

Union internationale des télécommunications

# UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Rapport UIT-R SM.2424-0**  
(06/2018)

## **Techniques de mesure et nouvelles technologies en matière de contrôle des systèmes à satellites**

**Série SM**  
**Gestion du spectre**



Union  
internationale des  
télécommunications

## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, 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.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

### Séries des Rapports UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REP/fr>)

| Séries    | Titre  |
|-----------|--|
| <b>BO</b> | Diffusion par satellite  |
| <b>BR</b> | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision                   |
| <b>BS</b> | Service de radiodiffusion sonore   |
| <b>BT</b> | Service de radiodiffusion télévisuelle   |
| <b>F</b>  | Service fixe   |
| <b>M</b>  | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés               |
| <b>P</b>  | Propagation des ondes radioélectriques   |
| <b>RA</b> | Radio astronomie   |
| <b>RS</b> | Systèmes de télédétection  |
| <b>S</b>  | Service fixe par satellite   |
| <b>SA</b> | Applications spatiales et météorologie   |
| <b>SF</b> | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| <b>SM</b> | <b>Gestion du spectre</b>  |

*Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2018

© UIT 2018

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

## RAPPORT UIT-R SM.2424-0

**Techniques de mesure et nouvelles technologies en matière  
de contrôle des systèmes à satellites**

(2018)

**1 Introduction**

Le Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique contient des informations détaillées sur la mesure des paramètres des signaux et sur les procédures fondamentales permettant de contrôler le spectre, mais il ne propose pas de techniques de mesures sophistiquées ni de nouvelles technologies en matière de contrôle des systèmes à satellites. Le présent Rapport vise à fournir une description exhaustive des fonctions dont doivent nécessairement disposer les stations de contrôle des satellites, ainsi que des prescriptions techniques connexes des nouvelles solutions de contrôle. Il permet ainsi d'orienter de manière systématique et intuitive les administrations qui souhaitent se doter d'infrastructures de contrôle des systèmes à satellites.

La documentation de l'UIT suivante, qui concerne le contrôle du spectre, a été prise en compte pour élaborer le présent Rapport:

- Recommandation UIT-R RA.769 – Critères de protection applicables aux mesures en radioastronomie
- Recommandation UIT-R SM.1600 – Identification technique des signaux numériques
- Rapport ERC 171: «Impact of Unwanted Emissions of IRIDIUM Satellites on Radio Astronomy Operations in the Band 1610.6-1613.8 MHz»
- Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique, édition 2011.

Autres documents:

«Reconstruction of the Satellite Orbit via Orientation Angles» (Journal for Geometry and Graphics, Volume 4 (2000), A. M. Farag et Gunter Weiss.

**2 Termes et définitions**

|         |   |
|---------|---|
| AMRC    | accès multiple par répartition en code  |
| AMRF    | accès multiple par répartition en fréquence   |
| AMRS    | accès multiple par répartition spatiale   |
| AMRT    | accès multiple par répartition dans le temps  |
| AOA     | angle d'arrivée ( <i>angle of arrival</i> )   |
| CW      | onde entretenue ( <i>continuous wave</i> )  |
| DVB-CID | identifiant d'opérateur de systèmes DVB ( <i>DVB carrier-identification</i> )                                 |
| EVM     | amplitude du vecteur d'erreur ( <i>error vector magnitude</i> )   |
| FDOA    | différence entre les fréquences d'arrivée ( <i>frequency difference of arrival</i> )                          |
| LDPC    | contrôle de parité à faible densité ( <i>low density parity check</i> ): code de correction d'erreur linéaire |
| MAQ-16  | modulation d'amplitude en quadrature à seize états  |

|          |   |
|----------|---|
| MDP-2    | modulation par déplacement de phase bivalente – Modulation par déplacement de phase à deux états                      |
| MDP-4    | modulation par déplacement de phase quadrivalente – Modulation par déplacement de phase à quatre états                |
| MDP-8    | modulation par déplacement de phase à huit états  |
| pdf      | puissance surfacique ( <i>power flux density</i> ), mesurée en dBW/m <sup>2</sup> dans la largeur de bande pertinente |
| p.i.r.e. | puissance isotrope rayonnée équivalente   |
| POA      | puissance d'arrivée ( <i>power of arrival</i> )   |
| RS       | codage Reed Solomon   |
| SOA      | architecture orientée services ( <i>service oriented architecture</i> )   |
| spfd     | densité spectrale de puissance surfacique ( <i>spectral power flux density</i> ), en dBW/m <sup>2</sup> /Hz           |
| TCA      | instant de plus grande proximité ( <i>time of closest approach</i> )  |
| TDOA     | différence entre les instants d'arrivée ( <i>time difference of arrival</i> )   |
| Turbo    | codes de correction d'erreur sans voie de retour à haute performance  |

### 3 Buts du contrôle des systèmes à satellites

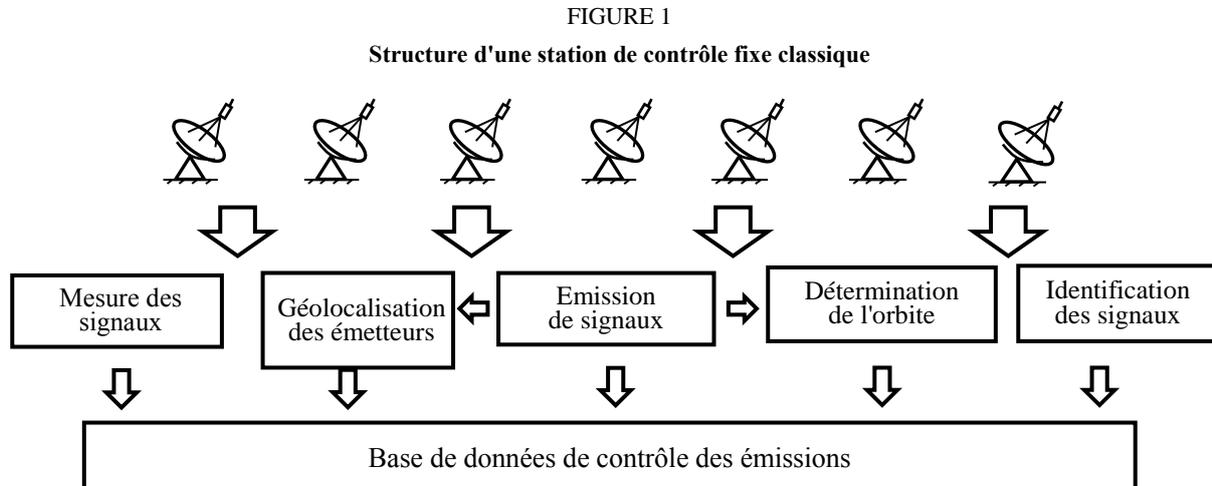
La gestion du spectre a pour but de maximiser l'efficacité de l'utilisation du spectre, de minimiser les brouillages et de mettre fin à tout emploi non autorisé ou inadéquat du spectre. Le contrôle du spectre facilite le processus de gestion du spectre. Les méthodes et techniques de contrôle des services de radiocommunication spatiale diffèrent de celles qui sont employées pour contrôler les radiocommunications au sol. C'est pourquoi il est important que les administrations mettent en place des stations de contrôle des systèmes à satellites entièrement fonctionnelles.

Le contrôle des systèmes à satellites a deux buts essentiels:

- But 1 – Evaluer l'emploi des ressources satellitaires, à savoir:
  - le niveau de la porteuse et du répéteur;
  - le taux d'occupation de la position sur l'orbite;
  - le taux d'occupation des fréquences;
  - l'attribution de la position sur l'orbite et des fréquences (pour une utilisation à long terme);
  - le respect du critère de puissance surfacique (pdf) et d'autres paramètres techniques;
  - la couverture du faisceau.
- But 2 – Détecter et résoudre les problèmes de brouillage:
  - géolocaliser les émetteurs causant les brouillages au sol;
  - déterminer si les émetteurs causant les brouillages sont mobiles ou fixes;
  - détecter et analyser sur le plan technique les réseaux de communication par satellite qui causent les brouillages;
  - déterminer la position exacte des sources de brouillage au sol;
  - examiner et vérifier les paramètres d'émission ainsi que les conditions d'octroi de la licence;
  - éliminer les brouillages.

## 4 Fonctions des systèmes de contrôle

On trouvera dans la présente section une description des fonctions élémentaires d'une station de contrôle des systèmes à satellites. La structure d'une station de contrôle fixe classique est décrite dans la Fig. 1:



### 4.1 Réception du signal

Pour contrôler les signaux émis par des satellites, le type d'antennes le plus fréquemment employé est l'antenne parabolique, car celle-ci peut être orientée vers le satellite pertinent et permet de poursuivre des satellites. La taille de l'antenne détermine le gain de celle-ci; l'antenne doit donc être suffisamment grande pour permettre une bonne réception des signaux. Des systèmes de modulation d'ordre supérieur nécessitent des rapports  $C/N$  plus élevés. On peut calculer de manière approximative la position du satellite sur l'orbite en utilisant l'angle d'azimut et l'angle d'élévation de l'antenne. Un analyseur de spectre raccordé à l'antenne peut afficher le spectre reçu.

Les antennes réseau à commande de phase permettent de modifier la forme de leur diagramme de rayonnement en réglant la phase du signal envoyé par les éléments rayonnants du réseau. Cette méthode permet de balayer plus facilement de nombreux satellites dans un grand arc spatial de manière presque simultanée. Les antennes réseau à commande de phase peuvent donc représenter un choix judicieux pour contrôler les signaux émis par plusieurs satellites OSG.

Les prescriptions des systèmes d'antennes employés pour suivre des satellites OSG et non OSG sont décrites plus en détail aux §§ 5.1.3.3 à 5.1.3.6 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre radioélectrique, et on trouvera des exemples de l'emploi de ces antennes au § 5.1.6.1.1.

Les bandes de fréquences des satellites OSG qu'une station de contrôle des systèmes à satellites permet généralement de contrôler sont les bandes UHF, L, S, C, X, Ku et Ka. Quant aux bandes des satellites non OSG, ce sont généralement les bandes UHF, L, S, X, Ku et Ka. Avec l'intensification des communications de l'Internet transmises par des satellites en large bande, le besoin de large bande continue d'augmenter et les bandes de fréquences contrôlées vont s'étendre aux bandes Q et aux bandes supérieures.

### 4.2 Mesure du signal

Les systèmes de réception modernes devraient être capables d'effectuer des mesures en temps réel, en temps différé (c'est-à-dire que les données sont analysées plus tard; ce système est aussi appelé post-traitement) et en temps fixe. Ils devraient aussi être capables de mesurer une largeur de bande

supérieure à celle des porteuses classiques des satellites contrôlés. Dans tous les cas, ces systèmes devraient au moins pouvoir mesurer des largeurs de bande supérieures à 100 MHz. Ils devraient en outre être capables d'enregistrer des données IQ acheminées dans toute la largeur de bande du signal. Les données IQ ainsi enregistrées doivent également permettre un post-traitement et une analyse du signal.

Tout système de réception devrait pouvoir mesurer en temps réel les paramètres RF suivants:

- la fréquence centrale;
- la fréquence Doppler;
- la puissance surfacique (pdf) dans la largeur de bande de référence, ainsi que la puissance surfacique totale;
- la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.);
- le rapport porteuse/bruit,  $C/N_0$ ;
- la largeur de bande du répéteur et celle de la porteuse;
- le spectre hors bande;
- le rapport signal reçu sur bruit.

### 4.3 Identification du signal

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les données IQ recueillies par le système de réception permettent d'effectuer un post-traitement et une analyse des paramètres du signal. S'il reçoit la commande correspondante, le système de réception peut enregistrer un signal après l'avoir détecté afin de conserver les caractéristiques de ce signal pour permettre son analyse ultérieure. On trouvera des informations sur le processus d'enregistrement et d'analyse des données IQ dans la Recommandation UIT-R SM.1600 – Identification technique des signaux numériques. Le système de réception devrait être capable de reconnaître les propriétés suivantes du signal:

- le rendement de codage et le débit de symboles;
- le type de modulation, c'est-à-dire MDP-4, MDP-8, MDP-2, MAQ-16;
- le type de codage de la source et de codage de canal (c'est-à-dire RS, Turbo, LDPC);
- l'accès multiple, c'est-à-dire AMRT, AMRF, AMRS, AMRC;
- l'identifiant d'opérateur de systèmes DVB (DVB-CID). Le DVB-CID est un identifiant unique permettant de reconnaître le propriétaire d'un signal transmis par satellite conformément à la norme ETSI TS 103 129.

On peut employer les paramètres supplémentaires indiqués ci-après pour reconnaître le système de communication:

- le type de protocole de communication, c'est-à-dire IP, DCME;
- le système de communication, c'est-à-dire SNG, DVB-S, DVB-S2, COMTECH;
- le type de réseau de communication, c'est-à-dire SkyWAN, iDirect, LinkWay/LinkStar.

### 4.4 Surveillance des signaux et déclenchement d'une alerte

Pour détecter des émetteurs non autorisés et des anomalies sur un répéteur ou dans une largeur de bande donnée, il convient de surveiller les signaux. Les paramètres mesurés devraient être constamment comparés aux paramètres théoriques (attendus) pour détecter tout écart.

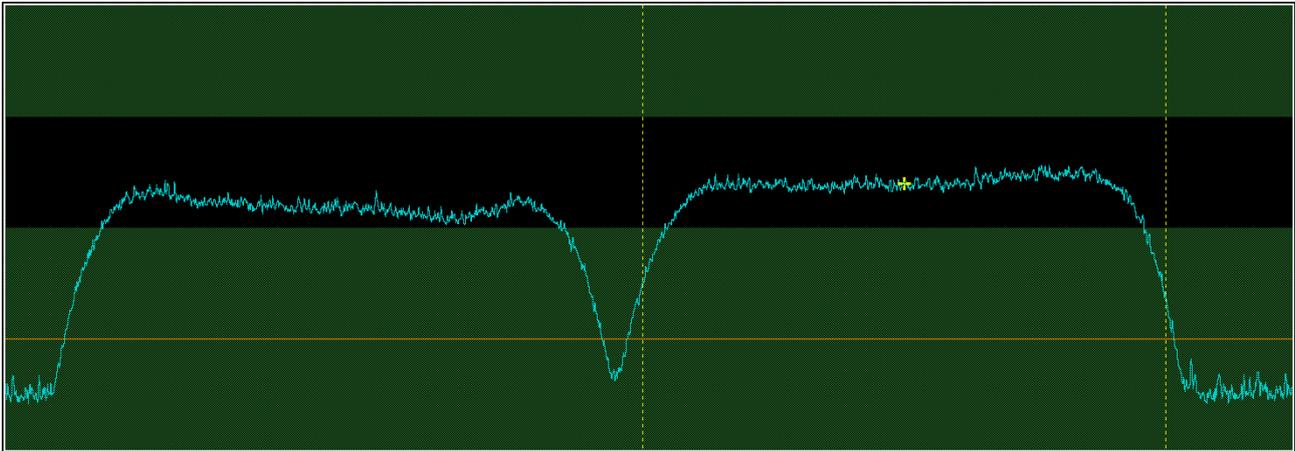
Le système de surveillance peut déclencher une alerte pour informer l'opérateur lorsqu'un seuil donné a été franchi. On trouvera dans la Fig. 2 des exemples de déclenchement d'alerte en cas de franchissement d'un plancher ou d'un plafond de puissance du signal. Les systèmes modernes de

contrôle des systèmes à satellites permettent de définir ces planchers et ces plafonds. En cas de franchissement de l'un de ces niveaux, le logiciel peut automatiquement prévenir les opérateurs de satellites en leur fournissant les informations pertinentes. Dans la figure ci-dessous, les deux signaux apparaissent avec les plafonds et les planchers de puissance correspondants (zone ombrée).

Ce type de limites peuvent aussi être établies pour d'autres paramètres mesurés; l'opérateur est ainsi alerté en temps réel si les conditions d'exploitation changent.

FIGURE 2

Exemple de franchissement du plancher de puissance d'un signal, qui déclenche une alerte



L'alerte peut être lancée manuellement (uniquement pour un petit nombre de porteuses) ou automatiquement (pour de nombreuses porteuses), ce qui permet d'assurer un contrôle 24 h/24 et 7 j/7. Certains tâches comme l'enregistrement des données IQ, la classification des modulations et la notification à l'opérateur chargé du contrôle peuvent être lancées automatiquement pour faciliter l'identification des anomalies. En outre, un système de géolocalisation peut être mis en place et être déclenché lorsqu'un brouillage ou une émission non autorisée est détecté.

On peut s'appuyer sur les paramètres suivants pour détecter une anomalie ou une émission non autorisée et déclencher une alerte:

- la fréquence centrale;
- la largeur de bande;
- la p.i.r.e.;
- le rapport  $S/N$ ;
- les variations des niveaux de bruit dans la bande de garde;
- les caractéristiques de la modulation (débit de symboles, amplitude du vecteur d'erreur (EVM));
- l'opérateur peut employer des spectrogrammes pour visualiser des brouillages de courte durée, une dérive rapide des intervalles de temps et des signaux de balayage.

#### 4.5 Géolocalisation d'émetteurs au sol

La géolocalisation d'émetteurs situés au sol doit s'appuyer sur des algorithmes de corrélation croisée utilisant un, deux ou trois satellites.

En raison des limites de ces algorithmes et des nombreux facteurs ayant une incidence sur la précision des mesures de géolocalisation, cette dernière ne peut fournir qu'une zone générale dans laquelle l'émetteur causant le brouillage est probablement situé, et non la position exacte de l'émetteur.

Les résultats sont généralement représentés par une zone caractérisée par les paramètres suivants:

- la longitude et la latitude du point central de la zone;
- la précision de la géolocalisation, qui peut être représentée par une ellipse ayant un axe principal, un axe secondaire et un angle par rapport au Nord;
- le fait que l'émetteur est stationnaire ou en mouvement.

#### **4.6 Emission du signal**

Le système d'émission du signal d'une station de contrôle des radiocommunications spatiales sert essentiellement à envoyer un signal de référence à partir d'un emplacement éloigné connu pour améliorer la précision de la géolocalisation. Ce signal de référence est généralement un signal à étalement de spectre; en raison de ses caractéristiques, il est difficile à détecter et ne brouille pas les signaux du répéteur du satellite.

#### **4.7 Détermination de l'orbite**

La précision des éphémérides des satellites a une forte incidence sur la précision de la géolocalisation. Il est donc vivement recommandé d'employer des éphémérides d'une précision supérieure à 5 km pour la géolocalisation.

Il existe trois manières d'acquérir les éphémérides des satellites. La première consiste à se procurer ces éphémérides sur l'Internet ou auprès des opérateurs de satellites. Les éphémérides fournies par les opérateurs sont précises et à jour. La deuxième consiste à mesurer l'éphéméride du satellite par des méthodes actives. La troisième consiste à mesurer l'éphéméride du satellite par des méthodes passives.

La méthode active de détermination d'une éphéméride repose sur l'emploi de mesures radioélectriques, généralement fondées sur le décalage Doppler, sur un interféromètre ou sur un radar. Il est en principe nécessaire de disposer de plusieurs émetteurs répartis en différents endroits qui émettent en permanence des signaux vers le satellite et reçoivent du satellite le même signal en retour, de manière synchronisée et pendant plusieurs heures. On peut alors calculer les paramètres orbitaux du satellite ainsi que son éphéméride. On est également possible de déterminer l'orbite de manière optique.

En revanche, contrairement aux méthodes actives, la méthode passive de détermination de l'éphéméride d'un satellite ne nécessite pas de transmettre des signaux au satellite. Elle réduit donc le risque de causer des brouillages au satellite par l'envoi de ces signaux. La méthode passive repose sur la différence entre les instants d'arrivée de signaux (TDOA) à au moins trois stations de réception distantes les unes des autres. Ces stations de réception sont réparties sur un triangle de plusieurs centaines de kilomètres et leurs horloges sont synchronisées avec une grande précision sur le signal GPS. Les valeurs TDOA sont calculées selon un modèle de régression orbital qui les intègre dans le temps.

#### **4.8 Radioraliement du signal**

Le radioraliement du signal exploite des stations de contrôle mobiles pour déterminer l'emplacement et l'opérateur d'un émetteur au sol ou de toute autre source causant des brouillages aux signaux autorisés de communications par satellite. Différentes techniques sont couramment employées pour étudier ces brouillages, notamment l'angle d'arrivée (AOA), la puissance à l'arrivée (POA) ou encore des algorithmes de corrélation croisée de type TDOA. Le radioraliement du signal commence par exploiter les résultats des mesures de géolocalisation des satellites décrivant la zone d'origine la plus probable des brouillages. Un processus itératif fondé sur des stations mobiles permet ensuite de

localiser l'émetteur au sol. Les résultats du processus de recherche et de confirmation de cet émetteur sont communiqués de la manière suivante:

- la longitude et la latitude de l'émetteur ciblé (emplacement);
- l'opérateur de l'émetteur ciblé (identification).

#### **4.9 Documentation et base de données**

Les procédures de contrôle et leurs résultats peuvent être enregistrés automatiquement dans une base de données pour favoriser, sur le long terme, l'analyse et la documentation des conséquences des changements planifiés et des brouillages observés. Cette base contient des données enregistrées dans le cadre de différentes opérations et par différents équipements dans des stations de contrôle réparties sur l'ensemble de la région ou du pays. Elle peut assurer la production de rapports réguliers (journaliers ou hebdomadaires) à l'appui des tâches courantes d'exploitation et de maintenance. Il est conseillé d'enregistrer les grands paramètres suivants:

- les données du spectrogramme et les données I/Q;
- les données de mesure du signal;
- les données d'identification du signal;
- les données de géolocalisation;
- les données issues de l'étude des brouillages;
- les données audio et vidéo;
- les paramètres de configuration des équipements employés pour effectuer le contrôle;
- la documentation sur les opérations effectuées;
- le journal des opérations effectuées.

#### **4.10 Visualisation des données de contrôle**

Pour pouvoir comprendre le fonctionnement d'un système à satellites au cours du temps, on peut visualiser le contenu de la base de données de contrôle en affichant les données sous différents formats, notamment une analyse de spectre classique, des spectrogrammes, des affichages en cascade, des diagrammes de constellation (pour les signaux démodulés) et des cartes numériques pour les données comportant des références de lieux. Les mesures effectuées de manière périodique mettent en évidence les changements de paramètres au cours de périodes courtes ou longues; elles permettent de découvrir des tendances, ainsi que l'incidence d'autres facteurs liés au fonctionnement du système (par exemple la météorologie, des événements locaux, des changements d'équipements, etc.)

Les données de contrôle peuvent être visualisées de la manière suivante:

- exécution audio ou vidéo (pour des données auparavant décodées);
- affichage graphique de données relatives au signal et concernant l'espace, le temps, les fréquences et la modulation, c'est-à-dire sous forme de spectrogramme, d'affichage en cascade et de diagramme de constellation;
- affichage des résultats de la géolocalisation sur une carte;
- affichage de l'itinéraire du véhicule de contrôle.

#### **4.11 Statistiques et analyse**

Pour gérer la manière dont les satellites et les stations au sol utilisent le spectre, on emploie une base de données très intégrée qui permet de comparer les mesures indiquées aux §§ 4.2 et 4.3 ci-dessus avec les données historiques afin de comprendre ce qui constitue une opération normale, et de découvrir l'origine des émissions anormales. Ces données permettent par exemple d'effectuer les analyses suivantes:

- identification d'émissions non autorisées et d'anomalies;
- apparition de brouillages et déploiement de réseaux de communication par satellite non autorisés (par exemple VSAT), en précisant les fréquences des brouillages, les types de modulation, le nombre de brouillages et la répartition géographique des sources de brouillage;
- position du satellite sur l'orbite;
- taux d'occupation des fréquences.

#### **4.12 Equipements de contrôle**

Les équipements informatiques de contrôle peuvent effectuer de nombreuses tâches de mesure automatiques et faciliter la constitution de la base de données. Ils peuvent aussi aider les opérateurs à effectuer des opérations manuelles et à vérifier et entretenir une station. Les équipements de contrôle à distance d'une station peuvent assurer des fonctions analogues. En outre, on peut établir une communication audio ou vidéo en temps réel entre les véhicules de contrôle et les stations de contrôle fixes par le biais de réseaux étendus. Enfin, les équipements de contrôle peuvent aussi acheminer des données de contrôle provenant de stations éloignées ou mobiles vers des stations fixes.

Compte tenu de la grande diversité des dispositifs de contrôle et des fabricants de ces dispositifs, il existe plusieurs normes et formats de données régissant les interfaces de programmation d'applications (API) de ces dispositifs. Néanmoins, il n'est pas toujours possible de disposer de commandes automatiques et intelligentes de ces dispositifs de contrôle. Pour résoudre ces problèmes, on peut organiser le contrôle des systèmes à satellites par fonction plutôt que par dispositif. Tous les dispositifs assurant la même fonction devraient disposer de la même API. Pour favoriser un emploi efficace des fonctions de contrôle, les administrations devraient envisager d'adopter une architecture orientée services (SOA) dans leur logiciel de contrôle.

L'architecture SOA est un modèle modulaire qui relie entre elles les différentes unités fonctionnelles des dispositifs de contrôle (appelées services) en établissant des interfaces bien définies entre ces services. Chaque interface doit être indépendante de la plate-forme matérielle, du système d'exploitation et des langages de programmation sur lesquels repose le service. Ce système permet à des services fonctionnant dans des systèmes différents d'interagir entre eux d'une manière unifiée et universelle.

### **5 Evaluation de l'utilisation des ressources satellitaires**

Le nombre de positions possibles qu'un satellite OSG peut occuper sur son orbite est limité. Il est important de vérifier que les positions sur l'orbite du satellite et les fréquences sont utilisées correctement et que les paramètres de contrôle réellement employés sont conformes à leur valeur théorique, afin de pouvoir choisir de nouvelles positions sur l'orbite du satellite et coordonner les satellites entre eux.

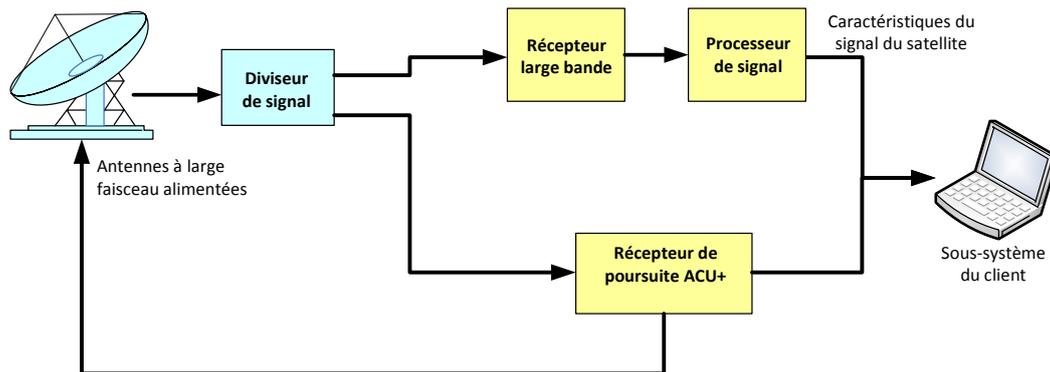
En outre, avec l'accroissement de l'usage des microsatsellites, le risque de brouillages entre des satellites non OSG et des dispositifs au sol augmente. Il est important de contrôler les paramètres des satellites non OSG pour s'assurer que les communications par satellite comme les communications au sol sont utilisées normalement.

#### **5.1 Composition d'un système de contrôle**

La Figure 3 ci-après contient le diagramme d'un système classique de contrôle des systèmes à satellites:

FIGURE 3

## Diagramme d'un système classique de contrôle des systèmes à satellites



## 5.2 Technique de mesure pour le contrôle des satellites OSG

### 5.2.1 Mesure précise de la position du satellite sur l'orbite

Aux termes de la Section III de l'Article 22 du Règlement des radiocommunications (RR) et de l'Appendice 30 du RR, les stations spatiales installées à bord de satellites géostationnaires (OSG) qui utilisent une bande de fréquences quelconque attribuée au service fixe par satellite ou au service de radiodiffusion par satellite doivent pouvoir être maintenues en position à moins de  $\pm 0,1^\circ$  de longitude de leur position nominale. Les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite installées à bord de satellites géostationnaires et fonctionnant dans la bande 11,7-12,7 GHz doivent pouvoir être maintenues en position à moins de  $\pm 0,5^\circ$  de longitude de leur position normale.

Il est donc nécessaire de mesurer la position courante sur l'orbite pendant au moins 12 heures et de la comparer avec la position théorique du satellite. Toute différence supérieure à la marge précitée doit être enregistrée.

### 5.2.2 Mesure du taux d'occupation du spectre

Le taux d'occupation du spectre indique l'utilisation réellement faite d'un répéteur ou d'une largeur de bande donnée. Il est conseillé d'appliquer les procédures suivantes:

- orienter l'antenne vers un satellite OSG ou une position orbitale particulière;
- mesurer le signal dans une largeur de bande donnée (voir le § 4.2). Les mesures de signal devraient être effectuées automatiquement par des systèmes de contrôle de systèmes à satellites OSG;
- enregistrer le résultat de la mesure du signal dans une base de données;
- en interrogeant ensuite la base de données, on peut calculer le taux d'occupation du spectre dans différentes bandes et sur différentes durées, selon les besoins. En outre, si le taux d'occupation du spectre à un emplacement particulier de l'orbite est proche de zéro sur le long terme, cet emplacement peut être répertorié comme une position orbitale libre; une administration peut alors demander à l'UIT de le mettre à sa disposition.

Si plusieurs satellites partagent une position orbitale, il est difficile de distinguer l'utilisation du spectre faite par chacun d'eux, sauf si la polarisation et la configuration du répéteur de chaque satellite sont connues.

### 5.2.3 Détection d'émissions non autorisées

Pour détecter les émissions non autorisées et les anomalies d'un répéteur ou dans une largeur de bande donnée, il convient de mesurer automatiquement les paramètres du signal (décrits au § 4.2) et de les comparer en permanence avec les paramètres théoriques (attendus).

Si des émissions non autorisées sont détectées, il faut s'efforcer de déterminer les caractéristiques des paramètres internes du signal (voir le § 4.3).

En outre, selon la Section V de l'Article 21 du RR, la puissance surfacique mesurée d'une émission non autorisée doit être comparée à la limite établie par l'UIT et à la limite théorique appliquée par l'opérateur du satellite.

## 5.3 Technique de mesure pour le contrôle des satellites non OSG

### 5.3.1 Identification des satellites non OSG

Il est nécessaire d'identifier les satellites non OSG dans le cadre des mesures du taux d'occupation des bandes de fréquences, du contrôle avant le lancement et des mesures d'atténuation des brouillages.

En raison des différences de préconditions, il existe différentes méthodes d'identification. Les scénarios envisageables sont par exemple les suivants:

- l'heure d'apparition des brouillages est connue. On peut détecter la présence de satellites non OSG en s'appuyant sur le décalage Doppler, ou si les brouillages se reproduisent régulièrement à la même heure (par exemple si le client a documenté les cas de brouillages). Il faut aussi tenir compte de la directivité ou du diagramme de rayonnement de l'antenne qui reçoit les brouillages;
- la station de contrôle est en mesure de poursuivre le satellite inconnu et d'enregistrer l'heure, l'azimut et l'angle d'élévation;
- la station de contrôle est en mesure d'enregistrer la bande de fréquences concernée au moyen d'une antenne équidirective.

### Méthodes d'identification

Il faut garder à l'esprit le fait qu'un satellite n'émet pas nécessairement en permanence.

#### Méthode A: Paramètres orbitaux connus

- Précondition: disposer d'un ensemble complet de paramètres orbitaux.
- Disposer d'un logiciel capable de prévoir la visibilité (et les angles d'observation) en temps réel.
- Etablir une comparaison avec l'objet observé.
- Réduire le nombre de satellites possibles en renouvelant les mesures.
- Utiliser les paramètres orbitaux pour orienter l'antenne afin d'effectuer de nouvelles mesures.

#### Méthode B: Paramètres orbitaux recueillis sous différents angles d'observation

- Précondition: l'antenne doit être en mode de poursuite automatique d'un signal adéquat.
- Enregistrer l'azimut et les angles d'élévation.
- Calculer les paramètres orbitaux (voir la documentation).
- Prévoir les survols pour effectuer de nouvelles mesures.

#### Méthode C: Comparaison des heures d'observation

- Précondition: Les enregistrements du spectre doivent être effectués au moyen d'une antenne équidirective.

- Mesurer la différence de temps entre les instants de plus grande proximité (TCA).
- Rechercher des périodes correspondantes dans la base de données.
- Rechercher le commutateur local de terminaison (CLT) des satellites pendant la période considérée.
- Calculer la visibilité et comparer les heures de visibilité avec les heures d'observation.
- Utiliser les paramètres orbitaux pour orienter l'antenne afin d'effectuer de nouvelles mesures.

### Quelques remarques sur la méthode C

Les satellites non OSG gravitent autour de la Terre pendant que celle-ci tourne sur son axe. L'observateur passe donc deux fois (sauf s'il se trouve près de l'axe de rotation de la Terre) sous l'orbite du satellite. Le satellite vient du nord la première fois et du sud la seconde. Pour obtenir une mesure plus précise, il est recommandé de déterminer la différence de temps entre des survols espacés d'environ 24 h (ou 48 h, 72 h, etc.) et de la diviser par le nombre de révolutions. On obtient le meilleur résultat lorsque le satellite se déplace dans la même direction (nord-sud) et que son signal est reçu à des angles d'observation analogues.

Comme la plupart des satellites non OSG sont en orbite basse à des altitudes situées entre 160 et 2 000 km (orbite terrestre basse ou LEO), leur période se situe entre 84 et 127 minutes. Ils sont donc visibles plusieurs fois lorsque l'observateur passe sous leur orbite, et il y a deux séries de survols (selon que le satellite arrive du nord ou du sud). Suivant la latitude de l'observateur, les deux séries sont visibles à des intervalles de temps égaux (si l'observateur est proche de l'équateur) ou différents. La variation des intervalles de temps donne une indication sur l'inclinaison du satellite. Si par exemple l'observateur se trouve dans l'hémisphère nord et que l'intervalle de temps pendant une série de survols commence par décroître, puis augmente, l'inclinaison du satellite est supérieure à 90 degrés.

Certaines fréquences sont partagées par plusieurs satellites appartenant pour la plupart à une même constellation. Les survols doivent être associés à un seul satellite; à cette fin, on peut recenser des séries de survols dont les différences de temps sont presque identiques.

### Quelques définitions

Série de survols: Révolutions consécutives (orbite) d'un satellite pouvant être observées.

Survols: Passage d'un satellite au-dessus de la station de réception d'un horizon à l'autre.

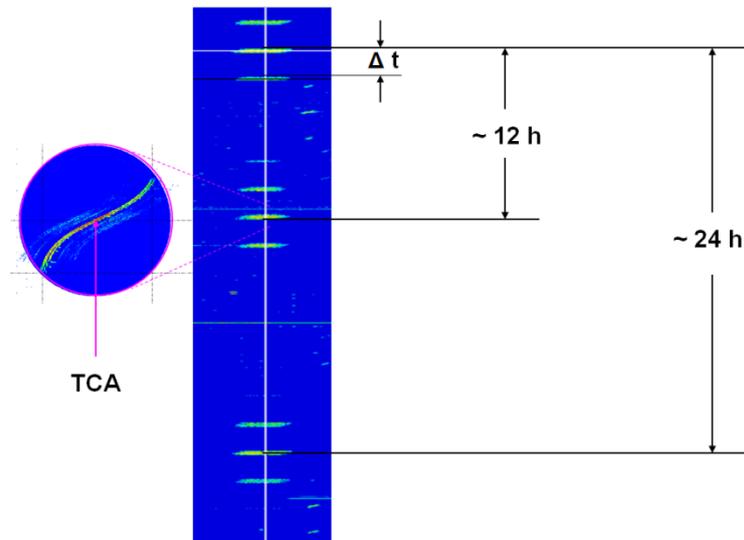
TCA: Instant de plus grande proximité. Le décalage Doppler permet de visualiser les survols sous forme de courbes en S. A l'instant de plus grande proximité, la vitesse du satellite par rapport à la station de contrôle est nulle. C'est le point d'inflexion de la courbe. A cet instant, la fréquence reçue correspond à la fréquence émise.

$\Delta t$ : Différence de temps entre deux survols.

~12 heures après une série de survols, le satellite passe au-dessus de l'observateur en venant de la direction opposée (nord-sud).

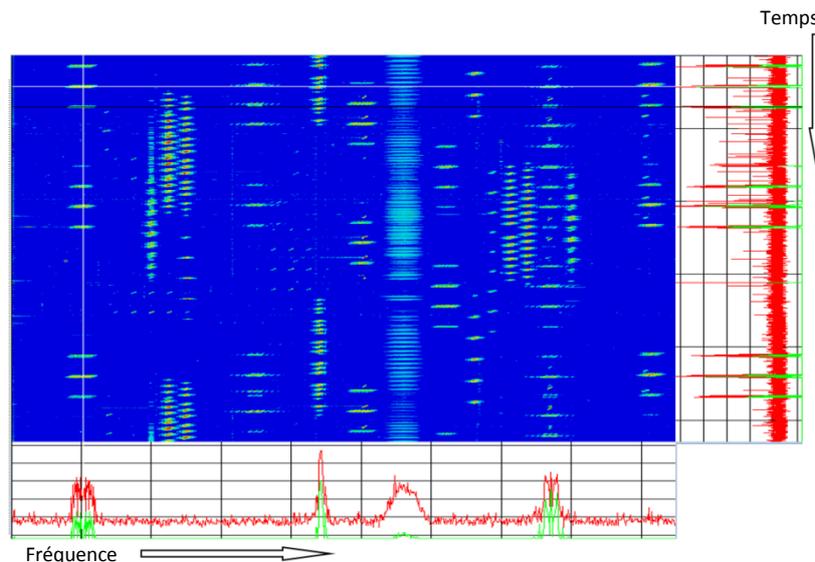
~24 heures après une série de survols, le satellite passe au-dessus de l'observateur en venant de la même direction (nord-sud).

FIGURE 4  
Enregistrement d'un satellite pendant 30 heures



Enregistrement de spectre (enregistrement des bandes de fréquences): système d'enregistrement capable de montrer l'utilisation du spectre dans le temps (spectrogramme ou affichage en cascade). Ce système dispose d'une durée de stockage d'au moins 48 heures, d'une résolution temporelle de l'ordre de quelques secondes et d'une résolution fréquentielle suffisamment élevée pour permettre de trouver le TCA dans les courbes Doppler.

FIGURE 5  
Exemple d'enregistrement de spectre



### 5.3.2 Mesure de la position sur l'orbite

La trajectoire d'un satellite non OSG devrait être calculée et communiquée en coordonnées géographiques (point sous-satellite et altitude, qui peuvent aussi être définis par des coordonnées xyz par rapport au centre de la Terre) ou sur une carte du ciel. Elle peut être établie par le biais d'une poursuite par mono-impulsion sur une période de 24 heures, ou en employant des moyens optiques.

### 5.3.3 Etablissement de la courbe de puissance surfacique de la porteuse

L'heure de réception d'un satellite non OSG peut être prévue en utilisant l'éphéméride du satellite. A partir de ces données, l'antenne de la station au sol peut poursuivre le satellite et établir automatiquement la courbe de la puissance surfacique. Le résultat de ces mesures devrait être stocké dans la base de données et être affiché dans un graphique.

## 6 Résolution des problèmes de brouillage

Un répéteur transparent de satellite est susceptible de causer, de manière intentionnelle ou non, des brouillages sur la liaison montante ou descendante. Les brouillages non intentionnels sont généralement provoqués pour l'une des raisons suivantes:

- la mauvaise utilisation d'un service par satellite autorisé, par exemple:
  - une erreur de l'opérateur;
  - un dysfonctionnement des équipements;
  - une polarisation croisée;
- la position adjacente des satellites.

Les brouillages intentionnels peuvent être causés pour des raisons politiques ou criminelles, ainsi que par des stations au sol exploitées sans licence qui utilisent illégalement des fréquences libres d'un satellite. Cette utilisation provoque des dégradations préjudiciables, voire l'interruption des services autorisés. C'est pourquoi il est très important de pouvoir géolocaliser et étudier les brouillages causés aux satellites.

### 6.1 Types de brouillages

Chaque type de brouillages a ses propres techniques de mesures car son signal présente des caractéristiques différentes. Tout système de géolocalisation de satellites doit donc être capable de travailler avec différents types de signaux de brouillage:

- les ondes entretenues (CW);
- les signaux à modulation numérique;
- les signaux à modulation analogique;
- AMRT/AMRF/AMRC;
- les signaux de type impulsionnel;
- les signaux à impulsions;
- les signaux à balayage;
- les signaux à étalement de spectre;
- les impulsions radar.

Ainsi, pour pouvoir géolocaliser un signal CW, il suffit d'effectuer des mesures de type FDOA. En revanche, dans le cas de brouillages AMRT, il faudra effectuer des mesures de paramètres complémentaires pour déterminer combien de stations sont en ligne et l'intervalle de temps de chaque station avant le début de la géolocalisation.

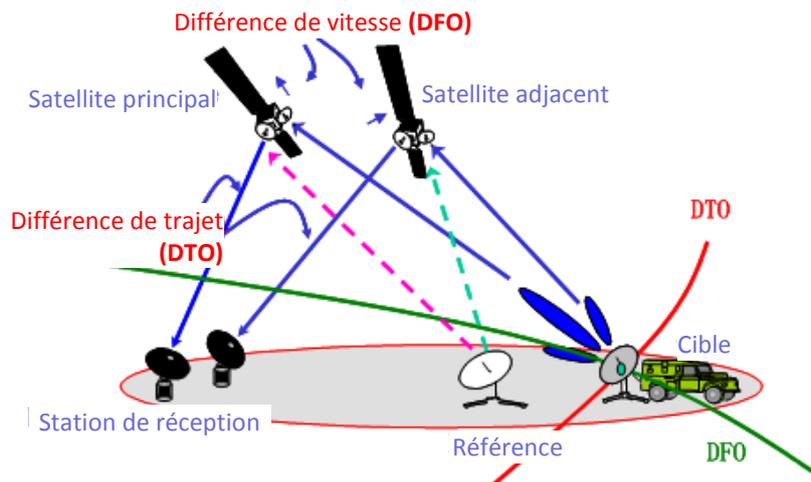
## 6.2 Principes de géolocalisation

### 6.2.1 Géolocalisation d'émetteurs au sol utilisant deux satellites OSG

#### 6.2.1.1 Principe de mesure

La méthode la plus employée pour géolocaliser des émetteurs situés au sol consiste à effectuer des mesures de type TDOA et FDOA en utilisant deux satellites OSG. Le principe de cette méthode est illustré dans la Fig. 6.

FIGURE 6  
Espacement angulaire entre le satellite principal et le satellite adjacent par rapport à la bande de fréquences de la liaison montante et la taille de l'antenne

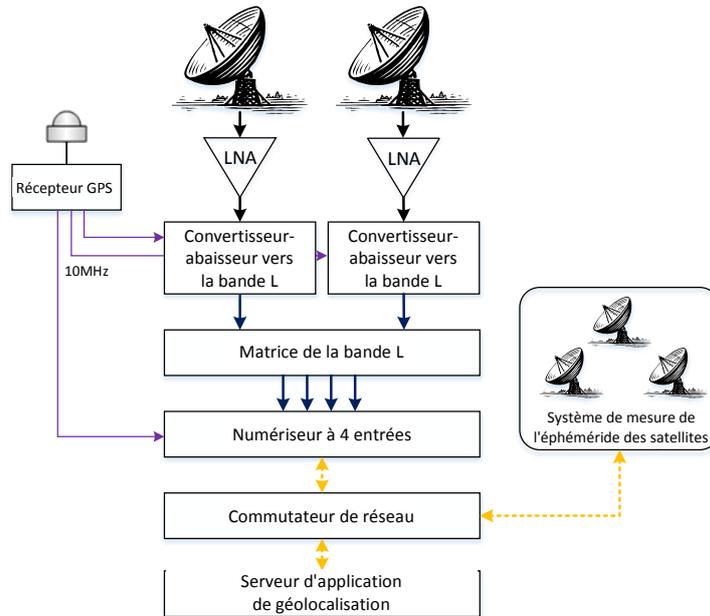


Dans cet exemple, le satellite principal est celui qui subit le brouillage (on l'appelle aussi le satellite «victime»). Le satellite adjacent est situé à proximité du satellite principal; ses répéteurs peuvent servir à mesurer le lobe latéral du brouillage. Une mesure TDOA fournit la différence de temps du signal brouilleur envoyé à deux récepteurs au sol depuis le satellite principal et le satellite adjacent. Une mesure FDOA fournit la différence de fréquences du signal brouilleur envoyé séparément aux deux récepteurs au sol par les deux satellites. L'intersection des courbes TDOA et FDOA se présente généralement sous la forme d'une ellipse définissant la zone la plus probable d'emplacement de l'émetteur non autorisé.

#### 6.2.1.2 Système de géolocalisation classique utilisant deux satellites OSG

La configuration classique d'un système de géolocalisation utilisant deux satellites OSG comporte deux chaînes de réception RF, des numériseurs de signal et un serveur d'application de géolocalisation. Les chaînes RF peuvent être équipées d'un convertisseur-abaisseur comportant un amplificateur à faible bruit (LNA), ou d'un convertisseur-abaisseur comportant un bloc à faible bruit (LNB), comme le montre la Fig. 7.

FIGURE 7  
Exemple de système de géolocalisation à deux satellites



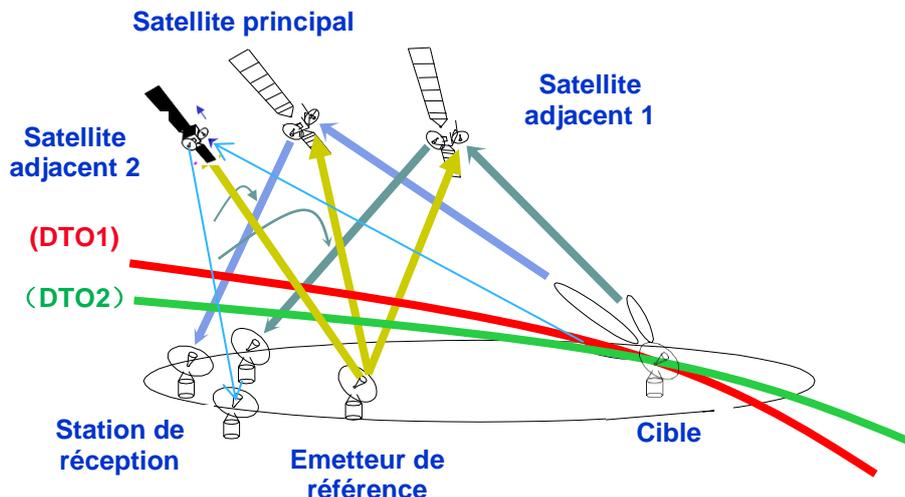
## 6.2.2 Géolocalisation d'émetteurs au sol utilisant trois satellites OSG

### 6.2.2.1 Description du problème

L'une des limites de la méthode de géolocalisation utilisant deux satellites OSG tient à l'incertitude de la courbe FDOA, qui peut fluctuer vers le haut ou le bas, notamment lorsque les éphémérides sont imprécises. Cette fluctuation réduit la précision des résultats. Il est possible de réduire l'incidence de cette imprécision en utilisant des mesures provenant de plusieurs stations de référence connues; toutefois, il n'est pas possible d'éliminer entièrement le problème.

Pour obtenir un résultat plus précis, on a mis au point une méthode de géolocalisation utilisant trois satellites OSG et des mesures TDOA. Cependant, dans la réalité, il peut être difficile de trouver deux satellites adjacents qui conviennent pour cette méthode. Le principe de celle-ci est décrit dans la Fig. 8.

FIGURE 8  
Principe d'un système de géolocalisation utilisant trois satellites et un algorithme TDOA/TDOA

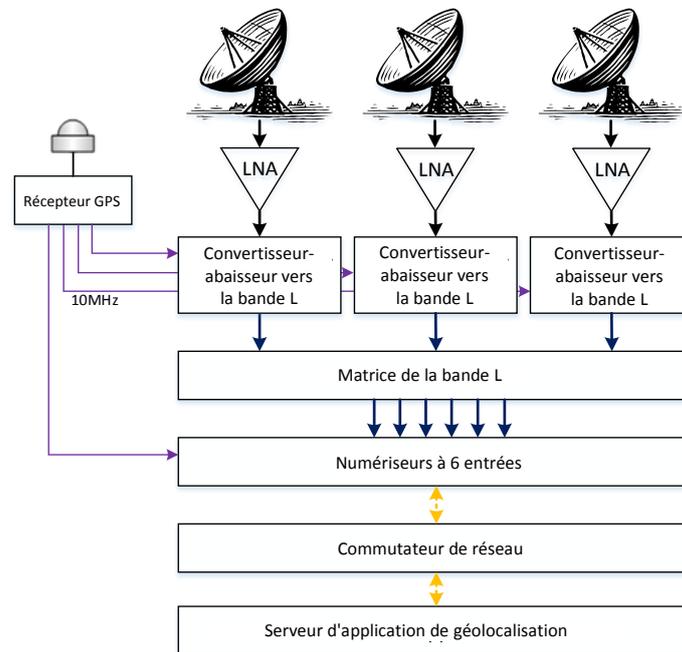


### 6.2.2.2 Système de géolocalisation classique utilisant trois satellites OSG

La configuration classique d'un système de géolocalisation à trois satellites OSG ressemble beaucoup à celle d'un système à deux satellites OSG. Elle comporte trois chaînes de réception RF, des numériseurs de signal et un serveur d'application de géolocalisation. Les chaînes RF peuvent être équipées d'un convertisseur-abaisseur comportant un amplificateur à faible bruit (LNA), ou d'un convertisseur-abaisseur comportant un bloc à faible bruit (LNB), comme le montre la Fig. 9.

FIGURE 9

Exemple de système de géolocalisation à trois satellites



### 6.2.3 Géolocalisation d'émetteurs au sol utilisant un seul satellite OSG

#### 6.2.3.1 Description du problème

Comme nous l'avons déjà indiqué aux §§ 6.2.1 et 6.2.2, différents fabricants commercialisent actuellement un certain nombre de systèmes de géolocalisation. Le principal inconvénient de ces systèmes tient au fait qu'ils nécessitent au moins un satellite adjacent qui soit suffisamment proche pour pouvoir prendre en charge une diaphonie utile aux calculs.

Bien que les principaux opérateurs disposent de plusieurs centaines de satellites OSG, certains de ces satellites sont encore «isolés», c'est-à-dire que le satellite adjacent suivant est distant de plus de 10 degrés. Dans ce cas, la diaphonie est probablement trop faible pour pouvoir être mesurée.

Au demeurant, quand bien même un satellite adjacent est disponible, il n'est pas nécessairement utile à la géolocalisation si l'on ne dispose pas d'une éphéméride précise. Deux des principaux paramètres à connaître dans les systèmes de géolocalisation sont la position et la vitesse précises du satellite principal et du satellite secondaire. La qualité de ces paramètres a une incidence directe sur la précision des systèmes de géolocalisation. En outre, si le satellite adjacent est contrôlé par un opérateur de satellites différent, les données de son éphéméride sont inconnues, ou ne sont connues que de manière approximative; les résultats de la géolocalisation sont alors inutilisables.

On peut calculer l'éphéméride d'un satellite à l'aide d'un système de détermination d'orbite. Toutefois, il faut disposer de stations de référence, trois ou quatre de ces stations étant nécessaires pour pouvoir calculer les données de l'éphéméride avec une précision suffisante. Si ce nombre semble facile à atteindre, il pose en réalité un véritable problème, et la géolocalisation se révèle souvent impossible car il est fréquent que les opérateurs ignorent quel signal de référence est émis par quelle station.

Si les deux conditions sont satisfaites, la difficulté suivante est liée au signal de diaphonie du satellite adjacent. Ce signal doit être émis sur la même bande de fréquences et avec la même polarisation que le signal brouilleur reçu par le satellite principal. Compte tenu de ces trois conditions, il est souvent impossible d'effectuer une géolocalisation satisfaisante avec les outils et les algorithmes disponibles. Il serait donc fort utile de disposer d'une méthode de géolocalisation utilisant le signal brouilleur et le signal de référence d'un seul satellite.

### **6.2.3.2 Méthode de géolocalisation utilisant un seul satellite OSG et le décalage Doppler inversé**

La Section 5.1.2.8 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique (édition 2011) contient déjà la description d'une méthode permettant de géolocaliser un émetteur non autorisé au sol au moyen d'un seul satellite OSG. L'inconvénient de ce système est sa sensibilité inhérente aux variations de fréquences provoquées par les équipements de contrôle de la station de liaison montante (les sources de fréquences et les équipements exploitant les boucles à verrouillage de phase (PLL) sont sensibles aux variations de température, etc.); or ces variations peuvent atteindre ou dépasser l'amplitude habituelle du décalage Doppler des satellites OSG.

Dans la pratique, les systèmes de géolocalisation commerciaux fondés sur cette méthode ont montré que la meilleure précision possible en matière de géolocalisation était supérieure à 100 km, ce qui n'est pas réellement utile pour détecter la station de liaison montante d'un émetteur non autorisé. Ces systèmes peuvent offrir une précision acceptable lorsque le signal brouilleur est reçu par le biais d'un satellite en orbite inclinée, dont le mouvement est plus ample que celui d'un satellite OSG, et qui présentent par conséquent un décalage Doppler plus important.

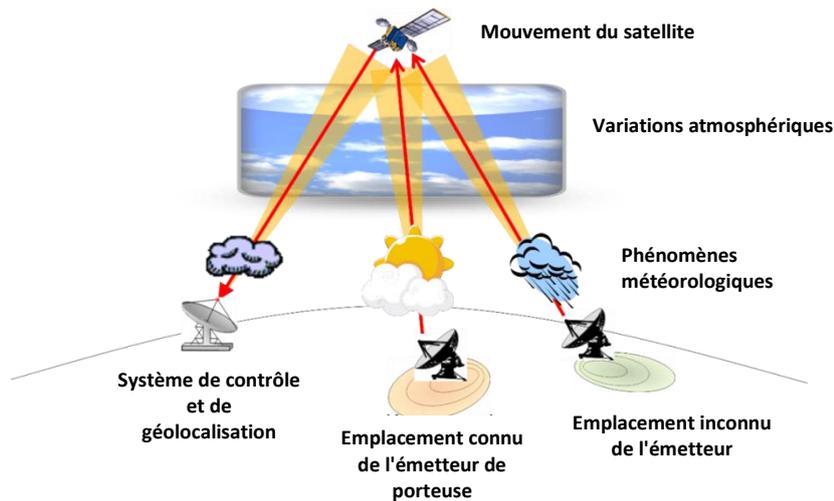
### **6.2.3.3 Méthode de géolocalisation utilisant un seul satellite OSG et une corrélation avec des émetteurs au sol connus**

Cette technique est fondée sur le fait que la puissance du signal d'un satellite, transmis par une station de liaison montante au sol vers le satellite puis retransmis vers une station de réception au sol, varie dans le temps en raison d'un certain nombre de facteurs, comme le montre la Fig. 10:

- Le mouvement du satellite;
- Les conditions atmosphériques et météorologiques (du côté ascendant comme du côté descendant);
- Les variations de gain de l'amplificateur de puissance et de l'alignement de l'antenne à la station de liaison montante.

FIGURE 10

Principe d'un système de géolocalisation à un seul satellite utilisant la corrélation avec des émetteurs connus



On peut prendre pour hypothèse que les signaux émis depuis la même station de liaison montante ou depuis la même zone géographique présentent des variations de puissance identiques au cours d'une même période, tandis que les signaux émis depuis différentes zones géographiques présentent des variations de puissance différentes pendant la même période.

La Figure 11 montre des variations de puissance de deux signaux (rouge et bleu) émis par la même station de liaison montante pendant une période de quatre jours. On peut clairement observer une variation cyclique de 24 heures due au mouvement du satellite. La Figure 12 montre des variations de puissance provoquées par des phénomènes météorologiques (ce sont les fortes variations des courbes). Dans les deux cas, les variations de puissance sont presque identiques entre les deux signaux puisque ceux-ci sont émis par la même antenne de liaison montante.

FIGURE 11

Variation de puissance sur 24 h provoquées par le mouvement du satellite

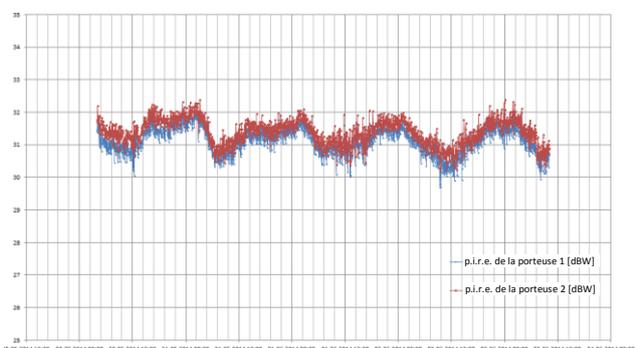
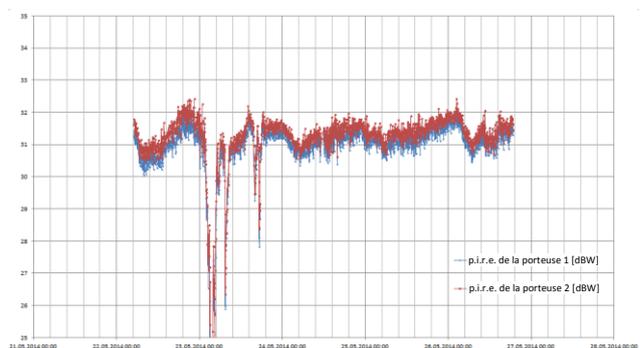


FIGURE 12

Variation de puissance sur 24 h provoquées par des phénomènes météorologiques



Cette méthode nécessite d'établir les similitudes entre le signal brouilleur et d'autres signaux connus pour localiser un signal brouilleur. On recherche généralement des corrélations de signaux ou de parties de signaux dans le domaine des fréquences. L'algorithme de détection des corrélations est donc l'élément le plus essentiel de cette méthode en termes de précision de la géolocalisation, d'efficacité et de succès.

Ce principe est applicable lorsque plusieurs signaux différents sont émis depuis la station de liaison montante ou la zone géographique à l'origine du signal brouilleur. Tous les signaux (y compris le

signal brouilleur) provenant de cette zone peuvent être observés sur le long terme par un système de contrôle des porteuses afin de mesurer les variations de puissance, de fréquence ou de largeur de bande du signal brouilleur (ces variations étant dues par exemple à des phénomènes météorologiques). On peut alors tenter d'établir une corrélation entre ces variations et celles que l'on présume être issues d'autres émetteurs locaux. Si la corrélation est positive, on peut en conclure que l'emplacement de l'émetteur de liaison montante envoyant le signal brouilleur est identique à celui de l'émetteur ayant permis la corrélation, ou qu'il en est proche.

La difficulté de cette méthode tient au mode de corrélation et à la stratégie de contrôle. En effet, les mesures ne sont généralement pas effectuées exactement au même moment (certaines peuvent par exemple être synchrones tandis que d'autres reposent sur l'algorithme «Round Robin»). Il est alors très difficile d'établir une corrélation significative, faute d'un nombre suffisant de mesures synchrones des paramètres. Pour pouvoir établir des corrélations entre des mesures non synchrones, il faut déterminer la possibilité d'employer des méthodes telles que la pondération selon les écarts de temps, les contrôles de vraisemblance, l'atténuation des ambiguïtés, etc. Cette méthode pourrait en outre être améliorée par la prise en compte d'informations liées aux équipements de stations d'émission connues, de données météorologiques fournies par des tiers, etc. On pourrait par exemple utiliser des données météorologiques pour réduire davantage les ambiguïtés en recensant et en éliminant les cas en conflit avec certaines situations météorologiques.

### 6.3 Prescriptions des systèmes de géolocalisation

#### 6.3.1 Satellites

Pour les méthodes de géolocalisation s'appuyant sur plusieurs satellites, le satellite principal et le satellite adjacent ne devraient pas être trop proches (pour éviter les difficultés de mesures TDOA) ni trop éloignés (le signal du satellite adjacent étant alors trop faible pour être détecté). En outre, le signal de diaphonie du satellite adjacent doit être émis dans la même bande de fréquences et avoir la même polarisation que le signal brouilleur reçu par le satellite principal. Il est indispensable de disposer des éphémérides de ces satellites pour pouvoir effectuer une géolocalisation précise. L'espacement angulaire recommandé entre le satellite principal et le satellite adjacent est indiqué dans le Tableau 1:

TABLEAU 1

**Espacement angulaire entre le satellite principal et le satellite adjacent selon la bande de fréquences de la liaison montante et la taille de l'antenne**

| Taille de l'antenne (m) | Bande C<br>6 GHz | Bande X<br>8 GHz | Bande Ku<br>14 GHz | Bande Ka<br>27,5 GHz | Bande Ka<br>31 GHz |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 1,2                     | <15°             | <15°             | <15°               | <10°                 | <9°                |
| 3                       | <15°             | <15°             | <15°               | <10°                 | <8°                |
| 4,5                     | <13°             | <13°             | <12°               | <8°                  | <7°                |
| 7,3                     | <12°             | <11°             | <10°               | <7°                  | <5°                |
| 9                       | <10°             | <10°             | <10°               | <6°                  | <3°                |
| 16                      | <10°             | <9°              | <8°                | <3°                  |                    |
| 32                      | <10°             | <7°              | <3°                |                      |                    |

Le satellite principal et le satellite adjacent ne doivent pas se trouver sur la même orbite, sauf si l'on dispose d'éphémérides très précises.

### 6.3.2 Station de réception

La couverture du faisceau des répéteurs du satellite principal et du satellite adjacent doit recouvrir simultanément la station d'émission et la station de réception. De plus, le système de géolocalisation doit être suffisamment efficace et disposer par exemple d'un étage d'entrée radiofréquence et d'un logiciel d'acquisition des données.

### 6.3.3 Emetteur de référence

On emploie un émetteur de référence sur la liaison montante pour émettre un signal de référence vers le satellite principal ou le satellite adjacent depuis une position connue (avec une latitude, une longitude et une altitude précises) et avec des paramètres connus (fréquence, largeur de bande, polarisation). Le signal de référence est généralement un signal modulé; toutefois, il est préférable d'employer un signal à étalement de spectre.

On peut se servir du signal de référence pour éliminer les erreurs inhérentes au cours de mesures TDOA et FDOA, en particulier l'erreur de dérive de l'oscillateur local du répéteur, ainsi que les erreurs présentes dans l'éphéméride du satellite. Si l'éphéméride du satellite n'est pas suffisamment précise (par exemple si elle a été téléchargée depuis l'Internet), il est recommandé d'employer trois à cinq signaux de référence pour obtenir une géolocalisation précise.

## 6.4 Techniques de géolocalisation de l'émetteur au sol

Pour pouvoir effectuer des mesures dans des situations difficiles, il est recommandé d'améliorer le système de géolocalisation par les techniques présentées ci-après.

### 6.4.1 Technique d'annulation de la porteuse

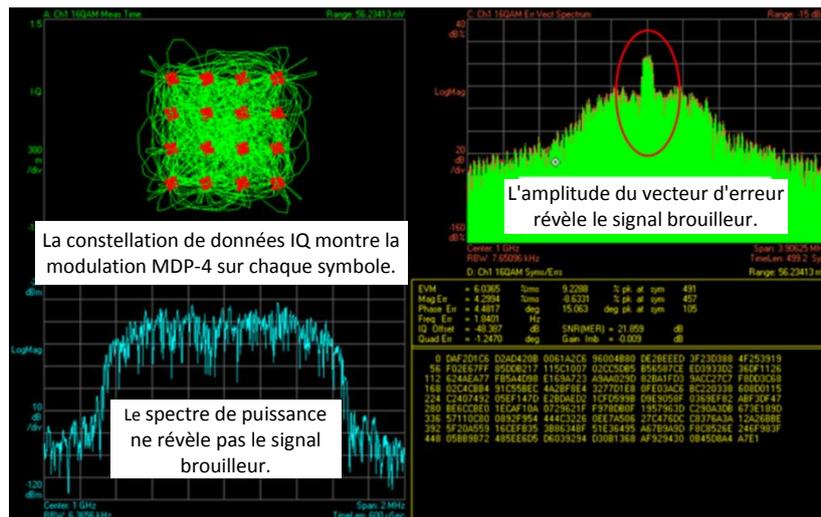
Dans certains cas, lorsque le satellite adjacent émet un signal puissant, celui-ci peut recouvrir le lobe latéral du brouillage. Les mesures de géolocalisation peuvent alors échouer, ou les résultats de la géolocalisation peuvent être faussés. La technique d'annulation de la porteuse permet de supprimer l'effet de ce signal puissant provenant du satellite adjacent. Elle peut être appliquée de la manière suivante:

- mesurer et analyser les paramètres de la porteuse originale du satellite adjacent, c'est-à-dire la fréquence, la largeur de bande, le type de modulation et le débit de symboles;
- reconstituer une porteuse semblable à la porteuse originale;
- soustraire la porteuse originale à la porteuse reconstituée, puis retirer dans toute la mesure du possible la porteuse originale des données de l'échantillon.

Ce processus peut aussi être effectué au moyen d'un logiciel d'analyse vectorielle du signal (VSA), qui permet de calculer la forme d'onde temporelle selon l'amplitude du vecteur d'erreur, en utilisant un enregistrement des données IQ issues de ce signal puissant sur le canal adjacent. Pour ce faire, il faut charger l'enregistrement dans le logiciel VSA et saisir les paramètres de modulation du signal puissant, en particulier le format de la modulation, le débit de symboles et le type de filtre, comme le montre la Fig. 13. On peut alors utiliser l'amplitude du vecteur d'erreur pour visualiser le spectre du signal brouilleur et la forme d'onde EVM pour reconstituer le signal.

FIGURE 13

Exemple d'application utilisant la technique d'annulation de la porteuse



#### 6.4.2 Technique de traitement à gain élevé

Si le satellite adjacent est éloigné du satellite principal, l'énergie de la diaphonie sera trop faible pour permettre une détection; la géolocalisation va donc échouer. La solution consiste à améliorer le gain du traitement du système, ce qui revient à améliorer la capacité du système à extraire un signal faible, et à accroître la distance entre les satellites principal et adjacent.

On peut appliquer cette technique en augmentant le temps d'intégration et en accroissant la largeur de bande des mesures du système de géolocalisation.

#### 6.4.3 Technique de détermination de la mobilité

La ligne de position TDOA dépend de la distance séparant l'émetteur du satellite principal et du satellite adjacent. Si l'émetteur au sol est mobile, la ligne TDOA change considérablement. S'il est stationnaire, la ligne TDOA ne varie que de quelques kilomètres. Cette ligne peut donc servir à évaluer la mobilité de l'émetteur si on l'observe longtemps.

### 6.5 Facteurs ayant une incidence sur la précision de la géolocalisation

La précision de la géolocalisation dépend dans une large mesure des facteurs suivants:

- La précision de l'éphéméride du satellite:  
Les informations sur la position en trois dimensions et sur la vitesse du satellite sont considérées comme un facteur connu dans les algorithmes de géolocalisation et les équations correspondantes. Les erreurs des éphémérides des satellites ont une incidence directe sur la précision de la localisation, dont elles constituent le principal facteur d'erreur.
- La précision de l'emplacement de référence:  
Les stations de référence jouent un rôle important dans la correction des erreurs des éphémérides et des erreurs inhérentes. La précision de la position de la station de référence détermine dans une large mesure la précision de la géolocalisation.
- Choix du lieu de la station de référence:  
La répartition géographique des stations de référence a également une incidence sur la correction des erreurs d'éphémérides et des erreurs inhérentes. D'une manière générale, l'une des stations de référence devrait être proche de l'émetteur non autorisé tandis que les autres devraient être réparties autour de lui et être très distantes les unes des autres.

- Heure de la géolocalisation:  
En raison des perturbations de la position du satellite, il est difficile de mesurer avec précision la légère différence de vitesse radiale entre les satellites et chaque station de liaison montante. Aussi la précision de la localisation sera-t-elle médiocre à deux moments de la journée.
- Retard:  
Comme le signal du satellite est transmis à travers la troposphère, l'ionosphère, le canal de réception et les équipements, les corrections de retard peuvent connaître des variations qui réduisent la précision de la géolocalisation.

## 7 Identification d'émetteurs non autorisés

Les mesures de géolocalisation effectuées à partir des données d'un satellite ne fournissent qu'une évaluation de l'emplacement de l'émetteur dans une zone qui peut s'étendre sur des dizaines ou des centaines de kilomètres carrés. Il faut ensuite déployer une ou plusieurs stations de contrôle mobiles pour déterminer l'emplacement de l'émetteur à l'intérieur de cette zone. On trouvera dans la présente section une description des systèmes mobiles et des méthodes permettant d'identifier les brouillages et de les atténuer.

### 7.1 Composition du système de contrôle mobile

Si l'on emploie des systèmes de contrôle mobile pour identifier et localiser des émetteurs non autorisés, il faut envisager d'utiliser les équipements portatifs suivants:

- des plates-formes de contrôle:
  - des plates-formes de contrôle au sol, comme par exemple un véhicule de contrôle;
  - des plates-formes de contrôle aériennes, par exemple un drone, un aéronef, un ballon captif ou un aérostat;
- un analyseur de spectre portatif;
- des antennes directives et équidirectives;
- un LNA, un LNB et des filtres passe-bande adéquats;
- des câbles RF à faible perte;
- un récepteur GPS et une boussole;
- un dispositif d'émission de données et un dispositif de contrôle à distance s'il est nécessaire de transmettre des données.

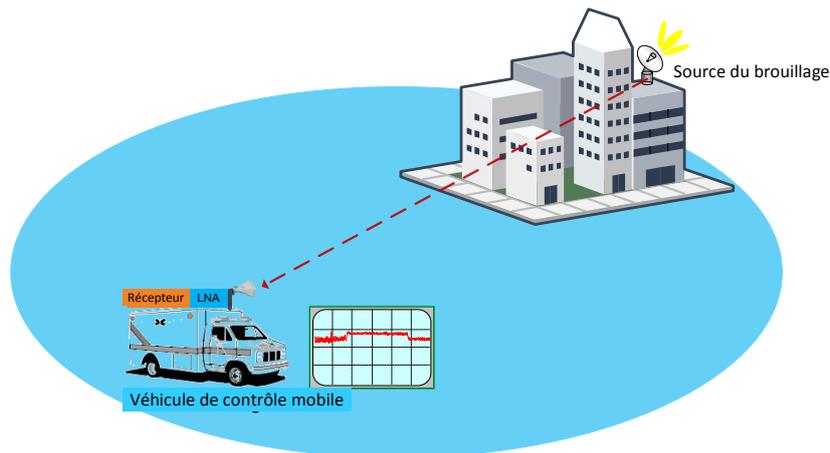
### 7.2 Méthodes de recherche au sol

#### 7.2.1 Méthode classique fondée sur la comparaison d'amplitudes

La méthode classique de recherche d'émetteurs situés au sol commence dans la zone établie par le système de géolocalisation. Elle se fonde sur le radiorallieement du signal: on effectue plusieurs mesures de la puissance à l'arrivée (POA) en différents endroits afin de réduire progressivement la zone jusqu'à trouver l'emplacement exact de l'émetteur non autorisé. L'inconvénient de cette méthode tient au fait que le trajet de propagation de l'onde radioélectrique peut être considérablement modifié par un environnement électromagnétique complexe; il faut donc parfois beaucoup de temps pour trouver les meilleurs sites de réception en visibilité directe afin d'effectuer le radiorallieement du signal. De plus, la difficulté de trouver l'emplacement des émetteurs non autorisés augmente considérablement si l'on emploie des bandes de fréquences plus élevées. On trouvera de plus amples informations à cet égard au § 5.4.5.3.2 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique, édition 2011. La méthode classique fondée sur la comparaison d'amplitudes est illustrée dans la Fig. 14.

FIGURE 14

Méthode de recherche de la source du brouillage fondée sur la comparaison d'amplitudes

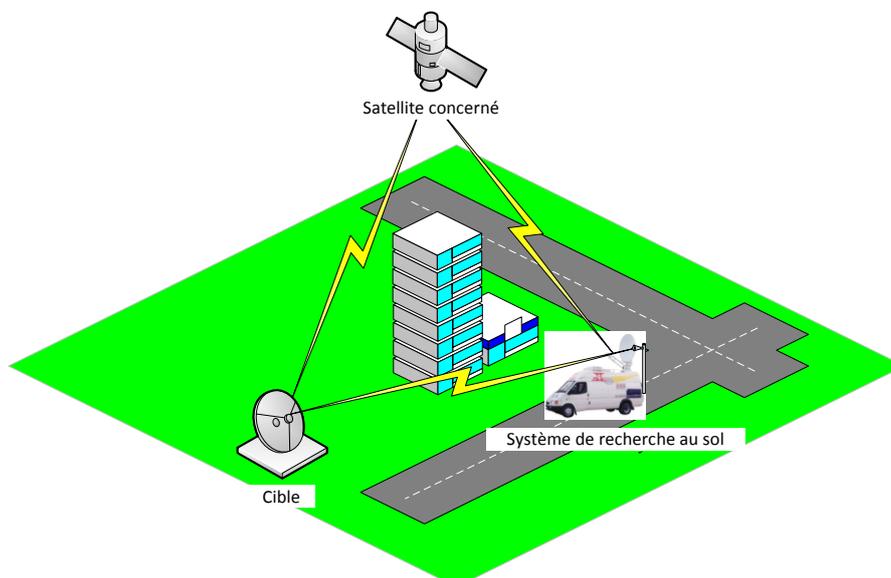


### 7.2.2 Emploi d'un algorithme de corrélation croisée pour améliorer la sensibilité du système

La Figure 15 illustre une méthode permettant, par un travail de coopération entre un satellite et des équipements au sol, de déterminer un emplacement en s'appuyant sur un algorithme de corrélation croisée. Une antenne de réception fixe ou embarquée sur un véhicule, qui est orientée vers le satellite recevant le brouillage, est disposée de manière à recevoir le lobe principal du brouillage dans la fréquence de la liaison descendante. Simultanément, le lobe latéral du brouillage dans la fréquence de la liaison montante est reçu par une antenne portable ou embarquée sur un véhicule. Les deux signaux sont recueillis de manière synchrone et transmis par un réseau hertzien pour effectuer des mesures de corrélation croisée fondées sur la fonction de contre-ambiguïté. Si un pic de corrélation apparaît dans les résultats, cela signifie que l'émetteur ciblé est relativement proche, le pic de corrélation le plus élevé représentant la direction de la source du brouillage. On trouvera de plus amples détails à ce sujet au § 5.4.5.3.3 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique, édition 2011.

FIGURE 15

Recherche au sol fondée sur des algorithmes de corrélation croisée dans un système de localisation mixte satellite-sol

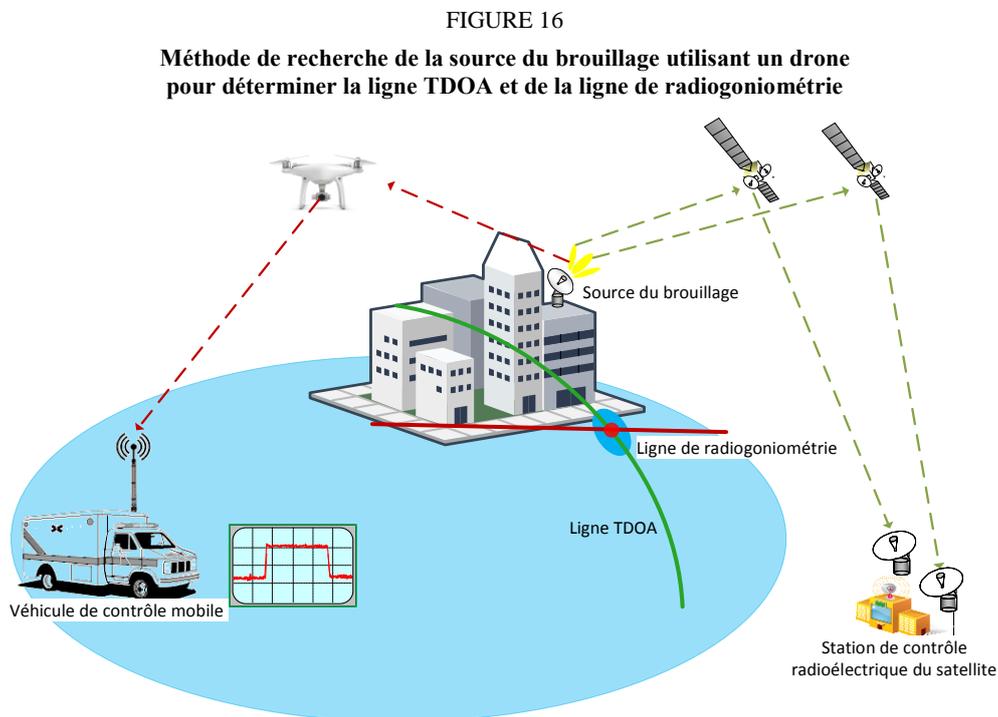


### 7.3.3 Emploi d'une méthode de contrôle aérien pour détecter rapidement le brouillage

L'antenne d'émission est orientée vers le satellite, tandis que le récepteur du signal est disposé au sol afin que le lobe latéral du signal soit très faible et difficile à détecter. Au demeurant, comme la plupart des émetteurs de brouillages se trouvent dans des zones urbaines, le signal a tendance à être bloqué par des immeubles. C'est pourquoi les méthodes de recherche au sol décrites dans les §§ 7.3.1 et 7.3.2 prennent beaucoup de temps.

Pour régler le problème de recherche «sur le dernier kilomètre», on peut envisager de rechercher la source du brouillage dont souffre le satellite en se servant d'un drone pour accroître l'horizon visible, se dégager des obstacles ou des immeubles et augmenter la puissance de la réception (l'antenne de réception étant proche du lobe principal du signal brouilleur). Cette méthode offre de meilleures chances de trouver la direction de l'émetteur. Il peut être efficace et pratique de combiner les résultats de la géolocalisation et de la recherche de la direction de l'émetteur pour cerner l'emplacement de l'émetteur, comme le montre la Fig. 16.

Le résultat de la géolocalisation peut être utilisé comme une information de départ. La ligne TDOA peut être conservée car elle est aussi stable que précise. Le drone détermine par un balayage mécanique la direction du signal brouilleur, qui fournit la ligne de radiogoniométrie. L'intersection de celle-ci avec la ligne TDOA donne la position de l'émetteur du brouillage. L'équipement embarqué sur le drone permet de trouver la direction de l'émetteur par une comparaison des amplitudes fondée sur une antenne directive.



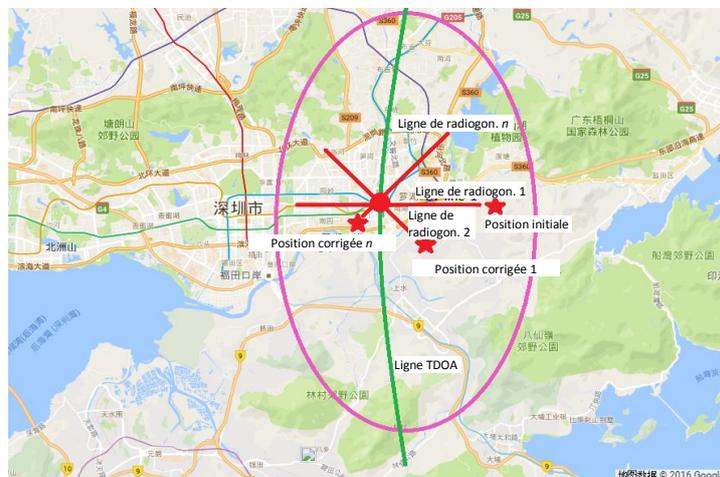
Comme la ligne TDOA est précise, qu'elle se trouve dans la direction nord-sud et qu'un angle plus important entre la ligne TDOA et la ligne de radiogoniométrie permet d'obtenir une localisation plus précise, la procédure de recherche peut être organisée de la manière suivante:

Une fois la géolocalisation achevée, se rendre dans la zone géolocalisée et déployer le drone à l'est ou à l'ouest de la ligne TDOA. Effectuer la recherche de direction et établir la position possible de la source de brouillage par l'intersection de la ligne TDOA et de la ligne de radiogoniométrie. Puis corriger la position du drone pour obtenir une nouvelle ligne TDOA afin de réduire l'erreur provenant de la recherche de direction. Répéter la correction de la position du drone pour s'approcher progressivement de la position réelle de l'émetteur du signal brouilleur.

La procédure de recherche est illustrée dans la Fig. 17. La zone elliptique est le résultat de la géolocalisation; elle correspond à la zone dans laquelle l'émetteur du signal brouilleur pourrait se trouver. La ligne verte est la ligne TDOA traversant la zone géolocalisée. Les étoiles rouges marquent la position du drone. Les lignes rouges sont les lignes de radiogoniométrie fournies par le drone, et le point rouge au centre marque la position de la source de brouillage.

FIGURE 17

#### Procédure de recherche de la source de brouillage



## Annexe 1

### Catégories de stations de contrôle de systèmes à satellites

Lorsqu'on étudie différents scénarios de contrôle, il convient de prendre en compte la souplesse de déploiement et d'exploitation des divers systèmes envisageables.

Les systèmes fixes sont essentiels aux stations de contrôle, notamment pour contrôler les satellites à faisceau mondial ou régional, ainsi que pour géolocaliser les émetteurs au sol. Les systèmes non fixes sont nécessaires pour contrôler les satellites à faisceau ponctuel, pour déterminer des directions et pour tester des environnements électromagnétiques; ils jouent aussi un rôle auxiliaire dans les systèmes de géolocalisation.

#### A1.1 Station de contrôle fixe

Pour pouvoir effectuer les mesures prévues dans le Règlement des radiocommunications, les systèmes de contrôle fixes sont essentiels aux stations de contrôle des systèmes à satellites. Il est recommandé d'installer ces systèmes fixes dans un environnement électromagnétique «propre» pour obtenir une efficacité maximale en termes de réception des signaux satellitaires, ainsi que pour faciliter les travaux ultérieurs de mesure et d'analyse.

La taille de l'antenne déterminant le gain de celle-ci, l'antenne doit être suffisamment grande pour permettre une bonne réception des signaux. Des systèmes de modulation d'un ordre supérieur nécessitent des rapports  $C/N$  plus élevés. Pour garantir la cohérence des mesures sur le long terme, il faut vérifier régulièrement l'affaiblissement de la transmission; c'est l'un des principaux éléments de la maintenance du système.

### **A1.2 Station de contrôle transportable**

Un système de contrôle transportable est un système auxiliaire du système de contrôle fixe. Il peut être embarqué dans un véhicule de contrôle ou être installé provisoirement dans n'importe quel endroit, pour autant qu'il soit situé en-dehors de la couverture du faisceau du système de contrôle fixe. Le système transportable sert généralement à mesurer des signaux satellitaires le long d'une frontière nationale, à proximité d'un port ou autour d'une région importante pendant un événement majeur.

En outre, les satellites à faisceau ponctuel ont une faible couverture de faisceau (quelques centaines de kilomètres); les systèmes de contrôle transportables leur sont donc indispensables.

### **A1.3 Station de contrôle mobile**

Un système de contrôle mobile peut être installé et exploité dans un véhicule de contrôle qui peut être en mouvement ou stationnaire. Il permet d'observer le spectre, d'effectuer un radioraliement du signal et de déterminer la direction d'une source de brouillage ou d'autres émetteurs présentant un intérêt, ainsi que de tester un environnement électromagnétique dans une zone particulière pendant un événement majeur.

### **A1.4 Station de contrôle aérienne**

Une station de contrôle aérienne est un système auxiliaire du système de contrôle mobile. C'est un outil rapide pour observer le spectre et déterminer la direction d'une source de brouillage, car ces stations utilisent un drone ou un aéronef. Elles permettent d'éviter facilement des affaiblissements de propagation non souhaités qui sont provoqués par des objets au sol; elles ne souffrent que de l'affaiblissement de la propagation en visibilité directe. Cependant, si les drones ne sont pas employés correctement, ils peuvent poser un problème de sécurité à d'autres objets volants, par exemple des avions. Il est donc essentiel de se conformer aux législations et réglementations en vigueur dans le domaine de l'utilisation des drones.

### **A1.5 Station de contrôle portative**

Un système de contrôle portatif est aussi pratique qu'utile pour trouver la direction d'une source de brouillage ou d'un émetteur présentant un intérêt dans la zone du «dernier kilomètre». Il se compose d'au moins une antenne équidirective, d'une antenne directive, d'un LNA (ou LNB) et d'un analyseur de spectre.

## **Annexe 2**

### **Formats des données des éphémérides de satellites**

#### **A2.1 Format TLE**

Le format TLE se compose de deux lignes de données décrivant des éléments en orbite. Il s'agit de données sur le temps, la coordination, la position et la vitesse d'un objet en orbite autour de la Terre et comportant six éléments Kepler. La représentation des données TLE étant propre aux modèles de perturbation simplifiés (SGP, SGP4, SDP4, SGP8 et SDP8), tout algorithme acceptant des données sources au format TLE devrait implémenter l'un des modèles de perturbation simplifiés pour rendre correctement compte de l'état d'un objet au moment considéré.

Le *United States Space Surveillance Network* («réseau de surveillance spatiale des Etats-Unis d'Amérique») suit tous les objets détectables en orbite autour de la Terre et crée des données TLE pour chacun d'eux. Il publie les fichiers TLE de tous les objets non confidentiels sur un site web appelé *Space Track*, qui bénéficie d'un financement commercial. Le format TLE est devenu une norme de fait pour la distribution des données orbitales relatives à un objet gravitant autour de la Terre.

Le format TLE peut comprendre une ligne de titre avant la ligne des éléments. Toutefois, le titre n'est pas obligatoire car chaque ligne de données comporte un code unique d'identification de l'objet.

Le format TLE se présente de la manière suivante:

ISS (ZARYA)

1 25544U98067A 08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927

2 25544 51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537

TABLEAU A2-1  
Description du format TLE

| N° de série    | N° de caractère | Description   | Exemple      |
|----------------|-----------------|---|--------------|
| <b>Ligne 1</b> |                 |   |              |
| 1-1            | 1               | Numéro de ligne des données relatives aux éléments  | 1            |
| 1-2            | 2               | Espace  |              |
| 1-3            | 3~7             | Numéro du satellite   | 25544        |
| 1-4            | 8               | Classification (U=non classé)   | U            |
| 1-5            | 9               | Espace  |              |
| 1-6            | 10~11           | Indicateur international (deux derniers chiffres de l'année de lancement)                   | 98           |
| 1-7            | 12~14           | Indicateur international (numéro de lancement dans l'année)                                 | 067          |
| 1-8            | 15~17           | Indicateur international (élément lancé)  | A            |
| 1-9            | 18              | Espace  |              |
| 1-10           | 19~20           | Année de l'époque (deux derniers chiffres de l'année)                                       | 08           |
| 1-11           | 21~32           | Epoque (jour dans l'année et partie de ce jour)   | 264.51782528 |
| 1-12           | 33              | Espace  |              |
| 1-13           | 34~43           | Première dérivée du mouvement moyen divisée par deux  | -.00002182   |
| 1-14           | 44              | Espace  |              |
| 1-15           | 45~52           | Seconde dérivée du mouvement moyen divisée par six (virgule décimale établie par hypothèse) | 00000-0      |
| 1-16           | 53              | Espace  |              |
| 1-17           | 54~61           | Conditions de résistance BSTAR (virgule décimale établie par hypothèse)                     | -11606-4     |
| 1-18           | 62              | Espace  |              |
| 1-19           | 63              | Numéro 0 (à l'origine il devait s'agir du «type éphéméride»)                                | 0            |

TABLEAU A2-1 (*fin*)

| N° de série    | N° de caractère | Description   | Exemple     |
|----------------|-----------------|---|-------------|
| 1-20           | 64              | Espace  |             |
| 1-21           | 65~68           | Numéro du jeu d'éléments, incrémenté lorsqu'un nouveau fichier TLE est produit pour cet objet             | 292         |
| 1-22           | 69              | Somme de contrôle (modulo 10) (lettres, espaces blancs, points, signes positifs = 0, signes négatifs = 1) | 7           |
| <b>Ligne 2</b> |                 |   |             |
| 2-1            | 1               | Numéro de ligne   | 2           |
| 2-2            | 2               | Espace  |             |
| 2-3            | 3~7             | Numéro du satellite   | 25544       |
| 2-4            | 8               | Espace  |             |
| 2-5            | 9~16            | Inclinaison (degrés)  | 51.6416     |
| 2-6            | 17              | Espace  |             |
| 2-7            | 18~25           | Ascension droite du noeud ascendant (degrés)  | 247.4627    |
| 2-8            | 26              | Espace  |             |
| 2-9            | 27~33           | Excentricité (virgule décimale établie par hypothèse)   | 0006703     |
| 2-10           | 34              | Espace  |             |
| 2-11           | 35~42           | Argument du périégée (degrés)   | 130.5360    |
| 2-12           | 43              | Espace  |             |
| 2-13           | 44~51           | Anomalie moyenne (degrés)   | 325.0288    |
| 2-14           | 52              | Espace  |             |
| 2-15           | 53~63           | Mouvement moyen [révolutions par jour]  | 15.72125391 |
| 2-16           | 64~68           | Nombre de révolutions à l'époque [révolutions]  | 56353       |
| 2-17           | 69              | Somme de contrôle (modulo 10)   | 7           |

### Annexe 3

#### Contrôle des brouillages causés par des satellites dans des bandes attribuées à titre primaire au service de radioastronomie

##### A3.1 Introduction

L'antenne qui doit être employée pour effectuer des mesures de brouillages après un lancement doit être capable de poursuivre un satellite; elle doit en principe avoir un gain de 40 dBi et doit être équipée de récepteurs à relativement faible bruit. Comme les valeurs seuil indiquées dans la Recommandation UIT-R RA.769 sont établies pour une pénétration du lobe latéral de 0 dBi, et non pour une pénétration du faisceau principal, tout système de contrôle conforme à ces spécifications peut détecter rapidement des signaux brouilleurs et établir correctement le rapport brouillage/bruit. Pour éviter d'introduire des phénomènes non souhaités, le trajet du signal du récepteur doit être extrêmement linéaire.

L'acquisition de données est décrite au § A3.2. Les niveaux de signal requis et les seuils sont définis au § A3.3. Il faut bien étalonner l'antenne de contrôle en utilisant de puissantes sources radioélectriques célestes dont la densité spectrale de puissance surfacique est connue. Cette procédure est décrite au § A3.4. Enfin, la procédure permettant de détecter des brouillages de fréquences radioélectriques est décrite au § A3.5.

### A3.2 Acquisition de données

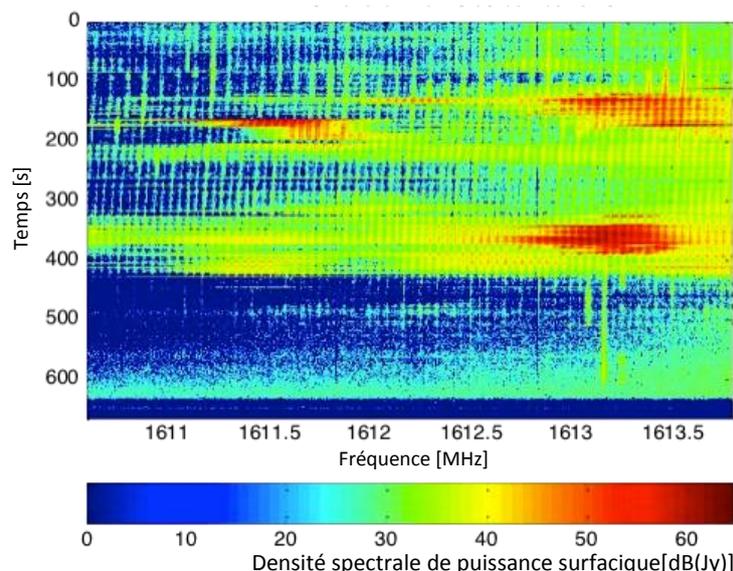
Les mesures visant à déterminer l'affaiblissement des données sont effectuées sous forme de séries chronologiques de  $N$  mesures avec un intervalle de temps  $\Delta t$  et en couvrant  $M$  canaux de fréquences dans une largeur de bande  $\Delta f$ .

Il est préférable d'acquérir les données au moyen d'un analyseur de spectre multicanal, par exemple un banc de filtrage numérique, et en travaillant simultanément sur des centaines ou des milliers de canaux bien isolés. On devrait ainsi parvenir à couvrir simultanément l'ensemble de la bande attribuée à la radioastronomie. Dans la pratique, les débits de données sont généralement d'environ un spectre par seconde; cependant, il est parfois nécessaire de disposer d'un débit supérieur pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des échelles de temps des brouillages.

Le diagramme des données observées que l'on obtient généralement après un étalonnage est illustré dans la Figure 18. Dans ce cas particulier, le seuil du brouillage préjudiciable à l'observation des raies spectrales fixé dans la Recommandation UIT-R RA.769 est de  $-238$  dB(W/m<sup>2</sup>/Hz), ou  $+22$  dB(Jy ( $1\text{Jy} = 10^{-26}$  (W/m<sup>2</sup>/Hz))). La bande considérée dans cet exemple n'est pas utilisée pour les observations du continuum.

FIGURE 18

Diagramme du taux d'occupation temps-fréquence dans la bande RAS des 1 610,6-1 613,8 MHz



L'intervalle de mesure est d'une seconde et la largeur de bande du canal mesuré est de 6,1 kHz. Ce diagramme est bâti sur  $N = 630$  enregistrements de données et  $M = 420$  canaux du spectre dans la bande attribuée au service de radioastronomie (SRA).

Remerciements: ces données ont été fournies par la station de contrôle des systèmes à satellites de Leeheim, en Allemagne, qui est exploitée par la *Bundesnetzagentur* (Agence fédérale des réseaux) au moyen d'un spectromètre construit par le *Max Planck Institut für Radioastronomie* (Institut Max Planck pour la radioastronomie).

Au cours du traitement, il est possible que chaque enregistrement de données soit ramené à une valeur moyenne (empilé) pour obtenir une meilleure sensibilité. De même, le système de contrôle peut fonctionner sur des largeurs de canal plus faibles que celles du spectre de référence présentées dans la Recommandation UIT-R RA.769, qui commencent 10 kHz en-dessous des 1 GHz et vont jusqu'à 1 MHz au-dessus des 60 GHz. Il faut alors effectuer la conversion requise vers la bonne largeur de bande avant de pouvoir déterminer le niveau de brouillage.

### A3.3 Niveaux et seuils des signaux

Les signaux envoyés à la station de contrôle par les sources radioélectriques utilisées pour l'étalonnage et par les émissions non souhaitées des satellites sont souvent cachés dans le bruit de chaque observation de courte durée, mais on peut les reconnaître en combinant plusieurs observations. Compte tenu des caractéristiques du bruit blanc du système de réception et du ciel, on peut réduire le niveau de bruit quadratique moyen  $\Delta T$  d'une mesure par de plus longues intégrations:

$$\Delta T = T_{sys} / \sqrt{(\Delta t \Delta f)} \quad (1)$$

où aux fins de l'équation (1),  $T_{sys}$  est la température de bruit du système,  $\Delta t$  est la durée totale de la période sur laquelle la moyenne des différentes observations a été calculée, et  $\Delta f$  est la largeur de bande pour laquelle on a calculé la moyenne des différents canaux du spectromètre.

Pour faire une évaluation quantitative du pourcentage d'affaiblissement des données dans les bandes attribuées au SRA, il faut se fonder sur les signaux de brouillage identifiés dans les enregistrements de données qui dépassent les niveaux de brouillage préjudiciable définis dans la Recommandation UIT-R RA.769. Ces enregistrements sont effectués pendant un intervalle de temps de référence bien défini de 2 000 secondes (soit environ 33 minutes) et dans une largeur de bande de référence bien définie ( $\Delta f_{ref}$ ) ou une largeur de bande du continuum de référence ( $\Delta f_b$ ).

Les niveaux de puissance surfacique  $T_{spec}$  et  $T_{cont}$  à employer pour évaluer l'affaiblissement des données dans les bandes attribuées au SRA sont déduits respectivement des valeurs des raies spectrales (indice *spec*) produites par la densité spectrale de puissance surfacique d'une bande étroite, ou des valeurs observées de la densité spectrale de puissance surfacique d'un continuum de bande large (indice *cont*). Ces valeurs sont adaptées pour correspondre aux largeurs de bande et aux durées indiquées dans la Recommandation UIT-R RA.769:

$$T_{spec}(\Delta t, \Delta f) = spfd_{spec}(RA.769, \text{Tableau 2}) + 5 \log ((\Delta f_{ref} / \Delta f) (2000/\Delta t)) \quad (\text{dB(W/m}^2/\text{Hz)}) \quad (2a)$$

$$T_{cont}(\Delta t, \Delta f) = spfd_{cont}(RA.769, \text{Tableau 1}) + 5 \log ((\Delta f_b / \Delta f) (2000/\Delta t)) \quad (\text{dB(W/m}^2/\text{Hz)}) \quad (2b)$$

où 2 000 secondes est l'intervalle de temps de référence. Pour les observations de raies spectrales, la valeur à employer pour  $\Delta f_{ref}$  est égale à la largeur de bande du canal indiquée dans la Recommandation UIT-R RA.769. Pour les observations d'un continuum, la largeur de bande de référence  $\Delta f_b$  est la largeur de bande attribuée au SRA pour les bandes allant jusqu'à 60 GHz, et 8 GHz pour toutes les bandes de fréquences supérieures (voir la Recommandation UIT-R RA.769).

Les seuils définis dans la Recommandation UIT-R RA.769 sont fondés sur des signaux représentant 10% des fluctuations du bruit intégré dans le système de détection, pour un gain de 0 dBi et pour les températures de système radioastronomique indiquées dans la Recommandation. Ces seuils de détection doivent être corrigés de la manière décrite ci-après pour tenir compte du gain de l'antenne de contrôle, qui est supérieur à 0 dBi, et du rapport entre les températures des deux systèmes (voir l'équation (1)).

Lorsque la pénétration du faisceau principal par l'antenne de contrôle recevant le signal brouilleur est égale aux niveaux indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769, les seuils sont les suivants:

$$S_{spec}(\Delta t, \Delta f) = -(G+10) + [10 \log (T_{sys,ref}/T_{sys,mon})] + T_{spec}(\Delta t, \Delta f) \quad (\text{dB(W/m}^2/\text{Hz)}) \quad (3a)$$

$$S_{cont}(\Delta t, \Delta f) = -(G+10) + [10 \log (T_{sys,ref}/T_{sys,mon})] + T_{cont}(\Delta t, \Delta f) \quad (\text{dB(W/m}^2/\text{Hz)}) \quad (3b)$$

Les niveaux  $T_{spec}(\Delta t, \Delta f)$  et  $T_{cont}(\Delta t, \Delta f)$ , qui sont indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769, sont déduits des équations (2a) et (2b), et le gain vers l'avant  $G$  de l'antenne de contrôle est exprimée en dB. Les termes des équations (3a) et (3b) traduisent la différence entre la température du système indiquée dans la Recommandation UIT-R RA.769 ( $T_{sys,ref}$ ) et la température du système de contrôle ( $T_{sys,mon}$ ).

### A3.4 Etalonnage du système

Les mesures effectuées à l'antenne de contrôle produisent des données exprimées en unités de température à l'antenne ( $T_A$ ). Ces données sont converties en unités de densité spectrale de puissance surfacique (dB(W/m<sup>2</sup>/Hz)) ou en Janskys (10<sup>-26</sup> (W/m<sup>2</sup>/Hz)). Ces facteurs de conversion doivent être connus avec précision en fonction de la fréquence. La procédure d'étalonnage est la suivante:

- 1) Effectuer des observations en mode ON, dans la bande de fréquences souhaitée, de quelques sources puissantes du continuum céleste. Chaque source doit avoir une puissance surfacique connue (en Janskys); c'est notamment le cas de Centaurus A, Virgo A ou d'autres sources puissantes d'étalonnage; puis
- 2) Effectuer des observations en mode OFF, pour chaque étalonnage, sur une partie de ciel vide voisine afin d'établir le signal nul.

On calcule le facteur de conversion, en Janskys/K, en divisant la puissance de la source par la différence de signal mesurée ( $T_A(\text{ON}) - T_A(\text{OFF})$ ). Ce paramètre de sensibilité donne le nombre de Janskys nécessaire pour produire un Kelvin de signal à la station de contrôle. La puissance de la source radioélectrique et les niveaux de brouillage préjudiciable peuvent être exprimés en Janskys.

### A3.5 Détection des brouillages de fréquences radioélectriques

Les niveaux de brouillage moyen et maximal dans la bande attribuée au SRA devraient respectivement rester en-dessous des niveaux indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour le continuum et les raies spectrales. Dans le cas contraire, ils sont considérés comme un affaiblissement des données. A noter que les bandes attribuées au SRA qui sont mentionnées dans le présent Rapport ont été attribuées au titre de l'observation des raies spectrales uniquement, de l'observation du continuum uniquement, ou de l'observation des deux.

Dans le cas de l'observation des raies spectrales, tous les canaux d'une largeur de bande  $\Delta f$  situés dans la bande attribuée au SRA doivent être analysés de manière indépendante pour détecter la présence d'éventuels brouillages au-dessus du seuil préjudiciable; cette analyse doit s'effectuer au moyen de l'équation (2a). Le pic doit se trouver en-dessous du niveau préjudiciable dans chacun des canaux. Dans le cas de l'observation du continuum, il faut analyser le niveau de brouillage moyen dans l'ensemble de la bande au moyen de l'équation (2b).

Après l'étalonnage des enregistrements de données et des conversions de températures d'antenne (K) en puissances surfaciques, les données enregistrées pour chaque intervalle de mesure doivent être analysées pour détecter la présence de brouillages supérieurs aux seuils préjudiciables fixés pour l'observation des raies spectrales et du continuum (voir les équations (2a) et (2b)). Cette procédure permet d'établir un diagramme du taux d'occupation temps-fréquence des mesures (diagramme en cascade) avec les dimensions de  $N$  enregistrements et de  $M$  canaux spectraux. La Figure 18 contient un exemple de mesure d'étalonnage d'un brouillage variant rapidement pendant le passage d'un satellite.

Les sources de brouillage à étalement de spectre émettent des signaux de faible puissance dans une grande largeur de bande. Les mesures ON et OFF de ces brouillages doivent couvrir une largeur de bande suffisante pour permettre de détecter le surcroît de densité spectrale de puissance surfacique.

D'une manière générale, l'intervalle de temps pendant lequel les mesures sont effectuées doit être suffisamment court pour mettre en évidence la variabilité dans le temps et le caractère intermittent du signal brouilleur. Cependant, lorsque la source de brouillage est persistante et qu'elle emploie des fréquences variables ou un balayage de fréquences, certains signaux brouilleurs risquent de rester en-dessous du seuil de détection si l'on utilise un intervalle de temps court. Il est alors nécessaire de recourir à une mesure intégrée dans un intervalle de temps couvrant toute la période de variabilité ou tout le cycle de balayage.

---