informatisé pour la gestion des fréquences? Si oui, lequel? Une interaction est-elle nécessaire avec le système de gestion des fréquences? Existe-t-il une base de données locale pour la gestion des fréquences?
Système d'information géographique (GIS)	De quel système dispose-t-on pour l'information géographique? Quel est son format aux fins de l'intégration? 2-D (carte routière, carte administrative, carte topographique), système vectoriel et/ou par points 3-D (modèle numérique de terrain) Coordonnées à utiliser (UTM, géographiques, etc.), échelles et résolutions, zones requises
Communications	a) Moyens à la disposition des opérateurs: <ul style="list-style-type: none"> – télécopie, téléphone, Internet (individuel ou partagé); – courrier électronique (avec les postes de travail, le ou les centres de commande, la ou les stations, le service de gestion des fréquences, etc.); – ressources de radiocommunication (publiques, privées, ondes décimétriques, métriques/décimétriques, centimétriques). b) Ressources à la disposition des stations distantes ou d'autres centres de commande: <ul style="list-style-type: none"> – réseaux privés, – systèmes privés du type point à multipoint (radiocommunications, hyperfréquences, RTPC, RNIS, lignes louées analogiques ou numériques, X.25, microstations, Internet, etc.), – rapidité et largeur de bande.

A3.5.1.2 Tâches de mesure

Il convient de noter qu'il appartient à chaque pays de définir les tâches de mesure et les gammes de fréquences associées à couvrir.

Pour définir les caractéristiques fondamentales des équipements de mesure pour chaque poste opérateur, il y a lieu de spécifier les points suivants:

Mesure des fréquences

- gamme de fréquences;
- précision requise (dispose-t-on d'un étalon pour la fréquence centrale?);
- classes d'émission (méthode de mesure).

Mesure du champ, du niveau et de la puissance surfacique

- nombre de mesures faites dans les stations fixes et les stations mobiles et méthodes de mesure;
- précision requise;
- gamme de fréquences;
- mesures spéciales:
 - mesures de la couverture (mesures le long d'un trajet), mesure des diagrammes d'antenne (par exemple, par hélicoptère).

Mesure de l'occupation du spectre y compris l'occupation des canaux

- émissions décimétriques, métriques/décimétriques;
- spécifications techniques des canaux: largeur de bande, écartement, type de modulation,
- durée de l'enregistrement du degré d'occupation: continu, de à (heure), jours spéciaux, répartition des balayages;
- vitesse d'exploration requise (logiciel);
- informations supplémentaires à enregistrer (par exemple, indicatif d'appel, identification automatique/décodage).

Mesure de la largeur de bande occupée

- mesures au moyen de la méthode à $\beta/2$ et/ou x-dB par analyse spectrale ou par logiciel;
- autres méthodes.

Mesure de la modulation

- profondeur de modulation;
- excursion de fréquence;
- taux d'erreur sur les bits (TEB);
- autres paramètres qualité;
- diagramme de constellation.

Radiogoniométrie et mesure de localisation

- concept du système;
- type de station: fixe, mobile, transportable, portable et précision requise;
- gamme de fréquences;
- localisation (par triangulation ou SSL), cartographie numérique du terrain requise;
- temps de réponse;
- espace requis pour l'antenne radiogoniométrique;
- affichage des relevés sur des cartes numériques.

Mesures d'identification

- classes d'émission;
- identification (par exemple décodage) des différentes émissions;
- «empreintes digitales»/caractéristiques de l'enveloppe d'un émetteur donné.

Contrôle des émissions provenant d'engins spatiaux

- Mesures des fréquences, de la largeur de bande et de la puissance surfacique;
- détermination des positions orbitales;
- taux d'occupation des bandes de fréquences dans les positions orbitales.

Radiodiffusion multimédia

- type: de Terre ou par satellite;
- qualité du signal reçu (équipement spécial nécessaire)/décodage.

Réseaux cellulaires à contrôler

- paramètres système pour identifier le type de réseau;
- force du champ;
- paramètres qualité (par exemple: qualité de réception, réponse impulsionnelle des voies, TEB);
- informations complémentaires (par exemple: transfert pour le cellulaire);
- nombre de canaux;
- distance maximale autorisée entre les points de mesure;
- distance maximale entre les points de mesure pour la même fréquence ou le même canal (valable pour toutes les vitesses autorisées);
- est-il nécessaire de recourir à un outil spécial d'évaluation des données et projette-t-on de combiner ce système avec le système mobile de contrôle (cartographie)?

Liaisons hertziennes à hyperfréquences y compris les liaisons par satellite

- équipements de réception et de mesure dans la gamme 1-50 GHz? pour quels services?

A3.5.2 Spécifications générales des équipements

En ce qui concerne les mesures choisies: choisir les équipements permettant de les effectuer dans chaque centre de contrôle, fixe (distant) et/ou station de contrôle mobile.

a) *Concept et architecture du système, centre, station, moyens de communication, logiciels*

Le bon fonctionnement d'une station de contrôle dépend directement de la qualité des antennes, des récepteurs ou des mesureurs de champ et des radiogoniomètres.

b) *Antennes*

Pour pouvoir déterminer les types et le nombre d'antennes, dans chaque station, nécessaires pour effectuer les mesures choisies, il convient de préciser les éléments suivants:

- Informations de base:
 - Polarisation (diversité) et gammes de fréquences (sous-gammes).
 - Distances approximatives par rapport à la région à contrôler (rayon).
 - Pointage géographique des antennes (en degrés).
 - Distance entre les antennes et le système de distribution des signaux.
- Système de distribution des signaux:
 - Gamme de fréquences.
 - Nombre de connexions de récepteur par antenne.
 - Prévoit-on une diversité d'antennes? Dans l'affirmative, pour combien d'antennes?
 - Mode de fonctionnement du système de distribution des signaux: manuel, semi-automatique ou automatique.
- Antennes équidirectives et antennes doublets:
 - Antennes de réception actives.
 - Antennes d'émission/réception.
 - Antennes pour le contrôle de la circulation aérienne.
- Antennes directives:
 - Antennes log-périodiques à polarisation rectiligne.
 - Antennes log-périodiques à double polarisation.
 - Antennes paraboliques avec système d'alimentation.

Pour toutes les antennes: gamme de fréquences (de 10 kHz à 50 GHz, ou au-delà); identification des types d'antenne en coopération avec le fournisseur du système.

c) *Récepteurs et radiogoniomètres*

- Bande de fréquences.
- Nombre de canaux de réception.
- Type analogique ou numérique.
- Commande manuelle ou automatique (ordinateurs, logiciels).

d) *Équipements additionnels*

Certains équipements additionnels permettront à la station de contrôle de fonctionner d'une manière plus efficace. On peut citer par exemple le matériel destiné à la présentation des résultats: machines de reproduction, oscilloscopes, enregistreurs audio-vidéo, imprimantes, etc., ou:

- Etalon de fréquence (10 MHz) et étalon temporel (rubidium, GPS ou GLONAS).
- Climatisation.

Pour le contrôle mobile:

- Système de repérage et de navigation (système à l'estime, GPS, GLONAS ou autre, ou système de navigation complexe).
- Compas pour déterminer l'azimut.

A3.5.3 Véhicules et dispositifs de contrôle

Les stations de contrôle mobiles opérant dans les bandes métriques et décimétriques doivent être conçues puis installées dans un véhicule. Equipées de l'ensemble des dispositifs nécessaires (équipements de contrôle, antennes de contrôle, modem(s), antenne(s) de communication, GPS et antenne GPS, câbles d'interconnexion, équipements de production d'énergie, armoires, bâtis, matériel de montage, dispositifs d'interface et borniers), elles constitueront un système autonome complet et en état de fonctionnement, et un élément fiable, qui fait partie intégrante du système national de contrôle du spectre. Les véhicules pourront également embarquer des instruments de mesure portables destinés au contrôle ponctuel ou à la localisation précise des sources de brouillage.

Lors de l'achat des véhicules, on examinera les paramètres suivants:

- Type du véhicule (camionnette, jeep, voiture de tourisme).
- Type du moteur (essence, diesel).
- Deux roues ou quatre roues motrices.
- Taille et poids.

A3.5.4 Logiciel

Le système de gestion et le système de contrôle devront intégrer un nombre important de logiciels afin d'automatiser les tâches de collecte et de traitement des données, ainsi que d'évaluation et d'analyse des brouillages. L'utilisation de logiciels de sauvegarde des résultats de contrôle du spectre dans des bases de données relationnelles et de corrélation de ces informations avec la base de données centrale des utilisateurs autorisés permettra de réduire considérablement le temps des recherches tout en augmentant la précision.

Le système applicatif et le logiciel de commande du système de contrôle seront développés conformément aux Recommandations UIT-R, en particulier la Recommandation UIT-R SM.1537, le Manuel sur la gestion nationale du spectre (2005) et les recommandations pertinentes du Manuel sur le contrôle du spectre.

Fonctionnalités du logiciel applicatif de contrôle:

- Logiciel de cartographie numérique.
- Logiciel de radiogoniométrie (intégré au logiciel de cartographie).
- Logiciel de gestion de bases de données.
- Logiciel du système d'archivage intelligent.
- Logiciel d'interfaçage entre la base de données des licences et les résultats des mesures de contrôle.
- Logiciel d'évaluation des résultats de mesure (filtrage des données, post-traitement et affichage graphique des données, valeurs de référence automatiques et recherche de conformité dans la base de données des licences).

Le programme applicatif de contrôle comportera une interface conviviale et sera décrit en détail dans les consignes et manuels afférents.

A3.5.5 Spécifications générales des unités des systèmes de contrôle

Les opérations de mesure, les équipements requis et les spécifications techniques minimales attendues sont précisés et publiés dans l'annexe technique du document d'avis d'appel d'offres.

Le nombre optimal de systèmes de mesure fixes, mobiles, portables et à main ainsi que la répartition des tâches de mesure sur ces différents systèmes doivent être déterminés lors de la planification de la mise en œuvre du projet. Pour de plus amples informations sur les spécifications techniques des unités des systèmes de contrôle, on se reportera au Chapitre 3 du présent Manuel.

A3.5.6 Spécifications concernant les services

A3.5.6.1 Etude de l'emplacement

L'emplacement choisi pour un système fixe de contrôle radioélectrique influe profondément sur l'efficacité du système et sur les coûts de revient. Le choix est dicté par des conditions géographiques, topographiques et climatiques, y compris le niveau de bruit local; les emplacements doivent être sélectionnés avec le plus grand soin afin de garantir la qualité de fonctionnement requise de l'ensemble du système.

Le plus souvent, c'est l'exploitant qui se charge de la recherche de l'emplacement. Il faut donc mettre à sa disposition des documents, des résultats de mesure, des cartes topographiques, etc.

Lorsqu'on élabore le concept d'exploitation des systèmes, on fixe le nombre des stations et on définit les tâches qui leur seront confiées, le choix des emplacements étant effectué conformément aux dispositions des Recommandations UIT-R. Pour les bandes d'ondes décimétriques, il est possible de choisir les emplacements en évaluant des prévisions de propagation radioélectrique obtenues par ordinateur. Ces évaluations doivent toutefois être complétées par des mesures sur site.

A3.5.6.2 Liaisons et réseau de télécommunication

- A-t-on énuméré les liaisons de télécommunication entre les diverses stations? Dans l'affirmative, on précisera la nature de ces liaisons (lignes physiques, liaisons hertziennes, hyperfréquences). Seront-elles fournies par l'administration? Existe-t-il des lignes de télécommunication?
- Quels signaux seront transmis (signaux vocaux, musique, données)?
- Description détaillée des lignes: type (réseau public à commutation, réseau spécialisé, ligne de télécommunication spécialisée dotée d'interfaces conformes aux Recommandations UIT-T (par exemple V.24)), qualité (débit de transmission en bauds, bit/s), longueur, système (deux fils, quatre fils).
- Description détaillée des liaisons hertziennes ou hyperfréquences: fréquence, mode, largeur de bande des canaux, systèmes d'émission/réception. Si des ordinateurs existants doivent être intégrés dans le système, il est indispensable d'en connaître en détail le type, la capacité mémoire, les caractéristiques d'interface, les périphériques et les logiciels. Afin d'éviter de brouiller la station de contrôle, un ou plusieurs émetteurs devront en principe être commandés à distance.
- Description détaillée de la structure: point à point, point à multipoint, anneau, étoile.
- Un masquage ou un chiffrement est-il nécessaire?

A3.6 Formation

Pour faire un usage efficace des moyens de contrôle, il est essentiel de prévoir, outre les équipements eux-mêmes, un programme de formation complet. Le soumissionnaire doit fournir un programme de formation approprié pour le personnel, à la fois théorique et pratique, dans le pays ou à l'étranger. Le programme comprend deux volets:

Une *formation en usine*, dispensée dans les locaux du fournisseur sur un équipement identique à celui qui est acheté par l'administration. La formation théorique doit comprendre un cours sur les éléments de base du contrôle (et de la gestion) du spectre dispensé par des instructeurs ayant les qualifications adéquates et dotés d'une expérience personnelle.

Une *formation sur le terrain*, dispensée sur le site de contrôle une fois les équipements installés. La majeure partie du temps restant doit être consacrée à l'apprentissage de tâches de contrôle de plus en plus complexes sur le lieu de travail même. Un stage final d'information permettra de montrer comment valider un système national de contrôle du spectre à partir des informations de contrôle.

Il faut convenir du nombre des personnes prenant part à la formation et de leurs compétences, du lieu et de la durée de la formation. Cela suppose l'organisation de cours de formation distincts à plusieurs niveaux.

A3.7 Maintenance et réparations

Il convient de fixer les principes à respecter, dans toutes les circonstances, pour la maintenance et les réparations (par exemple: quels sont les matériels à réparer à l'échelon local, à l'échelon central et par le ou les fournisseurs?).

Stockage des pièces de rechange: les points à examiner sont les suivants:

- a) Composants de base.
- b) Sous-ensembles (par exemple, cartes de circuits imprimés).
- c) Châssis entiers de bâtis ou matériels enfichables.
- d) Equipements critiques (tenir compte du MTBF: temps moyen entre deux pannes).

Il faut aussi vérifier la période pendant laquelle on souhaite stocker le matériel (tenir compte, à cet égard, du MTTR: temps moyen de réparation).

A3.8 Documentation

La documentation relative aux équipements et aux systèmes est fournie dans la ou les langues nécessaires.

La fourniture d'une documentation détaillée fait partie du projet.

A4 Etape de mise en œuvre – Processus d'appel d'offres

A4.1 Spécimen d'avis pour les appels d'offres concernant le contrôle du spectre

L'avis dépend du type de procédure d'appel d'offres. Dans le cas des appels d'offres concernant le contrôle du spectre, l'avis consiste en une annonce publicitaire invitant les soumissionnaires à mettre en œuvre un projet. En règle générale, la législation nationale précise le format de l'avis, les renseignements obligatoires qui y figurent et les règles applicables à la procédure d'appel d'offres. L'avis comporte une brève description du contexte du projet, la portée des travaux à effectuer ainsi que les devoirs des soumissionnaires et du client, éventuellement accompagnés de renseignements sur les inspections sur site et des dates limites de demande de précisions sur l'appel d'offres. Les spécifications techniques du système de contrôle sont détaillées en annexe de l'avis.

Les procédures d'appel d'offres, y compris la publication, sont régies par le droit national.

A4.1.1 Le dossier relatif à l'avis d'appel d'offres pour le contrôle du spectre doit comprendre les éléments suivants

A4.1.1.1 Conseils pour répondre à l'appel d'offres

Cette section du dossier d'appel d'offres fournit les informations nécessaires aux soumissionnaires pour élaborer et présenter des offres solides, qui répondent aux exigences de l'acheteur. Elle décrit les étapes fondamentales d'un appel d'offres, l'ouverture des plis et l'évaluation, ainsi que les conditions d'attribution des marchés.

- Mise à disposition des informations par l'administration (l'acheteur), qui a lancé l'appel d'offres concernant la fourniture et l'installation du nouveau système.
- Résumé (du projet).
- Disponibilité (et parfois prix) des annexes techniques à l'avis d'appel d'offres.
- Instructions concernant le format et le contenu requis du dossier d'appel d'offres.

(Il est très important de remplir clairement et lisiblement le formulaire de candidature de sorte que les candidats inscrits puissent recevoir des informations sur les possibles modifications ou précisions concernant le contenu du dossier d'appel d'offres.)

- Les soumissionnaires doivent explicitement annoncer leur participation et faire la preuve des compétences préalables requises; ils doivent montrer qu'ils ont les capacités financières, techniques et de production nécessaires pour exécuter le contrat et remplir les critères de compétence spécifiés:
 - Références certifiées (expérience dans l'exécution de contrats analogues, en précisant le nom des anciens clients).
 - Ressources en personnel et en équipement, et moyens de construction et de fabrication.
 - Stabilité économique et financière.
 - Système d'assurance qualité.
- Autorisations du fabricant (si le fabricant n'est pas le fournisseur).
- Demandes:

Les soumissionnaires souhaitant obtenir des précisions sur l'appel d'offres doivent soumettre leur demande par télécopie ou par courriel:

 - Nom(s), adresse et moyens de communication.
 - Date limite de demande d'information par écrit de la part des soumissionnaires (avant la réunion préparatoire à l'établissement des offres).
 - Date avant laquelle les administrations sont tenues de répondre à tous les soumissionnaires inscrits.
- Réunion préparatoire à l'établissement des offres (date, heure et lieu de la réunion de clarification, en règle générale pas moins de trois semaines avant la date limite de soumission des offres).

Le soumissionnaire supportera l'ensemble des coûts liés à la préparation et à la soumission de son offre; l'acheteur ne sera aucunement responsable de ces coûts ou tenu de les prendre en charge.

- Visite technique sur les sites d'installation:

Deux options:

Option 1: Les soumissionnaires qui le souhaitent peuvent conduire une visite du site pour s'assurer que l'équipement qu'ils veulent proposer répond aux exigences précises de l'appel d'offres. Les coûts engendrés par la visite du ou des sites sont supportés par le soumissionnaire.

Option 2: Très souvent, l'administration précise dans son appel d'offres que les soumissionnaires sont tenus de faire visiter leur site. Pour chaque site visité, l'administration établit un rapport officiel de visite du site, lequel est signé par les deux parties. Ces documents doivent accompagner l'offre. Le manquement à l'obligation par un soumissionnaire de faire visiter un site est un motif de disqualification.

- Instructions aux soumissionnaires:

Le dossier d'appel d'offres doit fournir à tout soumissionnaire potentiel toutes les informations dont il a besoin pour préparer son offre d'équipements et de travaux. Le soumissionnaire devra examiner toutes les instructions, tous les modèles, toutes les conditions, spécifications et autres informations contenus dans le dossier. Le soumissionnaire est responsable de la qualité des renseignements demandés dans le dossier d'appel d'offres et de la préparation d'une offre conforme à tous égards aux exigences dudit dossier. Toute carence peut entraîner le rejet de son offre.

- Dépôt des offres:

- Adresse (pour le dépôt des offres).
- Nombre d'offres à fournir (originaux et copies).
- Authentification de l'offre (signature par une ou des personnes dûment autorisées à signer au nom du soumissionnaire).
- Cachetage et marquage des offres.
- Date limite de dépôt des offres (toute offre reçue par l'acheteur après l'expiration du délai de dépôt des offres sera écartée et renvoyée au soumissionnaire sans avoir été ouverte).
- Aspects linguistiques de l'offre (langue de travail, documentation technique comprise dans l'offre, manuels d'instruction, interface logicielle, etc.).

- Modèles d'offres.
- Prix et devise.
- Conformité à des normes internationales répondant aux exigences figurant dans les recommandations les plus récentes de l'UIT sur le sujet.
- Conception conforme à l'état de l'art et utilisation de techniques modernes (niveau élevé de qualité et de fiabilité).
- Livraison.
- Garanties.
- Renseignements spécifiques à fournir dans la proposition.

En ce qui concerne les législations nationales et les principes appliqués par les administrations: «Les propositions doivent contenir, sans nécessairement s'y limiter, les renseignements suivants»:

Par exemple:

- Proposition concernant l'organisation des travaux (organigramme(s), plan de travail, etc.).
- Description détaillée du plan de travail et de la livraison finale des produits.
- Nom et curriculum vitae de toutes les personnes affectées à chaque tâche.
- Déclaration de conformité/non-conformité.
- Ecart par rapport aux spécifications, en particulier si le soumissionnaire peut prouver que l'option qu'il offre sera à tous égards satisfaisante et pourra pleinement satisfaire aux besoins de l'administration, en totale conformité avec les spécifications techniques. L'option proposée doit être entièrement expliquée.
- Formation sur le lieu de travail. La proposition doit indiquer clairement: le curriculum vitae du personnel de formation, les objectifs, le groupe auquel la formation est destinée, les compétences de départ souhaitées et le nombre de stagiaires.
- Garantie de soumission (garantie ou caution de soumission).

Ce document contient les garanties bancaires du soumissionnaire: si le client retire les conditions proposées dans son offre avant l'expiration de la période de validité, la banque verse à l'acheteur le montant de la garantie (généralement de 2% à 5% du prix proposé par le soumissionnaire).

- Garantie de bonne exécution (ne sera demandée qu'au soumissionnaire ayant emporté le marché).
- Validité des propositions (elles doivent être valides pour une période de temps définie, à partir de la date limite de dépôt des offres fixée par l'acheteur).
- L'original des propositions techniques et commerciales doit être signé par un représentant officiel juridiquement habilité à conclure un contrat au nom du soumissionnaire; en général, chaque page de l'original doit être certifiée.
- Evaluation des offres:
 - Date, heure et lieu de l'ouverture des offres cachetées.
 - Spécifications détaillées des modalités d'échanges de vues et des méthodes appliquées lors de l'évaluation des offres.
- Conditions de disqualification:
 - Si elle est incomplète, l'offre est rejetée (par exemple, absence des cautions de soumission, validité de l'offre non mentionnée).

Les offres peuvent être rejetées:

- Après que l'évaluation technique a montré qu'au moins un des paramètres techniques recommandés ne remplit pas l'exigence minimale précisée dans le document d'appel d'offres.

Les soumissionnaires sont informés de la décision au plus tard à la date indiquée dans l'appel d'offres ou à la date légale (par télécopie puis par lettre).

A4.1.1.2 Principaux éléments du contrat

- Objet du contrat.
- Obligations du client.
- Obligations du soumissionnaire.
- Conditions de paiement (calendrier et méthode de paiement).
- Conditions de garantie.
- Procédure à suivre en cas de non-respect du contrat.
- Procédure à suivre en cas de force majeure.
- Procédure à suivre en cas de contestation.
- Gestion des informations confidentielles.
- Modification du contrat.
- Autres instructions.

A4.1.1.3 Prescriptions techniques

- Objet de l'offre.
- Description du système.
- Description des éléments inclus dans le projet (par exemple, logiciels, infrastructures, services).
- Autres éléments inclus (par exemple, garanties, pièces de rechange, support logiciel et mise à jour des logiciels).
- Spécifications techniques minimales pour chaque paramètre du système et chaque instrument de mesure.

A4.2 Modèle de l'offre du soumissionnaire**A4.2.1 Introduction**

- Introduction du soumissionnaire et de son domaine d'expertise.
- Avantages du système proposé.
- Comment le système proposé peut-il s'adapter aux besoins futurs?
- Capacité à s'intégrer dans le système existant du client.
- Volonté de prendre part à des développements ultérieurs.
- Liste des sous-traitants proposés.
- Période de validité de l'offre.

A4.2.2 Caractéristiques techniques générales

- Opérations de mesure réalisables (par exemple, conformément aux normes pertinentes).
- Gamme de fréquences en exploitation.
- Précision des données mesurées.

A4.2.3 Fonctions du système

- Caractéristiques du système.
Démonstration de l'adéquation entre les caractéristiques du système et les exigences techniques contenues dans l'appel d'offres.

A4.2.4 Méthodes de développement du système

- Choix des sous-traitants locaux, installation et lancement.

A4.2.5 Garanties techniques

- Délai de garantie (système, logiciels).
- Durée de disponibilité des pièces de rechange après expiration du délai de garantie.

A4.2.6 Description détaillée des éléments suivants

- Tâches effectuées.
- Présentation des produits livrés.
- Caractéristiques générales du système.
- Spécifications techniques de chaque instrument de mesure composant le système.
- Installation conformément aux spécifications.
- Commande locale et à distance.
- Stockage et transfert des données.
- Possibilités de développement ultérieur.
- Caractéristiques du logiciel et intégration avec la gestion du spectre.
- Solutions d'alimentation en électricité.
- Types et caractéristiques des antennes.
- Type(s) et données techniques du ou des véhicules.
- Solutions adoptées concernant la santé et la sécurité.
- Etalonnage et autotest.
- Calendrier de mise en œuvre et dates limites de livraison.
- Tâches attendues de la part du client.
- Formation.
- Résolution des problèmes donnant lieu à controverse.
- Etc. (par exemple, offre de contrats de maintenance pour le système et les logiciels).

A4.2.7 Présentation des références

- Stabilité économique et financière.
- Références certifiées.
- Système de contrôle de la qualité.
- Copie du document d'enregistrement de la société au registre du commerce.
- Autorisations des fabricants.
- Liste des sous-traitants agréés.

A4.2.8 Diagramme fonctionnel du système**A4.2.9 Prix**

- Prix des composants et prix total.
- Conditions de paiement.

A4.3 Modèle de contrat

Le contrat est un échange d'accords juridiquement contraignant entre les parties. La législation veille au respect du contrat. La rupture de contrat est reconnue par la loi et il existe des voies de recours judiciaires.

Le contrat doit clairement définir le champ des travaux à exécuter, les biens à fournir, les droits et obligations de l'acheteur et du fournisseur ou entrepreneur.

Dispositions préliminaires

- Dénomination et adresse des parties contractantes.
- Préliminaires au contrat.
- Champ d'application, nature et objet du contrat.
- Terminologie utilisée dans le contrat.
- Langue de travail.

Statut juridique des parties, leurs droits et obligations

- Droits et obligations des fournisseurs concernant:
 - la sous-traitance;
 - l'expédition et l'installation du système et de ses composants;
 - les garanties;
 - la réparation et la maintenance du système;
 - le développement, la correction et la maintenance du logiciel;
 - les services connexes;
 - les instructions relatives à la formation.
- Droits et obligations du client concernant:
 - les instructions générales;
 - le droit de contrôle exercé par le client;
 - l'obligation de coopération;
 - l'obligation de paiement;
 - les obligations relatives à la formation.
- Législation applicable et instance compétente pour la résolution des litiges.

Objet du contrat

- Objet du contrat.
- Logiciels et droits connexes.
- Dispositions concernant la fin du contrat.
- Conformité au regard des statuts, des législations, des réglementations, etc.:
 - Lieu d'installation et date de fin.
 - Méthode d'exécution.
 - Date de fin du contrat.
- Procédure de réception:
 - Réception en usine avant la procédure de réception.
 - Règles générales applicables à la procédure de réception du système.
 - Lieu d'exécution de la procédure de réception.
 - Compte rendu à établir lors de la procédure de réception.
 - Procédure de réception des stations fixes et mobiles.
 - Réception du logiciel et du système complet.
- Emballage, expédition et assurance.
- Mise à niveau des produits.
- Services additionnels:
 - Formation.
 - Services à fournir pendant la période de garantie.

Responsabilité contractuelle de bon fonctionnement; règles régissant l'impossibilité de fonctionnement

- Responsabilité du fournisseur en cas de mauvais fonctionnement:
 - Obligations du fournisseur.
 - Sanctions imposées au fournisseur.
 - Obligation faite au fournisseur de prendre des mesures correctives.
 - Obligation de garantie du fournisseur.
- Responsabilité du client en cas de mauvais fonctionnement.
- Impossibilité de remplir les obligations.

Prix et conditions de paiement

Tous les prix doivent comprendre ce qui était requis dans le document d'appel d'offres.

Paievements relatifs à la production, à l'installation du système et aux services additionnels connexes:

- Prix contractuel total.
- Paiement du prix contractuel
 - Obligations de paiement additionnelles.

Les prix doivent figurer hors taxes, conformément aux réglementations nationales.

Dispositions diverses et dispositions finales

- Obligation de coopération des parties, obligation de confidentialité.
- Règlement des litiges, application des règles légales, droit applicable.
- Force majeure.
- Modification(s) du contrat.
- Validité et résiliation du contrat.
- Autres contrats conclus entre les parties.
- Interlocuteur(s) responsable(s) dûment habilité(s) par les parties.
- Pénalités.
- Indemnisation.

Annexes au contrat

Les annexes au contrat suivront les procédures définies par l'UIT, par la Banque mondiale ou par l'administration (l'acheteur).

Dans tous les cas, l'offre figurera en annexe au contrat.

A4.4 Evaluation et comparaison des offres et attribution du marché

Lors de l'évaluation et de la comparaison des offres, l'administration (l'acheteur) doit suivre une procédure d'évaluation prédéfinie, par exemple:

- Procédures définies par l'Union internationale des télécommunications (UIT).
- Procédures définies par la Banque mondiale.
- Autres procédures dans le cas où l'administration (l'acheteur) n'est pas tenue de suivre les procédures de l'UIT ou de la Banque mondiale.

Une commission d'évaluation des offres désignée par l'acheteur évalue les offres des points de vue financier, juridique et technique. La méthodologie d'évaluation est définie par l'acheteur et décrite en détail dans le rapport d'évaluation de la commission.

Les offres présentées par les soumissionnaires peuvent être décachetées en présence des représentants des soumissionnaires à la date et à l'endroit précisés dans l'appel d'offres. Les offres non accompagnées d'une caution de soumission peuvent être rejetées.

Pendant la phase d'évaluation, l'acheteur est en droit de demander aux soumissionnaires des éclaircissements quant à leurs offres.

A4.4.1 Procédures définies par l'UIT

Evaluation des offres:

- Le groupe d'évaluation est constitué par l'UIT *ou* par l'UIT et l'acheteur.
- L'évaluation technique et l'évaluation commerciale sont menées séparément (l'évaluation technique en premier):
 - L'évaluation technique doit aborder les grands points suivants:
 - Récepteur de mesure, système d'antennes, station de travail, logiciels, système optionnel de radiogoniométrie, essai de réception en usine (ERU), livraison, formation (voir l'Annexe 1: exemple de l'UIT concernant l'analyse technique des offres).
 - L'évaluation commerciale doit aborder les grands points suivants:
 - Prix, conditions de paiement et conditions commerciales, évaluation des aspects juridiques (voir l'Annexe 2: Exemple de l'UIT concernant l'évaluation commerciale et juridique).
 - Avis sur les problèmes techniques.
 - Fonctionnalités.
 - Avis d'experts.
 - Prix global.
 - Rejet des offres incomplètes.
 - Confidentialité (aucune information concernant l'examen, les éclaircissements ou l'évaluation ne doit être communiquée aux soumissionnaires ou à toute autre personne concernée).
 - Les soumissionnaires doivent être informés des décisions dès que possible (par télécopie puis par lettre).

Rejet des offres:

- L'UIT se réserve le droit de rejeter une offre, quelle qu'elle soit, et de lancer un deuxième appel d'offres.
- Il n'y a pas d'obligation d'accepter l'offre du **moins disant**.

A4.4.2 Procédures définies par la Banque mondiale COÛT ou PRIX

NOTE – La terminologie utilisée est celle de la Banque mondiale.

Lorsque la Banque mondiale (WB) (BIRD ou IDA) conclut un accord de prêt avec l'un de ses membres, elle fournit à l'emprunteur des LIGNES DIRECTRICES, regroupées dans un document intitulé «Rapport d'évaluation des offres». Ces lignes directrices aident l'emprunteur à réaliser une évaluation des offres conforme aux *Directives: Passation des marchés financés par les prêts de la BIRD et les crédits de l'IDA – janvier 1995 (révisées en janvier 1996, août 1996 et septembre 1997)*. Voir notamment le § 2.53 et les § 2 et 4 de l'Annexe 1.

(Voir dbusiness@worldbank.org)

NOTES:

- 1 D'après le § 1.6 et la note de bas de page N° 9 des Directives, certains pays ne sont pas autorisés à bénéficier de contrats financés par la WB.
- 2 Le pays de l'emprunteur peut exclure certains pays ou territoires de l'offre si l'emprunteur peut faire valoir le critère indiqué au § 1.8.
- 3 Le Conseil de sécurité des Nations Unies peut interdire, au titre du Chapitre VII de la Charte des Nations Unies, l'octroi d'un prêt par la WB mettant en jeu certains pays.

Le rapport d'évaluation des offres (REP) décrit la procédure que doit suivre l'emprunteur pour évaluer les offres qu'il a reçues. En outre il importe, dans tous les cas, d'appliquer les procédures d'évaluation et de demande décrites dans la section Instructions du document d'appel d'offres. Le REP contient une lettre d'avis; ses annexes sont envoyées à la WB.

Pendant la phase de préparation du projet, l'emprunteur doit étudier les tableaux d'évaluation figurant dans les lignes directrices afin d'évaluer les besoins en personnel pour l'évaluation des offres. La WB peut expliquer en détail la procédure à suivre. La WB encourage l'emprunteur à sous-traiter, auprès de consultants expérimentés, l'évaluation des offres relatives à des projets complexes. Le prêt peut être utilisé pour financer la contribution de ces consultants si l'accord le permet (Directives, Annexe 1, § 2-C).

Le REP comprend les éléments suivants:

*Préambule**Formulaires – usage**Formulaires classiques pour l'évaluation des offres*

LETTRE D'AVIS

- a) Si le projet fait l'objet d'un premier examen par la WB (accord de la WB avant décision de passation du marché), l'emprunteur (ministère, organisme ou service) doit envoyer le REP à la WB sous couvert d'une lettre d'avis. Ladite lettre doit indiquer les conclusions de l'évaluation et fournir toutes les informations complémentaires susceptibles de faciliter l'évaluation de la WB.
- b) S'agissant des projets faisant l'objet d'une procédure d'examen a posteriori par la WB (accord de la WB non requis pour la passation du marché), le rapport d'évaluation et une copie signée du contrat doivent être présentés à la WB avant toute demande de paiement (ou simultanément) (Directives – Annexe 1 et accord de prêt).

TABLEAU 1: Identification

Description de l'accord de prêt, en particulier procédure de l'évaluation du coût et procédure de l'évaluation par la WB (données administratives)

TABLEAU 2: Procédures d'évaluation

Publications des offres (données administratives)

TABLEAU 3: Dépôt et ouverture des plis

Conformément au § 2.44 des Directives, ce tableau indique la date, l'heure, le nombre et la validité des offres. Si la procédure de soumission est en deux étapes (technique et économique), il convient de fournir ce tableau pour chaque étape. Le compte rendu de la séance d'ouverture des plis doit être envoyé à la WB et à chaque fournisseur.

TABLEAU 4: Prix des offres (lu publiquement)

Toute modification apportée aux prix lus en public (rabais, options, variantes, etc.) doit figurer au Tableau 4.

TABLEAU 5: Examen préliminaire

Conformité avec les obligations contenues dans l'appel d'offres, y compris les spécifications techniques. Le processus d'évaluation doit commencer dès l'ouverture des plis. L'examen préliminaire consiste à identifier les offres et à rejeter celles qui sont incomplètes, non recevables ou non conformes aux dispositions essentielles de l'appel d'offres et qui, par conséquent, ne doivent pas être évaluées. Il convient d'examiner les points suivants:

- Vérification: identification des éléments manquants.
- Critère de provenance.
- Garantie de l'offre.
- Conformité avec les dispositions contenues dans l'appel d'offres et les spécifications techniques.

L'évaluation repose sur les principes suivants:

- L'emprunteur ne doit évaluer les offres qu'au regard des obligations et des informations contenues dans l'appel d'offres.
- Pendant le processus d'évaluation, l'emprunteur peut demander au fournisseur d'apporter un complément d'information en cas d'ambiguïté ou d'incohérence relevée dans son offre. Ces demandes sont présentées par écrit. Le fournisseur ne peut modifier ni le prix ni la nature des livrables, des travaux ou des services proposés, sauf en cas d'erreur de calcul (Directives, Annexe 4, § 10). Les conditions exigibles concernant le prix ou l'offre ne peuvent être modifiées.

TABLEAU 6: Corrections et rabais inconditionnels

Ce tableau indique, pour chaque fournisseur, le prix de l'offre, les corrections (erreurs de calcul), les rabais et le montant total de l'offre.

TABLEAU 7: Taux de change

Ce tableau indique les taux de change utilisés pour l'évaluation.

TABLEAUX 8A et 8B: Conversion de devises

Conformément à la devise choisie par l'emprunteur et mentionnée dans l'appel d'offres, ce tableau indique le montant total de l'offre dans la devise de l'emprunteur.

TABLEAU 9: Ajouts pour omission, ajustements et variations de devise

Le Tableau 9 indique les prix totaux de l'offre.

- Les omissions et erreurs constatées dans les offres doivent être compensées en ajoutant au prix de l'offre le montant estimé de ces lacunes. (Lorsque les éléments correspondant aux omissions de certaines offres figurent dans d'autres offres, il est possible d'utiliser la moyenne des prix cités dans les autres offres.) Parallèlement, il est possible de recourir à des sources extérieures, telles que publication de prix, barèmes de coûts de transport, etc.
- Ajustements: Les instructions figurant dans l'appel d'offres indiquent le critère de mise en œuvre et d'exploitation.

Afin de faciliter les comparaisons, les offres, y compris lorsqu'elles comportent des écarts mineurs par rapport aux instructions figurant dans l'appel d'offres, peuvent être jugées acceptables s'il est possible, après une analyse détaillée, de chiffrer financièrement les problèmes de conformité sous forme d'une pénalité, qui vient s'ajouter aux prix des offres.

La méthode employée pour évaluer ces facteurs doit faire l'objet d'une description détaillée dans le rapport d'évaluation et être pleinement conforme avec les instructions figurant dans l'appel d'offres.

La WB autorise parfois l'utilisation d'un système à points en ce qui concerne l'achat des fournitures. Dans ce cas, les ajustements sont exprimés en points (voir le § 2.6.5 des Directives). L'emprunteur peut obtenir, auprès de la WB, des informations détaillées sur l'évaluation des offres via le système à points.

TABLEAUX 10A et 10B: Droits relatifs à la priorité donnée aux achats et aux travaux effectués dans le pays
Si l'appel d'offres autorise un recours préférentiel au marché national, il est possible d'appliquer les droits de douanes du pays ainsi que la marge de préférence indiquée dans les dispositions de l'appel d'offres.

TABLEAU 11: Etat récapitulatif de l'évaluation des offres et proposition d'attribution du marché

Le Tableau 11 résume les renseignements fournis dans les tableaux précédents (prix annoncés lors de la séance d'ouverture des plis, correction d'erreurs, rabais, ajustements) et indique le candidat qui remporte le marché.

Annexe I: Instructions pour l'évaluation des offres

Annexe II: Séance d'ouverture des plis. Informations sur les offres

Annexe III: Pays non éligibles

Annexe IV: Exemple d'examen préliminaire

Annexe V: Rapport d'évaluation des offres. Contenu.

A4.4.3 Procédures dans le cas où l'administration (l'acheteur) n'est pas tenue de suivre les procédures de l'UIT ou de la Banque mondiale

Avant le début de l'évaluation, la commission d'évaluation décide de la méthodologie à utiliser pour désigner le candidat qui remportera le marché. On peut envisager les méthodologies suivantes:

- Approche par attribution de notes à partir de formules.
- Méthode par pondération.
- Etude de conformité de type «oui/non».
- Etude de conformité associée à une étude des prix proposés.

A5 Etape finale – Procédure de réception

A5.1 Réception en usine

Le fournisseur doit réaliser (à ses frais), sur le site de fabrication, tous les essais et/ou inspections de l'équipement et de toute partie de l'équipement ainsi qu'il est spécifié dans le contrat, conformément aux documents de réception en usine présentés par lui-même, modifiés ou non par l'administration (accord mutuel).

A5.2 Procédure d'essai de réception sur site

Le fournisseur communique à l'administration le ou les documents de réception sur site et l'avise suffisamment à l'avance des essais et/ou inspections, ainsi que du lieu et de la date et heure des essais et/ou inspections. Les essais ont pour objet de démontrer que tous les éléments de l'équipement sont présents, qu'ils sont correctement assemblés et reliés entre eux, qu'ils fonctionnent correctement selon les spécifications techniques (inspection visuelle et essais techniques). Un essai final de l'ensemble du système, y compris les liaisons de communication, doit être mené en tenant compte des responsabilités respectives de l'administration et du fournisseur en ce qui concerne les fournitures.

La réception du système est en général suivie d'une période de garantie d'une année, au cours de laquelle il pourra être demandé une caution de garantie au fournisseur. Dans certaines administrations, une réception provisoire est accordée si tous les essais de réception ont été menés avec succès, la réception définitive étant accordée à la fin d'un certain délai (en général la période de garantie).

A5.2.1 Réception (ou réception provisoire dans le cas de la réception provisoire et définitive)

La réception de l'équipement ou de toute partie de l'équipement a lieu lorsque:

- les essais de réception ont été achevés avec succès et les garanties fonctionnelles observées;

- les essais de réception n'ont pas été achevés avec succès ou n'ont pas été réalisés pour des raisons indépendantes de la volonté du fournisseur.

La réception ne doit pas être refusée pour des anomalies ou des problèmes mineurs. La réception a lieu et les anomalies et problèmes sont notés. Ils doivent être corrigés au cours de la période de garantie.

La liste ci-après donne un exemple de rapport concernant la procédure de réception sur site d'une station fixe à ondes décimétriques/métriques/décimétriques:

a) *Objet*

Le document décrit les procédures contractuelles de réception d'une station fixe de contrôle du spectre.

b) *Inspection visuelle*

Opérations à mener pour vérifier la présence de tous les éléments énumérés dans la déclaration de configuration contractuelle:

- systèmes d'antennes, commutation, câbles, protection contre la foudre;
- mâts, pylônes (haubans, peinture, protection contre la foudre);
- inspection des bâtiments, câbles, dispositifs de sécurité, châssis, bâtis, ordinateurs, récepteurs, système d'alimentation;
- implantation des logiciels;
- manuels sur les équipements, les logiciels et le système;
- marquage (homologation des équipements);
- contrôle de la documentation; la liste des documents livrés figure en annexe du rapport de réception.

c) *Essais techniques*

- Vérification des systèmes d'alimentation (alimentation principale et système d'alimentation fonctionnant sans interruption – USP).
- Fonctions de radiogoniométrie en ondes décimétriques/métriques/décimétriques: fréquence fixe, balayage, emplacement.
- Mesures des ondes décimétriques/métriques/décimétriques selon l'UIT: fréquence fixe, balayage de fréquence, exploration des mémoires.
- Analyse des signaux.
- Missions manuelles et automatiques: contrôle systématique des émetteurs, taux d'occupation des fréquences, recherche d'émetteurs inconnus.
- Equipement de test intégré (BITE, *built integrated test equipment*).

Les résultats des essais réalisés pendant la réception seront consignés dans le rapport concernant les essais de réception signé par l'administration et le fournisseur.

A5.2.2 Réception définitive

Ce paragraphe ne s'applique pas lorsque la réception est suivie d'une période de garantie assortie d'une caution de garantie. Dans le cas d'une réception provisoire suivie d'une réception définitive, un certificat de réception provisoire est signé par les deux parties, conformément aux termes administratifs définissant la période de garantie (généralement d'une année); après cette période, le certificat de réception définitive est accordé.

Complément 1

à l'Annexe 1

Exemple de l'UIT concernant l'analyse technique des offres

TABLEAU A1-1

Paramètres fonctionnels	Spécifications	Cahier des charges	SOCIÉTÉ Y basique	SOCIÉTÉ X
Commande	Contrôle et supervision des signaux radioélectriques	Fonctions d'exploitation, pour des besoins de formation	CONFORME	Option 1: Logiciel uniquement – NON CONFORME Option 2: Matériel + logiciel Seule l'option 2 est prise en compte dans ce qui suit.
1 Gamme de fréquences du récepteur de contrôle:	Gamme de fréquences: 100 kHz – 2,5/3 GHz	La gamme de fréquences doit inclure tous les services radioélectriques opérant dans les bandes indiquées	CONFORME	CONFORME avec quelques réserves (voir remarque à la dernière ligne)
2 Antennes de réception:	Gamme de fréquences: 100 kHz – 2,5/3 GHz	Selon les caractéristiques du système	CONFORME	CONFORME
3 Modes de fonctionnement:	Manuel et automatique	Le système doit permettre de faire la différence entre le contrôle manuel et le contrôle automatique	CONFORME	CONFORME
4 Mesure des paramètres techniques des signaux:	1) Fréquence 2) Champ et puissance surfacique 3) Largeur de bande 4) Pourcentage de modulation (MA) 5) Décalage de fréquence (MF) 6) Analyse spectrale 7) Mesures de l'occupation du spectre	<ul style="list-style-type: none"> – Mesures conformes aux Recommandations UIT-R et du RR – Mesures en temps réel et mesures différenciées – Interception, démodulation, enregistrement et analyse des signaux – Libre définition du seuil de réception des signaux 	CONFORME	CONFORME

Paramètres fonctionnels	Spécifications	Cahier des charges	SOCIÉTÉ Y basique	SOCIÉTÉ X
5 Démodulation:	Ondes entretenues, MA, MF, BLU, NFM, WFM		CONFORME	CONFORME
6 Fonctions de poursuite:	1) Poursuite par fréquences discrètes 2) Poursuite de fréquences par bande 3) Choix arbitraire de pas de fréquence	Choix de fréquences manuel et automatique	CONFORME	CONFORME
7 Collecte de données:	Stockage des résultats de mesure et génération des rapports	Interface pour la connexion d'équipements périphériques (imprimantes, PC, etc.)	CONFORME	CONFORME
8 Logiciels applicatifs:	1) Interface homme-machine: <ul style="list-style-type: none"> – Conviviale – Fonctions clairement identifiées – Spectre de fréquences – Résultats faciles à lire – Conversion des unités – Visualisation des tables statistiques de taux d'occupation 2) Simulation du processus de radiogoniométrie 3) Extensibilité du système: <ul style="list-style-type: none"> – Capacité et facilité d'installation d'équipements de radiogoniométrie – Facilité de maintenance – Tests automatiques – Utilisabilité – Polyvalence 		CONFORME	CONFORME

TABLEAU A1-2

Paramètres fonctionnels	Spécifications	Cahier des charges	SOCIÉTÉ Y basique	SOCIÉTÉ X
Formation	1) Formation sur le montage d'une installation 2) Formation sur l'exploitation et la maintenance 3) Matériel d'aide à la formation (au format papier ou électronique)	Cinq jours pour deux ingénieurs. Le cours N° 1 a lieu à l'usine. Le cours N° 2 comprend la maintenance préventive et corrective	CONFORME	NON CONFORME
Terminologie, acronymes et abréviations	En anglais et en français	Option: en espagnol	CONFORME	CONFORME
Alimentation en électricité	220V ± 5%, 50 Hz		CONFORME	Non précisé
Documentation	1) Plans d'installation 2) Manuel d'exploitation et de maintenance du système et de ses composants	Diagramme conceptuel du système Description des systèmes et de l'équipement Plans de montage et d'installation Exécution des tests de réception en exploitation de la station Procédures permettant de détecter et de corriger les déficiences du système Procédures opérationnelles pour la maintenance périodique, tant préventive que corrective Procédures de localisation des pannes du système et procédures de réparation	CONFORME	CONFORME
Fourniture de biens et services	Le sous-traitant est responsable de la fourniture des biens et services conformément aux contrats correspondants		*	
Support et pièces de rechange	Fourniture de pièces de rechange (fongibles et non fongibles) nécessaires à la maintenance du système pour une période de deux ans après la réception définitive stipulée dans le contrat		*	10 ans après la réception définitive

* NOTE – Conforme aux déclarations faites par la SOCIÉTÉ X dans la «liste de conformité».

Paramètres fonctionnels	Spécifications	Cahier des charges	SOCIÉTÉ Y basique	SOCIÉTÉ X
Essai de réception en usine	Vérification des spécifications techniques de l'équipement		Un expert de l'UIT, 3 jours d'essai	Pas d'indication sur l'essai de réception en usine
Transport et livraison	Un maximum de [180] jours sur site, y compris la responsabilité de l'emballage, du transport et de l'installation		*	Quatre mois après la commande. Livraison à Genève
Installation	Le sous-traitant est en charge de l'installation de l'équipement et de l'exécution des essais requis afin de garantir l'état parfait et le bon fonctionnement du système	Installation, essai, intégration et exploitation	*	
Exécution des essais provisoires avant réception	Contrôler la fiabilité de l'installation et du fonctionnement du système et des équipements		*	
Exécution des essais définitifs avant réception	Protocole de réception		*	CONFORME
Garantie	Garantie de qualité couvrant le bon fonctionnement, le matériel et le logiciel pendant 12 mois après la date de réception définitive		*	CONFORME

* NOTE – Conforme aux déclarations faites par la SOCIÉTÉ X dans la «liste de conformité».

TABLEAU A.1-3

Paramètres fonctionnels	Spécifications	Cahier des charges	SOCIÉTÉ Y basique	SOCIÉTÉ X
Assurance	Le sous-traitant souscrit à une police d'assurance pour couvrir tout problème pouvant survenir jusqu'à la signature du certificat de réception provisoire (période entre le moment où l'équipement quitte l'usine et l'installation provisoire au lieu de livraison)			
1) Présentation générale de la partie technique 2) Station de travail informatique (élément N° 2 du mandat)			1) Très bien 2) OK Liste des options:	1) Piètre présentation de l'offre et difficulté à trouver l'information appropriée/pertinente 2) Station de travail: configuration minimale 3) Pas d'essai de réception en usine 4) Formation: Offre non conforme au mandat

Appendice 2

à l'Annexe 1

Exemple de l'UIT concernant les évaluations commerciale et juridique

1 Evaluation commerciale – Ouverture des offres commerciales

1.1 Le prix total de chaque offre à l'ouverture tel que relevé par le Groupe d'évaluation figure au tableau suivant:

Soumissionnaires (par ordre alphabétique)	Prix total à l'ouverture en USD
Société X	[999 999,00] – 1 ^{ère} offre [999 999,00] – 2 ^e offre
Société Y	[999 999,00] – offre de base [999 999,00] – offre optionnelle

1.2 C'est la SOCIÉTÉ X qui a fait l'offre commerciale la plus complète. Dans ses offres, la SOCIÉTÉ Y a fourni la plupart des informations demandées, mais le niveau de détail (par exemple, la ventilation des prix) n'étant pas satisfaisant, elle doit apporter des éclaircissements.

1.3 Le prix total évalué de chacune des deux offres tel qu'identifié par la Commission d'évaluation commerciale figure au tableau ci-dessous:

Soumissionnaire	Offre de base	Offre optionnelle N° 1	Offre optionnelle N° 2
SOCIÉTÉ X	[999 999,00] USD	[999 999,00] USD	[999 999,00] USD
SOCIÉTÉ Y	[999 999,00] USD	[999 999,00] USD	–

1.4 La SOCIÉTÉ Y n'a pas présenté de ventilation détaillée des prix. Par conséquent, il a été nécessaire de demander une explication détaillée du prix global afin de finaliser l'évaluation commerciale de son offre. La SOCIÉTÉ X n'a pas fourni l'ensemble des informations demandées (une liste ventilée des prix pour les composants des options 1 et 2).

1.5 Les prix annoncés par la SOCIÉTÉ X et par la SOCIÉTÉ Y à l'ouverture des plis divergent considérablement. S'agissant de la SOCIÉTÉ X, la plus grande différence provient du fait que la proposition de base concerne uniquement la formation. Par conséquent, conformément à la recommandation de la Commission d'évaluation technique (CET) ..., prière de se reporter au rapport d'évaluation technique de la CET pour de plus amples informations.

1.6 Les prix indiqués par ... incluent un rabais de 10% sur le prix total des composants.

1.7 Le prix est en USD, port payé, assurance comprise jusqu'à Genève (sachant que l'UIT n'a pas déterminé le lieu de destination). L'UIT a besoin des prix indiqués en RDD (rendu droits dus) – conformément à l'Incoterms 2000, y compris l'emballage ordinaire (lieu de destination à définir). Ce point devra être précisé pour le contrat de négociation.

1.8 **Conditions de paiement.** Les deux sociétés ont proposé des conditions de paiement. Par conséquent, les conditions de paiement du futur contrat *doivent être négociées* avec la société choisie.

1.9 Les deux offres incluent des *conditions commerciales*. Dans le cas de négociations contractuelles avec les deux sociétés, l'UIT pourra examiner l'ensemble des modifications proposées et des conditions de paiement additionnelles du contrat, conformément aux règles et réglementation de l'UIT (voir, concernant la SOCIÉTÉ X, pages ii à jj du Chapitre N de la proposition commerciale et, concernant la SOCIÉTÉ Y, pages kk à ll du Chapitre M de l'offre).

2 Evaluation juridique – Conformité avec le modèle de contrat (Partie II de l'avis d'appel d'offres)

Informations à caractère général	SOCIÉTÉ X			SOCIÉTÉ Y	
	1ère offre	2ème offre	3ème offre	1ère offre (de base)	2ème offre
Validité de l'offre					
Conformité avec le contrat	Oui (α)	Oui	Oui	Oui	Oui
Conformité avec les spécifications techniques	Oui	Oui	En plus	Non	Oui
Total hommes/jours	5	5	–	–	15
Total temps de travail	7,5 h/jour 3-5 jours	7,5 h/jour 3-5 jours	–	9 h/jour 2 jours	9 h/jour 6 jours/4 semaines
Prix par homme/jour	9 999,00	9 999,00	–	–	9 999,00
Total hommes/jours	6	6		10	10
Total temps de travail	7,5 h/jour 5 jours (37,5 h)	7,5 h/jour 5 jours (37,5 h)		6 h/jour 1 jour (6 h)	6 h/jour 5 jours/ 3 semaines (90 h)
Prix par homme/jour	9 999,00	9 999,00		9 999,00	9 999,00
Éléments qui pourraient augmenter le prix total fixe et définitif	Aucun, si les éléments se limitent à ceux du calendrier des prix I à III fourni avec l'offre	Aucun, si les éléments se limitent à ceux du calendrier des prix I à III fourni avec l'offre		Salles de cours et équipements de formation non disponibles	Salles de cours et équipements de formation non disponibles
Service de contrepartie que le soumissionnaire attend de l'UIT	Mise à disposition d'un lieu d'installation approprié	Mise à disposition d'un lieu d'installation approprié		Installer une salle de classe et veiller à la disponibilité de l'équipement de formation nécessaire	Installer une salle de classe et veiller à la disponibilité de l'équipement de formation nécessaire
Engagement à commencer et à exécuter les travaux	Date effective du contrat	Date effective du contrat		Date effective du contrat	Date effective du contrat
Date de livraison/conditions	N mois	N mois		M semaines	L semaines
Prix total ferme et définitif en USD					

2.1 α – S'agissant de la conformité avec les spécifications:

La SOCIÉTÉ X note que:

- La traduction du logiciel du système en français fait l'objet d'une offre séparée, étant donné que tous nos clients à travers le monde acceptent le logiciel en anglais.
- La traduction du logiciel en français doit être payée en une fois.
- Les manuels pour l'équipement et la formation seront fournis en français;
- Il sera dispensé une formation sur la maintenance préventive et corrective si les stagiaires sont des ingénieurs diplômés et expérimentés.

La seconde offre de la SOCIÉTÉ Y (optionnelle) satisfait pleinement aux exigences.

2.2 S'agissant du **modèle de contrat** proposé. Dans le cas de négociations contractuelles avec les deux sociétés, l'UIT pourra examiner toutes les propositions de modification et d'ajout concernant le modèle de contrat et les conditions de paiement. Les points les plus importants concernent les articles suivants:a) **Règles de fond** (conformité avec les statuts, la législation et les réglementations):

La SOCIÉTÉ X propose que «tous les litiges soient réglés conformément aux termes du contrat et aux accords supplémentaires, et à défaut conformément au droit de fond en vigueur dans le pays XYZ sans faire référence à d'autres droits de fond».

Cette demande n'est pas conforme avec les règles et réglementations de l'UIT.

NOTE – Déclaré «conforme» avec le modèle de contrat.

b) Arbitrage:

La SOCIÉTÉ X propose que «la tentative soit considérée comme ayant échoué dès lors que l'une des parties en informe l'autre par écrit». Si une tentative de règlement d'un litige échoue, ledit litige sera tranché par trois arbitres conformément aux règles de conciliation et d'arbitrage de la Chambre de commerce et d'industrie de [VILLE] ... (Voir page *k/k*, Chapitre *N* de la partie commerciale) – *Cet article n'a pas pu être négocié.*

c) Réception en usine et livraison:

Voir remarques/proposition de la SOCIÉTÉ X, § *n*, page *m* du Chapitre *N* de l'offre optionnelle.

d) Garanties:

Les deux sociétés donnent des conditions détaillées de modification dans le cadre de la garantie ou en cas de demande. Certaines propositions de modification ne sont pas conformes aux normes de l'UIT, mais pourraient être négociées.

e) Force majeure:

La SOCIÉTÉ X propose de modifier cet article. Voir le Chapitre *N*, page *i/k*: «... le cas de force majeure doit être confirmé par la Chambre de commerce, ...». Certaines propositions de modification ne sont pas conformes aux normes de l'UIT, mais pourraient être négociées.



* 3 3 3 6 8 *

Imprimé en Suisse
Genève, 2009
ISBN 92-61-12612-X

Crédits photos: PhotoDisc