

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2356-2
(06/2018)

**Procédures de planification et
d'optimisation des réseaux de contrôle du
spectre en ondes métriques/décimétriques**

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

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.2356-2*

**Procédures de planification et d'optimisation des réseaux de contrôle
du spectre en ondes métriques/décimétriques**

(2015-2017-2018)

Résumé

Dans le présent Rapport, trois méthodes différentes sont prises en considération. La première méthode consiste à combiner des mesures de l'angle d'incidence (AOA) effectuées sur plusieurs sites à l'aide de réseaux d'antennes de radiogoniométrie afin de déterminer l'emplacement d'un émetteur. La deuxième méthode consiste à combiner des mesures de différence entre les instants d'arrivée (TDOA) effectuées sur au moins trois sites (deux paires de mesures TDOA entre les trois sites sont nécessaires pour la géolocalisation). La troisième méthode consiste à combiner à la fois des mesures AOA et des mesures TDOA pour procéder à la géolocalisation (au moins deux sites sont nécessaires: l'un capable d'effectuer à la fois des mesures AOA et TDOA, et un autre capable d'effectuer uniquement des mesures TDOA). Le présent Rapport comprend les trois annexes suivantes:

Annexe 1: Exemple pratique de planification d'un réseau SMN AOA local sur un terrain relativement plat

Annexe 2: Planification d'un réseau SMN AOA dans des régions montagneuses ou vallonnées

Annexe 3: Performance du récepteur et incidence associée sur la couverture du réseau

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 1 de l'UIT-D.

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	4
2 Décisions fondamentales à prendre par une administration en vue du processus de planification	5
3 Planification et optimisation des réseaux SMN AOA	7
3.1 Principes essentiels de la méthode générale existante	7
3.2 Modélisation informatique d'un réseau SMN	9
3.3 Ajustement des emplacements des stations lors de l'étude des sites et acquisition du terrain	24
3.4 Planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux	26
4 Planification et optimisation des réseaux SMN TDOA.....	26
4.1 Principes essentiels	26
4.2 Planification de réseaux SMN TDOA en zone urbaine.....	29
4.3 Planification de réseaux de contrôle TDOA pour les grandes zones rurales.....	31
5 Planification des réseaux de contrôle hybrides.....	31
5.1 Comparaison des méthodes de géolocalisation	32
5.2 Simulation de la couverture et de la précision de la géolocalisation	32
5.3 Résumé concernant la performance des systèmes hybrides	34
6 Méthode générale de planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux	34
6.1 Modélisation informatique des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux	35
7 Conclusion.....	41
Annexe 1 – Exemple pratique de planification d'un réseau SMN AOA local sur un terrain relativement plat	41
A1-1 Introduction.....	41
A1-2 Données initiales pour la planification de la topologie d'un réseau SMN.....	42
A1-3 Optimisation de la topologie du réseau SMN le plus simple.....	42
A1-4 Topologie régulière d'un vaste réseau SMN	44
A1-5 Structure irrégulière de la topologie d'un réseau SMN.....	45
Annexe 2 – Planification d'un réseau SMN AOA dans des régions montagneuses ou vallonnées	48

	<i>Page</i>
A2-1 Préface	48
A2-2 Zones de couverture pour la radiogoniométrie et la localisation dans le cas d'antennes de station placées à une certaine altitude	48
A2-3 Réduction de la probabilité des effets dus aux réflexions	50
A2-4 Remarques finales.....	52
Annexe 3 – Performance du récepteur et incidence associée sur la couverture du réseau	53
A3-1 Incidence de la performance du récepteur sur l'espacement des stations dans le réseau de géolocalisation	53
A3-2 Dynamique instantanée.....	53
A3-3 Bruit de phase	53
A3-4 Effets sur la zone de couverture.....	54
A3-5 Conclusion	54
Références.....	55

1 Introduction

Le but de la planification et de l'optimisation des réseaux de contrôle du spectre (SMN) est de pouvoir assurer les fonctions de contrôle requises sur les territoires à très forte densité d'émetteurs avec le moins possible de stations de contrôle. Pour ce faire, il s'agit d'utiliser des pylônes d'antenne les moins hauts possible tout en assurant des mesures RF de qualité élevée. Les territoires considérés peuvent être des zones très peuplées ou des centres de développement industriel.

Une méthode informatisée de planification et d'optimisation en ondes métriques/décimétriques (sur la base des principes liés à l'angle d'incidence (AOA)) a été élaborée ces dernières années; elle fait l'objet du § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011). Cette méthode représente une avancée majeure par rapport aux procédures précédentes basées exclusivement sur des évaluations par des spécialistes de la conception de réseau. Dans la Recommandation UIT-R SM.1392-2, il est fait mention du § 6.8, et l'accent est mis sur les avantages techniques et économiques potentiels d'une planification et d'une optimisation efficaces des réseaux SMN dans les pays en développement. Ces avantages, que seules des méthodes informatisées peuvent offrir, sont également intéressants en tous points pour les pays développés.

L'expérience pratique a montré qu'avec les bons modèles et calculs informatiques, il est possible de réduire le nombre de stations de contrôle fixes requises pour la couverture d'une région donnée par rapport aux réseaux SMN planifiés sur la base d'évaluations de spécialistes. On parvient à ce résultat en choisissant les meilleurs emplacements pour les stations et les hauteurs optimales pour les antennes, et en tenant compte également des spécificités du terrain environnant.

Toutefois, l'expérience pratique de la mise en œuvre de cette méthode reposant sur des logiciels adaptés¹, pour des réseaux SMN constitués différemment, déployés dans des conditions géographiques différentes, et avec des moyens financiers différents selon les administrations, montre aussi que le processus de planification et d'optimisation est relativement complexe. Ce processus comprend de nombreuses étapes et dépend des principales exigences relatives au réseau SMN en projet, qu'il faut définir à l'avance. En outre, pendant l'étape de planification proprement dite, un certain nombre de décisions administratives devront être prises pour optimiser le processus. Tous ces aspects ne sont guère approfondis dans les directives existantes.

C'est la raison pour laquelle il serait utile de compléter la méthode acceptée à l'heure actuelle par des directives plus détaillées et une description pas à pas afin de rendre plus efficace l'ensemble du processus, tout en réduisant autant que possible les tâches nécessaires. C'est tout l'objet du présent Rapport.

L'association de deux techniques de géolocalisation ou plus lors de la conception d'un réseau SMN est une possibilité. Il existe différentes méthodes possibles pour procéder à la géolocalisation. Dans le présent Rapport, trois méthodes différentes sont prises en considération. La première méthode consiste à combiner des mesures AOA effectuées sur plusieurs sites à l'aide de réseaux d'antennes de radiogoniométrie afin de déterminer l'emplacement d'un émetteur. La deuxième méthode consiste à combiner des mesures de différence entre les instants d'arrivée (TDOA) effectuées sur au moins trois sites (deux paires de mesures TDOA entre les trois sites sont nécessaires pour la géolocalisation).

La troisième méthode consiste à combiner à la fois des mesures AOA et des mesures TDOA pour procéder à la géolocalisation (au moins deux sites sont nécessaires: l'un capable d'effectuer à la fois des mesures AOA et TDOA, et un autre capable d'effectuer uniquement des mesures TDOA). Dans un souci de simplicité, ces trois méthodes sont appelées:

- AOA;

¹ Logiciels tels que décrits dans l'Annexe 5 du Manuel de l'UIT-R sur l'application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique (édition de 2015).

- TDOA, et
- hybride AOA/TDOA.

Enfin, il convient de prendre en considération les facteurs de performance des récepteurs tels que le facteur de bruit/la sensibilité, le bruit de phase, etc. Plus les récepteurs sont performants, plus les stations de contrôle peuvent être espacées, permettant ainsi de réduire le nombre de stations nécessaires pour couvrir un territoire donné. Le présent Rapport comprend les trois annexes suivantes:

Annexe 1: Exemple pratique de planification d'un réseau SMN AOA local sur un terrain relativement plat

Annexe 2: Planification d'un réseau SMN AOA dans des régions montagneuses ou vallonnées

Annexe 3: Performance du récepteur et incidence associée sur la couverture du réseau

2 Décisions fondamentales à prendre par une administration en vue du processus de planification

En vue de la planification d'un réseau SMN, il faut d'abord prendre certaines décisions fondamentales concernant les objectifs, la configuration et la performance du système, compte tenu des ressources financières disponibles et prévues. Outre les points mentionnés dans la Recommandation UIT-R SM.1392-2, ces décisions concernent aussi:

– **La taille du territoire à contrôler**

Il s'agit de la zone globale qui doit être couverte par le contrôle.

– **La couverture complète ou locale du territoire par des stations fixes**

La couverture d'un territoire donné doit-elle être complète ou locale, et cette couverture doit-elle être assurée par différents réseaux secondaires locaux qui assurent une couverture complète uniquement dans les limites de leur partie du territoire global contrôlé?

– **L'utilisation de la technique AOA ou TDOA ou hybride AOA/TDOA**

Compte tenu du Rapport UIT-R SM.2211-1, il est nécessaire d'étudier les besoins de géolocalisation afin de déterminer quelles sont les techniques les mieux adaptées pour la mise en place d'un réseau SMN particulier.

– **Le choix de construire un nouveau réseau SMN ou de moderniser un réseau SMN existant**

L'administration doit décider dans quelle mesure les stations fixes existantes devraient être réutilisées dans le nouveau réseau SMN, et si leurs équipements doivent être remplacés ou modernisés pour améliorer la couverture.

– **Les catégories d'émetteurs de test et les principales fonctions de contrôle: écoute, mesure des caractéristiques des émissions, radiogoniométrie (DF), et estimation de l'emplacement d'un émetteur**

Dans les zones de couverture complète (ou quasi complète), il est important de déterminer les zones de couverture requises pour les quatre fonctions de contrôle citées en lien avec les différentes catégories d'émetteurs de test (voir le § 3.1 ci-dessous), et les fréquences de contrôle. Des approches combinées sont possibles. Par exemple, il est possible d'exiger une couverture complète en ce qui concerne la localisation pour des émetteurs de test d'une catégorie supérieure (par exemple la catégorie II), et une couverture complète en ce qui concerne la radiogoniométrie uniquement pour des émetteurs d'une catégorie inférieure (par exemple la catégorie I).

– **La proportion entre le nombre de stations fixes et le nombre de stations mobiles**

Etant donné que le radioralliement d'une source d'émission nécessite une station mobile, il est essentiel de déterminer la proportion appropriée de stations fixes et de stations mobiles. Cette proportion dépendra de certains facteurs, en particulier de la fonction de contrôle utilisée pour la couverture complète (ou quasi complète). Si on utilise la localisation, les coordonnées probables d'une source d'émission seront connues à partir de l'intersection de lignes de relèvement depuis des stations fixes. Dans ce cas, il faudra moins de stations mobiles et le radioralliement sera exécuté rapidement. Si on utilise la radiogoniométrie uniquement, le radioralliement devient plus laborieux et chronophage. C'est pourquoi il faudra une proportion plus importante de stations mobiles. Davantage de stations mobiles sont nécessaires dans le cas de zones étendues sans couverture radiogoniométrique par des stations fixes.

Les décisions prises au début du processus de planification pourront être modifiées à la lumière des connaissances obtenues pendant le processus de planification et compte tenu de la situation en termes de ressources financières.

Durant la phase initiale de la planification, il importe également de rassembler autant d'informations que possible sur la région concernée (d'ordre administratif, socio-économique, etc.), en particulier:

- des cartes détaillées indiquant les zones peuplées, les routes existantes, les voies de chemin de fer, etc.;
- la répartition de la densité des zones peuplées et des zones économiques dans la région;
- la répartition de la densité des systèmes d'émission dans la région;
- les données du registre national des fréquences sur la disposition et les caractéristiques techniques des émetteurs de forte puissance et la hauteur de leurs antennes;
- des cartes indiquant les trajets des lignes haute tension et les stations de commutation associées;
- les données sur les emplacements des mâts d'antenne hyperfréquences et des autres structures métalliques hautes, si ces données sont disponibles.

Il est également important de prendre des décisions concernant les points suivants:

- **La détermination de la performance requise des équipements de contrôle des émissions**
Pour déterminer les valeurs limites du champ, il est nécessaire de définir la performance requise des équipements des stations de contrôle, par exemple le gain de l'antenne de réception, l'affaiblissement dans les câbles, la sensibilité du récepteur, etc.

– **Le choix du modèle de propagation des ondes radioélectriques**

La planification du réseau SMN dépend dans une large mesure des modèles de propagation RF utilisés. Il est donc important de choisir un modèle approprié pour la zone de service de la station de contrôle. On trouvera des informations sur les modèles de propagation au § 6.4 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011). On peut par exemple utiliser des modèles de propagation basés sur la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.1546-5 ou P.1812-3. La pratique montre que les calculs effectués selon la Recommandation UIT-R P.1546-5 donnent souvent une prévision plus précise pour un terrain quasiment plat, tandis que la Recommandation UIT-R P.1812-3 est mieux adaptée pour les terrains vallonnés ou montagneux. Toutefois, ces modèles ne sont pas toujours précis, car chaque prévision dépend étroitement de la situation concernée.

Dans le cas des zones urbaines, il convient d'utiliser des modèles de propagation élaborés expressément pour ce cas, par exemple le modèle d'Okumura-Hata ou le modèle de COST 231 Walfisch-Ikegami. De nouveaux modèles de propagation déterministes ont été élaborés,

qui utilisent des cartes numériques en trois dimensions des villes et des bâtiments. Un grand nombre de ces modèles sont basés sur des méthodes d'optique géométrique (méthodes de tracé de rayons par exemple) et sont potentiellement plus précises que les méthodes classiques.

– **La détermination des zones à éviter pour les stations de contrôle**

Il est important de déterminer les zones dans lesquelles il convient d'éviter de placer des stations de contrôle. Il peut s'agir de lieux interdits ou sécurisés, ou de zones avec un champ intense. Dans le second cas, une valeur limite de 30 mV/m (soit 90 dB(μ V/m)) est fixée pour le champ des signaux dans la bande passante du récepteur de contrôle (valeur de la somme quadratique), conformément au § 2.6 du Manuel de l'UIT-R. On peut utiliser la Recommandation UIT-R SM.575-2 pour calculer la limite de champ nécessaire pour protéger les stations de contrôle fixes contre le brouillage causé par les émetteurs voisins ou de forte puissance.

– **L'incertitude de localisation (pour les réseaux SMN AOA/TDOA)**

Lors de la planification de stations AOA/TDOA, il est nécessaire de déterminer la valeur maximale admissible de l'erreur de position d'un émetteur. Cette valeur déterminera la performance de base requise pour le réseau de contrôle. Il convient de noter, à ce stade, que la méthode AOA nécessite au moins deux stations de contrôle, tandis que la méthode TDOA nécessite au moins trois stations.

Il est également essentiel d'obtenir, pour la région concernée, des statistiques (sur plusieurs années) concernant les demandes de services de contrôle qui ne peuvent être assurés qu'avec des stations mobiles (par exemple les recherches d'émetteurs illégaux, la résolution de cas de brouillage, etc.). Ces statistiques peuvent servir à déterminer l'ensemble optimal de stations fixes et de stations mobiles.

3 Planification et optimisation des réseaux SMN AOA

3.1 Principes essentiels de la méthode générale existante

La méthode présentée au § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011) est basée sur le calcul puis l'analyse des zones de couverture pour quatre fonctions distinctes de contrôle des émissions. Pour chacune d'elles, des niveaux différents de sensibilité des récepteurs de contrôle sont nécessaires. Les trois premières fonctions sont les suivantes:

- Ecoute (sensibilité du récepteur au niveau maximal – portée maximale)
- Mesure des caractéristiques d'une émission (sensibilité du récepteur à un niveau inférieur – portée inférieure)
- Radiogoniométrie (sensibilité du récepteur au niveau minimal – portée minimale). Le Tableau 6.8-1 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011) considère, à des fins de comparaison, les valeurs seuil de champ suivantes aux limites des zones de couverture respectives:
 - 0 dB(μ V/m) pour l'écoute;
 - 12 dB(μ V/m) pour la mesure des caractéristiques d'une émission; et
 - 20 dB(μ V/m) pour la radiogoniométrie.

Pour la planification, il est possible d'adopter d'autres valeurs limites du champ, en fonction des caractéristiques des équipements et de la méthode de mesure des caractéristiques des émissions qui seront utilisées dans le réseau SMN. Ces zones de couverture sont indépendantes pour chaque station du réseau SMN, et leur réunion donne les zones de couverture globales respectives pour chaque fonction de contrôle.

La taille des zones est essentiellement déterminée par la topographie de la région dans laquelle le réseau SMN est mis en place, la hauteur d'antenne des stations et la puissance et la hauteur d'antenne des émetteurs à contrôler. Un modèle approprié de propagation des ondes radioélectriques est donné dans l'Annexe 5 de la Recommandation UIT-R P.1546-5 et une méthode spéciale de calcul recommandée pour le contrôle est décrite au § 1.1. On peut aussi utiliser la Recommandation UIT-R P.1812-3 ainsi que d'autres modèles de propagation (voir le § 2 ci-dessus).

Les zones de couverture peuvent contenir des «trous» dans lesquels l'intensité de champ calculée n'atteint pas les niveaux de seuil susmentionnés. En raison de la nature statistique des modèles de propagation des ondes radioélectriques, l'analyse des déficits d'intensité de champ de ces «trous» pourrait être utile pour déterminer avec précision les zones de couverture réelles. Si les déficits pour les «trous» sont faibles (1 à 3 dB), le contrôle pourrait dans la plupart des cas être effectué avec succès, ce qui entraînerait la disparition des «trous». En cas de déficits importants (plus de 6 à 9 dB), le contrôle ne pourrait être effectué avec succès et les «trous» demeureraient.

Le Tableau 6.8-1 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011) propose trois catégories d'«émetteurs de test» de faible puissance avec des antennes relativement basses à utiliser pour modéliser, simuler et planifier les réseaux SMN.

Ces trois catégories relatives à la p.i.r.e. sont les suivantes:

- Catégorie I
Puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 1,5 m (émetteurs PMR (radiocommunications mobiles privées) transportés dans des véhicules légers).
- Catégorie II
Puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 20 m (stations de base PMR, émetteurs de radiodiffusion de faible puissance, répéteurs de télévision).
- Catégorie III
Puissance de 20 W, hauteur d'antenne de 40 m (même type d'émetteur que pour la catégorie II mais avec une puissance et une hauteur d'antenne un peu supérieures).

Bien évidemment, un réseau SMN contrôlera plus efficacement des émetteurs puissants avec une antenne haute.

La quatrième fonction de contrôle est la localisation. La zone de couverture pour la localisation, essentielle pour la topologie des stations fixes du réseau SMN, est basée sur la triangulation, et correspond au chevauchement des zones de couverture radiogoniométrique d'au moins deux stations d'un réseau SMN. A mesure que la distance entre les stations augmente, la taille du chevauchement des zones pour la radiogoniométrie (à savoir la zone de couverture pour la localisation) diminue rapidement jusqu'à disparaître. Une caractéristique de la zone de couverture pour la localisation est que l'incertitude (ou la précision) de la localisation peut varier grandement à l'intérieur de cette zone, ce qui n'est en principe pas le cas avec les trois autres fonctions de contrôle. Cette variation, parfois grande, à l'intérieur de la zone, est représentée sous la forme d'un «gabarit de couverture pour la localisation» (LCT), qui est décrit en détail au § 4.7.3.1.4 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011).

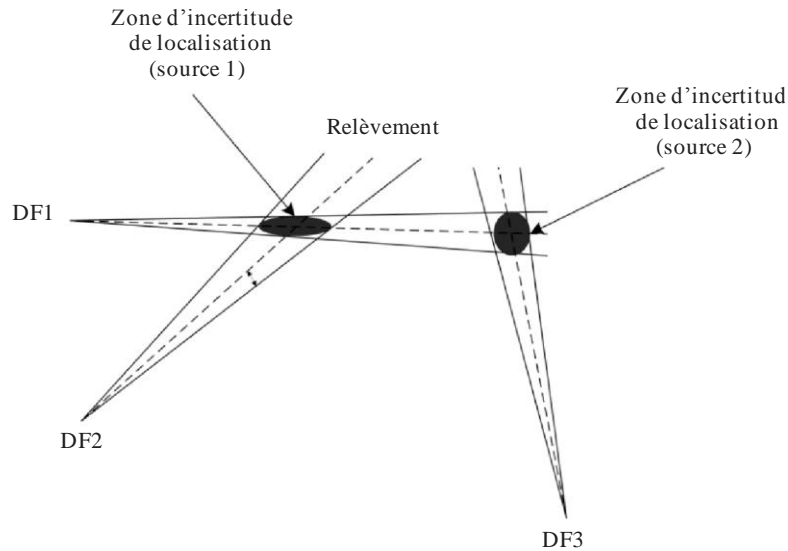
En tout point du gabarit LCT, la valeur de l'incertitude de localisation dépend d'un certain nombre de facteurs, les principaux étant les suivants (voir la Fig. 1):

- les valeurs d'incertitude de relèvement associées aux radiogoniomètres utilisés dans la triangulation, qui donnent lieu à des secteurs angulaires de distribution des lignes de relèvement;
- les distances entre les radiogoniomètres et les zones d'intersection des secteurs de distribution des lignes de relèvement;

- les angles d'intersection des secteurs de distribution des lignes de relèvement.

FIGURE 1

Facteurs ayant une incidence sur les valeurs d'incertitude de localisation des sources d'émission radio



Rapport SM.2356-01

Par conséquent, le gabarit LCT est fondamental pour un certain nombre de facteurs, et il faut en tenir compte dans le processus de planification du réseau SMN. Le gabarit LCT est aussi le meilleur indicateur de qualité, à la fois pour l'ensemble du réseau SMN et pour ses différentes parties.

La zone de couverture radiogoniométrique globale des stations fixes est très importante pour la planification car, dans cette zone, ces stations fournissent des relèvements, qui simplifient le radoralliment des sources d'émission par les stations mobiles interagissant avec les stations fixes.

Conformément au § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011), dans les cas nécessitant la couverture complète d'une zone importante pour le contrôle des émissions, dans lesquels il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de stations fixes, on peut, pour planifier un réseau SMN approprié, s'appuyer sur la théorie des réseaux réguliers présentée dans le Rapport UIT-R BS.944. Une approche de ce type nous permet de créer un réseau SMN avec des distances relativement longues entre les stations dans les zones rurales et des distances plus courtes dans les zones urbaines ou industrielles, où la densité des émetteurs à contrôler est forte.

3.2 Modélisation informatique d'un réseau SMN

Les étapes de base sont les suivantes:

- 1) définition de l'objectif;
- 2) évaluation de la couverture des stations existantes pour le contrôle des émissions;
- 3) création d'un réseau régulier primaire;
- 4) évaluation de la couverture des stations de contrôle du réseau régulier primaire et optimisation du nombre de stations et de leurs caractéristiques;
- 5) subdivision des différentes cellules du réseau primaire et nouvelle optimisation du nombre de stations et de leurs paramètres;
- 6) définition des emplacements des différentes stations et de leurs caractéristiques dans un modèle informatique.

Chacune de ces étapes est examinée de manière plus détaillée.

3.2.1 Définition de l'objectif

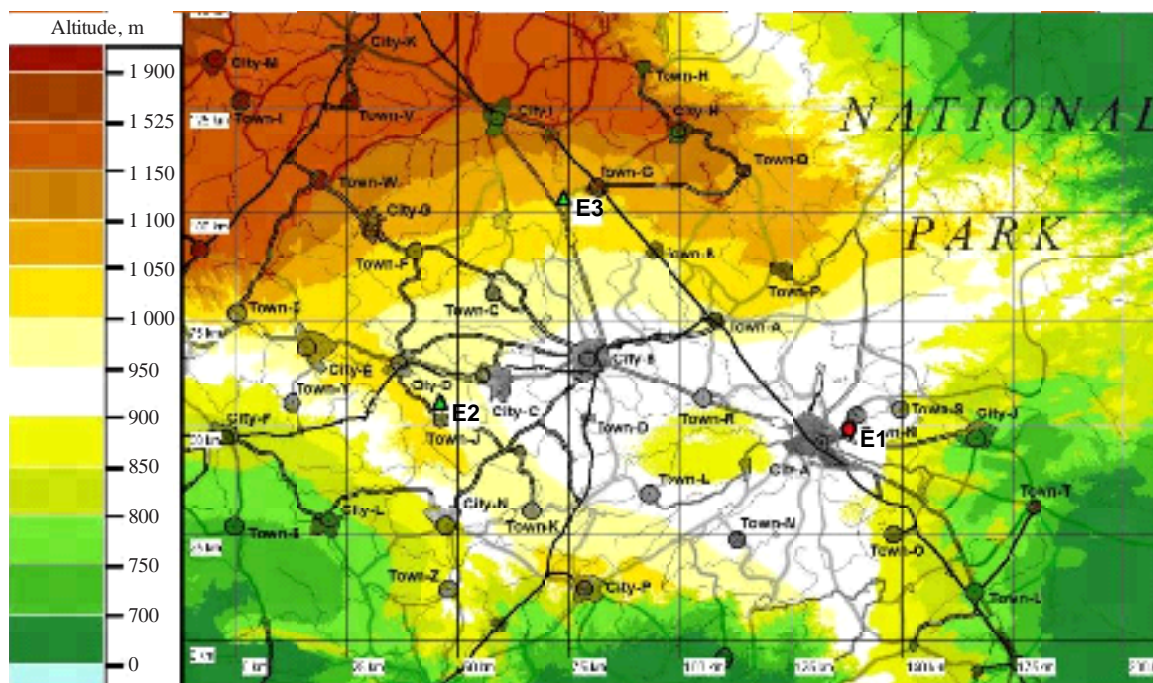
Une fois que ces décisions fondamentales ont été prises, ou tout du moins des décisions préliminaires, et que les données nécessaires ont été collectées, le travail de modélisation informatique du futur réseau SMN peut commencer. Nous utiliserons un exemple spécifique de réseau SMN souhaité pour illustrer les étapes du processus de planification.

Prenons le cas d'une administration qui souhaite, compte tenu des ressources financières disponibles, mettre en place un nouveau réseau SMN dans une zone peuplée de son territoire dont la topographie est représentée dans la Fig. 2. Supposons que la zone concernée comprenne déjà trois stations fixes (E1-E3) dotées d'équipements relativement modernes (incertitude de radiogoniométrie de 1° r.m.s.), et que ces stations doivent être intégrées dans le réseau SMN en projet sans aucune modernisation. La hauteur d'antenne de ces stations est de 30 m pour les stations E1 et E2 et de 20 m pour la station E3, et aucun changement n'est envisagé.

Supposons aussi qu'il soit décidé d'assurer une couverture complète, pour toutes les fonctions de contrôle y compris la localisation, de la partie peuplée du territoire en question pour des émetteurs de test de catégorie II (puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 20 m). En outre, une couverture complète de la partie du territoire la plus développée sur le plan économique, située entre la grande ville A et la grande ville E, doit être assurée au moins en ce qui concerne la fonction de radiogoniométrie pour des émetteurs de catégorie I (puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 1,5 m). On estime que les équipements futurs garantiront une précision radiogoniométrique de 1° r.m.s.

FIGURE 2

La zone considérée avec les trois stations existantes



Rapport SM.2356-02

Ainsi, pour la modélisation informatique (voir les Fig. 2 et 3), nous avons les conditions initiales suivantes:

- 1) Réseau SMN existant – trois stations fixes (E1-E3):
 - station E1 – hauteur d'antenne de 30 m;
 - station E2 – hauteur d'antenne de 30 m;

- station E3 – hauteur d'antenne de 20 m;
 - incertitude de radiogoniométrie de 1° r.m.s.
- 2) Exigences pour le nouveau réseau SMN:
- couverture complète de la partie peuplée du territoire en ce qui concerne toutes les fonctions de contrôle y compris la localisation pour des émetteurs de catégorie II (puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 20 m);
 - couverture complète du territoire situé entre la grande ville A et la grande ville E au moins en ce qui concerne la radiogoniométrie pour des émetteurs de catégorie I (puissance de 10 W, hauteur d'antenne de 1,5 m);
 - incertitude de radiogoniométrie de 1° r.m.s.

3.2.2 Modélisation initiale du réseau SMN

3.2.2.1 Evaluation de la couverture des stations existantes pour le contrôle des émissions

Les zones de couverture des stations existantes sont calculées pour les différentes fonctions de contrôle à l'aide de logiciels comprenant au moins les fonctionnalités décrites au Chapitre 5 du Manuel de l'UIT-R sur l'application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique (édition de 2015).

Pour l'exemple considéré ici, les zones de couverture de toutes les stations existantes sont représentées dans la Fig. 3 pour l'écoute, la mesure des caractéristiques des émissions et la radiogoniométrie, et dans la Fig. 4 pour la localisation (gabarit LCT). Les calculs sont effectués pour 450 MHz et des émetteurs de test de catégorie II. Cette fréquence est utilisée ci-après dans tous les calculs ultérieurs sauf indication contraire. Les zones en vert dans la Fig. 3 correspondent à la couverture pour la fonction la plus sensible (écoute), les zones en rose représentent la couverture pour la fonction un peu moins sensible qu'est la mesure des paramètres des émissions, et les zones en jaune indiquent la couverture pour la radiogoniométrie, qui est la fonction la moins sensible. Le gabarit LCT (répartition des incertitudes de localisation représentée par différentes couleurs dans la Fig. 4) est calculé pour une probabilité de 50% de localisation de l'émetteur recherché dans l'ellipse d'incertitude correspondante (voir le § 4.7.3.1.4 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre, édition de 2011).

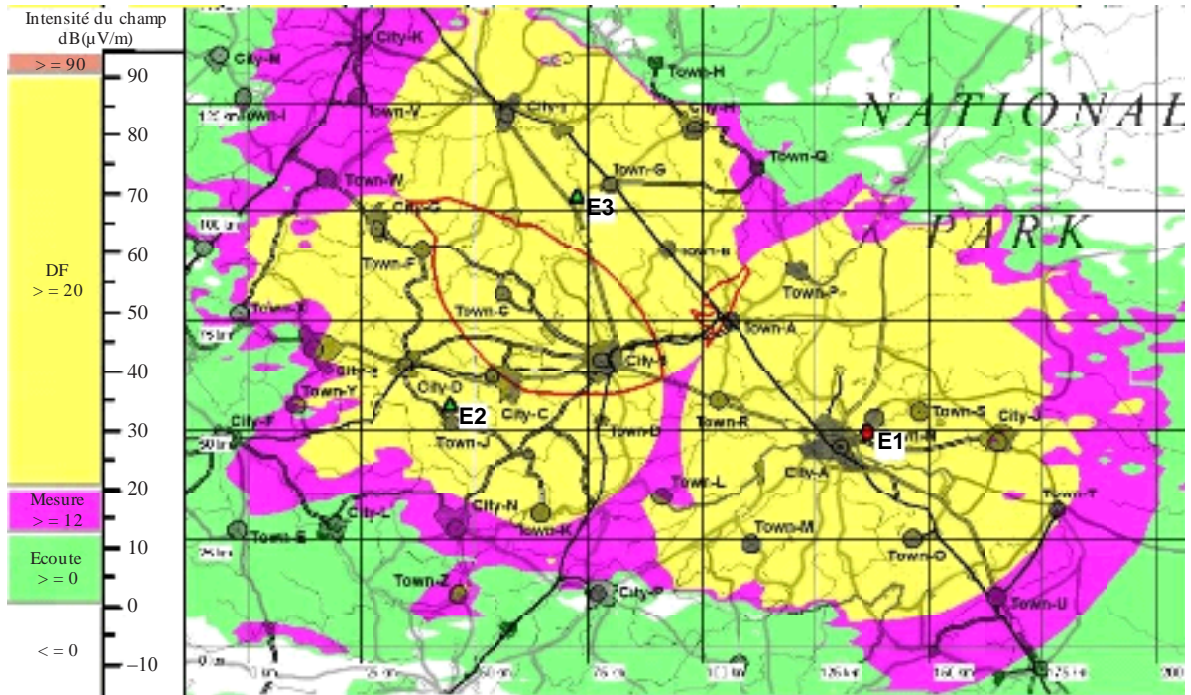
Le contour de la zone de couverture globale pour la radiogoniométrie (représentée en jaune dans la Fig. 3) est représenté par une ligne rouge dans la Fig. 4, tandis que dans la Fig. 3 la ligne rouge représente le contour du gabarit LCT donné par l'ensemble des zones en couleur de la Fig. 4.

La Figure 4 montre que la couverture pour la localisation offerte par les stations existantes, y compris pour des émetteurs de test de catégorie II, est très loin de répondre aux exigences données.

Dans ce cas particulier, la conclusion est évidente, même sans aucun calcul détaillé. Dans d'autres cas, toutefois, lorsque l'objectif est d'optimiser un réseau SMN existant raisonnablement dense, ces calculs sont cruciaux et peuvent servir de base aux étapes suivantes de la modélisation informatique.

FIGURE 3

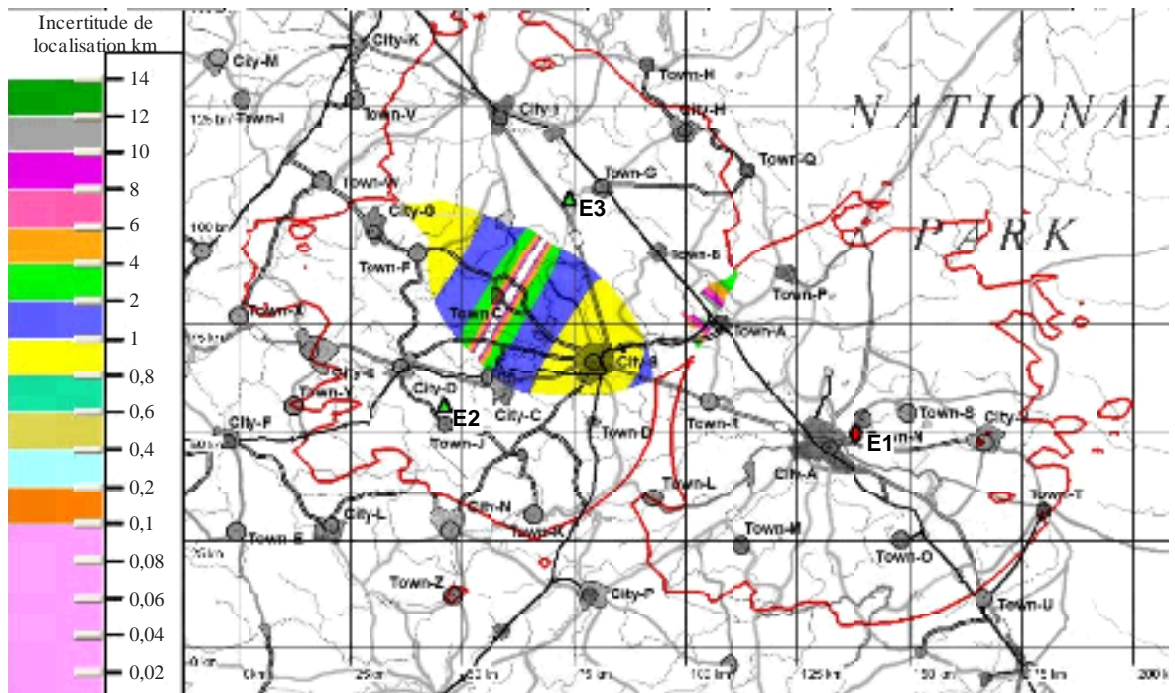
Zones de couverture globales pour le contrôle des émissions correspondant aux trois stations existantes



Rapport SM.2356-03

FIGURE 4

Gabarit de couverture pour la localisation correspondant aux trois stations existantes



Rapport SM.2356-04

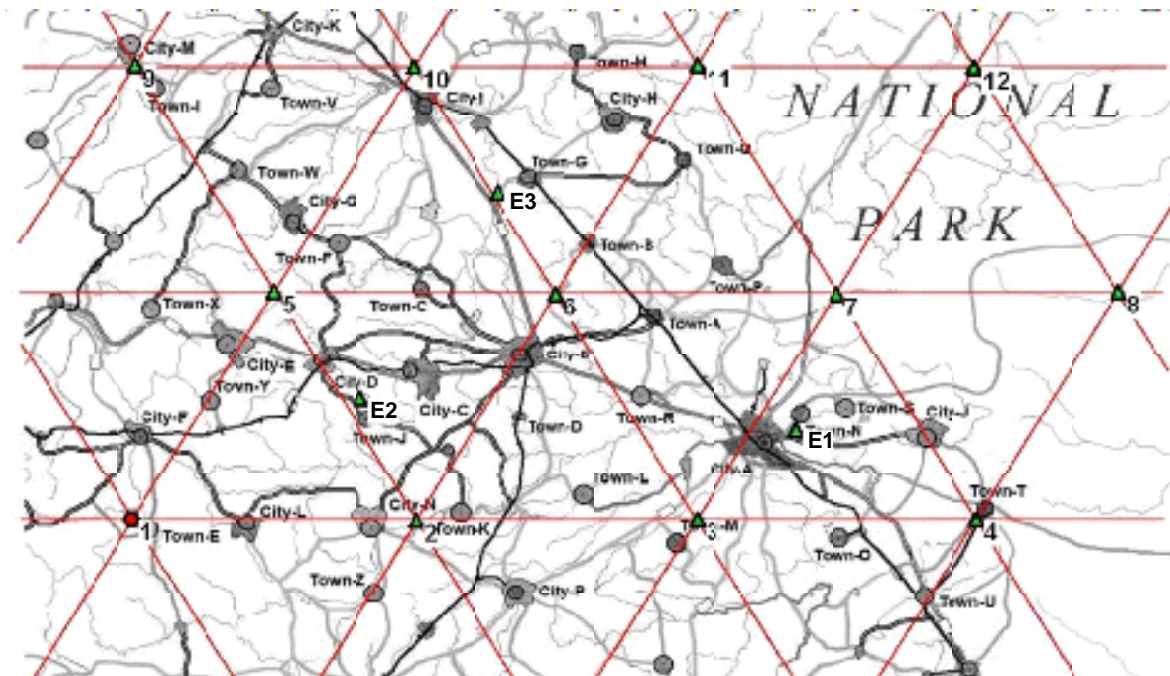
3.2.2.2 Superposition d'un réseau régulier primaire

Un réseau régulier primaire est superposé sur le territoire considéré, avec une distance de 60 km entre les nœuds. Des stations de contrôle sont placées virtuellement au niveau des nœuds du réseau. Il existe d'innombrables différentes possibilités pour ce qui est de disposer les nœuds d'un réseau régulier de ce type par rapport aux zones peuplées et à d'autres éléments géographiques. On peut par exemple disposer ces nœuds de manière à ce que certains coïncident avec les stations existantes ou en soient proches, ou bien soient situés autour du territoire présentant le plus grand intérêt en termes de contrôle des émissions.

Supposons qu'il soit décidé de disposer les nœuds du réseau conformément à la deuxième des possibilités indiquées ci-dessus, c'est-à-dire de placer certains nœuds autour du territoire comprenant les grandes villes A à E comme indiqué dans la Fig. 5, 12 stations supplémentaires étant placées virtuellement au niveau des nœuds du réseau. Les stations existantes sont proches de nœuds correspondant à des éléments du réseau régulier secondaire, avec une distance entre nœuds de 30 km, pris en considération au § 3.2.2.4.

En regardant la Fig. 5, on constate qu'on pourrait supprimer les stations 8 et 12 dans un souci économique, car elles se trouvent sur le territoire du parc national qui est dépourvu de zones peuplées et n'a donc pas besoin de faire l'objet d'un contrôle par des stations fixes.

FIGURE 5
Réseau régulier primaire



Rapport SM.2356-05

3.2.2.3 Evaluation de la couverture des stations de contrôle du réseau régulier primaire; optimisation du nombre des stations et de leurs caractéristiques

Nous passons ensuite à l'étape suivante, et calculons les zones de couverture pour les différentes fonctions de contrôle des stations situées aux nœuds du réseau régulier primaire, conjointement avec les stations existantes. Les résultats de ce processus sont utilisés pour poursuivre l'optimisation du nombre de stations, si c'est possible à ce stade.

La Figure 6 montre les résultats des calculs effectués pour déterminer la couverture en ce qui concerne les différentes fonctions de contrôle pour des émetteurs de test de catégorie II et une hauteur d'antenne de 30 m pour toutes les nouvelles stations, tandis que la Fig. 7 montre le gabarit LCT correspondant. Il ressort clairement de la Fig. 7 qu'avec ce nombre de stations et la configuration du réseau SMN en projet, la couverture complète pour la localisation est pratiquement entièrement assurée pour des émetteurs de test de catégorie II. La Fig. 7 montre aussi clairement que la station 11 ne contribue pas de manière significative à la couverture des territoires voisins pour la localisation et peut être supprimée afin de réduire les coûts du système. La station 7 dessert des zones peu peuplées à la limite du parc national et peut aussi être supprimée. Si d'autres réductions de coût sont nécessaires, nous pouvons aussi envisager de supprimer la station 4, qui se trouve aussi à la limite du parc national.

La Figure 8 montre la couverture assurée par ce réseau primaire pour des émetteurs de test de catégorie II une fois que les stations 11, 7 et 4 ont été supprimées. La suppression de la station 4 se traduit par la perte du service de localisation pour la grande ville J, qui reste néanmoins couverte pour ce qui est de la radiogoniométrie. Toutefois, la couverture de la grande ville J pour la localisation sera assurée pour des émetteurs de test de catégorie III, comme le montre la Fig. 9. La Figure 9 fait apparaître une meilleure couverture pour la localisation dans les parties sud-est et sud-ouest de la région, avec désormais plusieurs autres villes et grandes villes couvertes.

FIGURE 6

Couverture pour le contrôle des émissions correspondant au réseau primaire pour des émetteurs de test de catégorie II

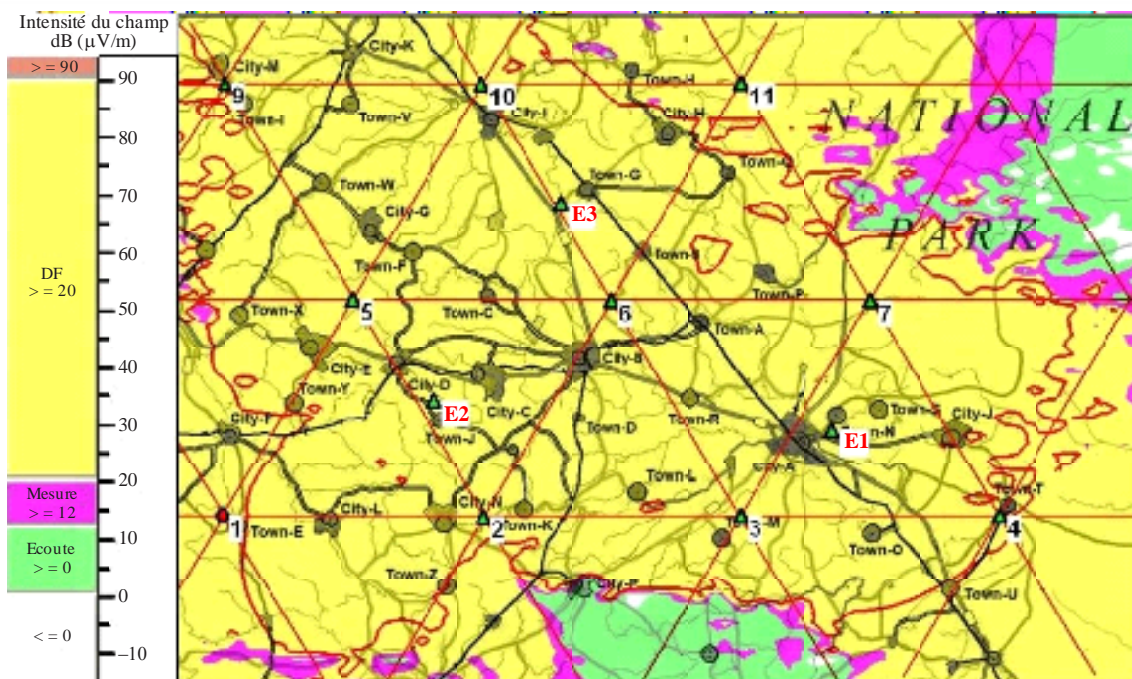
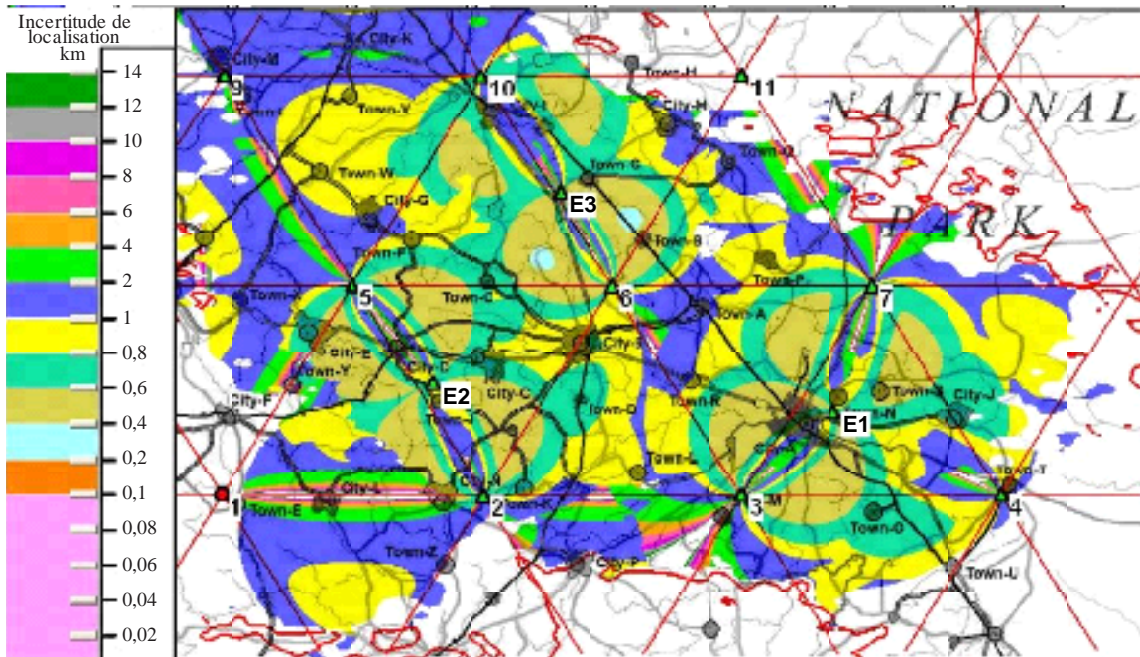


FIGURE 7

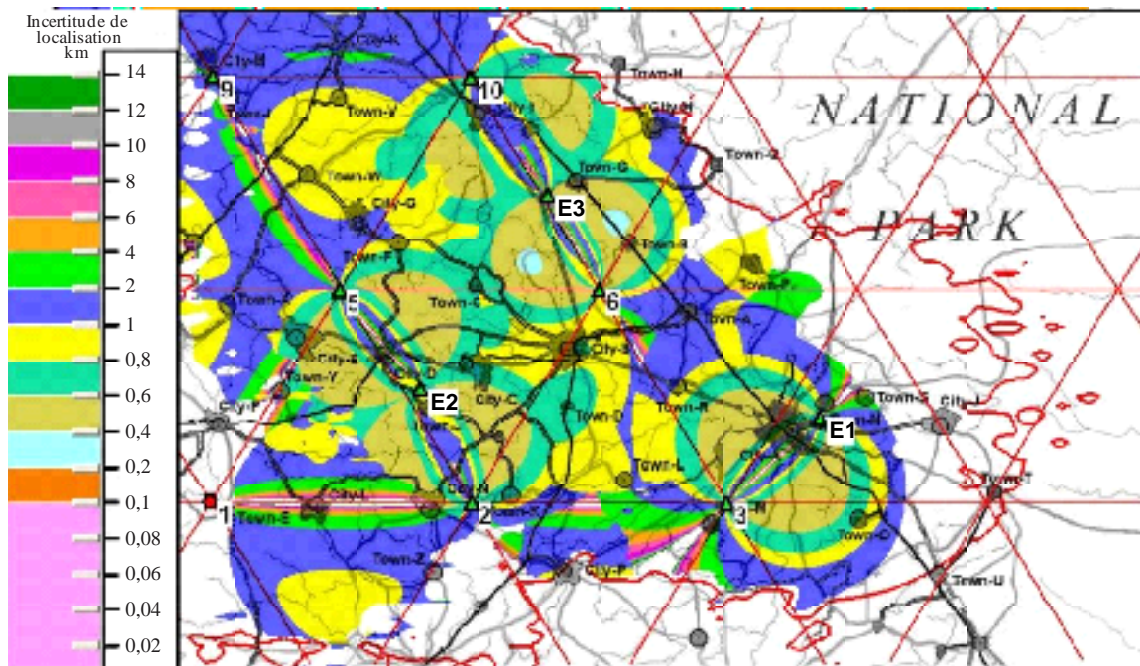
Gabarit de couverture pour la localisation correspondant au réseau primaire pour des émetteurs de test de catégorie II



Rapport SM.2356-07

FIGURE 8

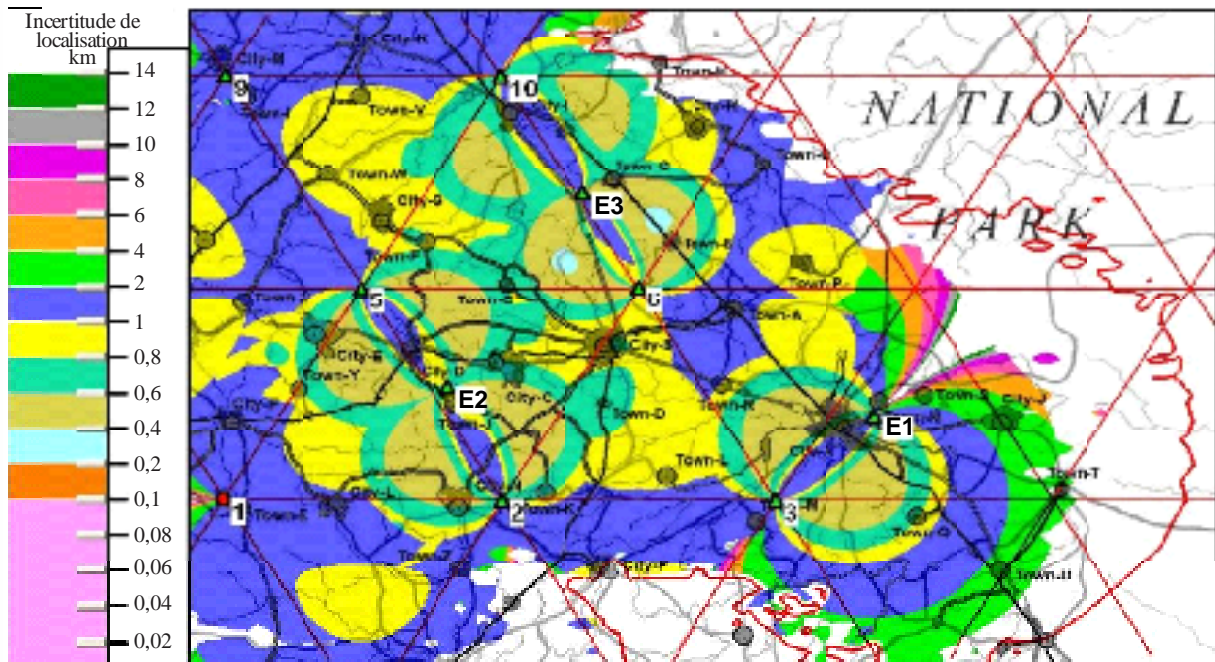
Gabarit de couverture pour la localisation correspondant au réseau primaire (moins les stations 4, 7 et 11) pour des émetteurs de test de catégorie II



Rapport SM.2356-08

FIGURE 9

Gabarit de couverture pour la localisation correspondant au réseau primaire (moins les stations 4, 7 et 11) pour des émetteurs de test de catégorie III



Rapport SM.2356-09

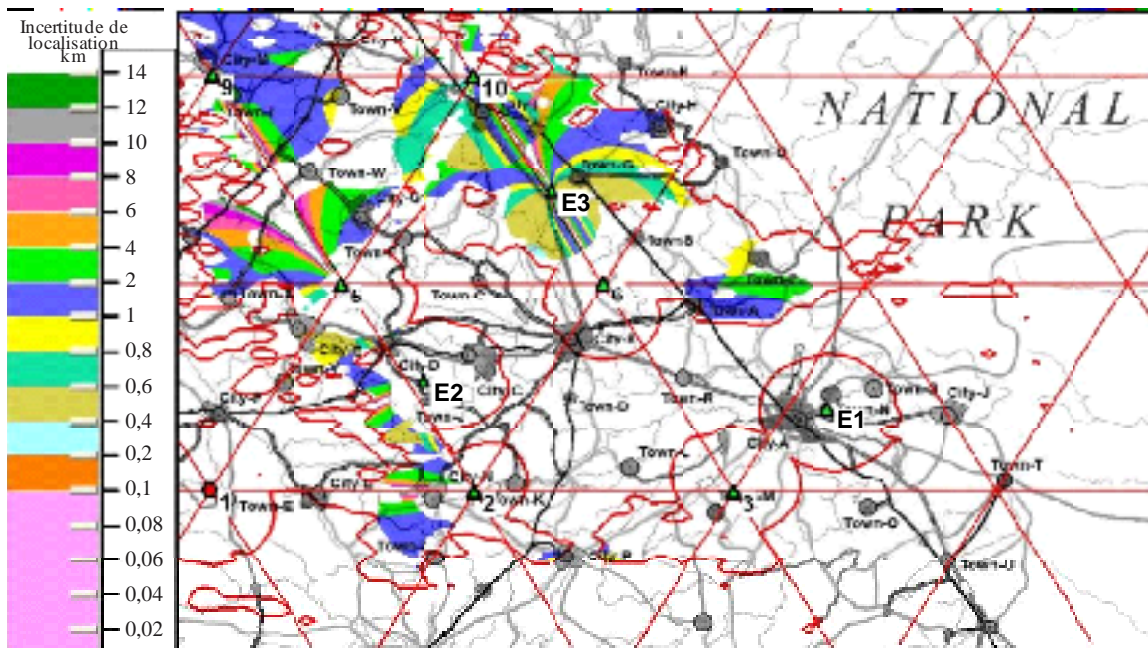
A partir de ces données, l'administration peut décider de conserver ou non la station 4 dans le réseau SMN en projet. La décision peut être différée jusqu'à ce que la planification du réseau SMN tout entier soit achevée (voir les étapes suivantes), le nombre total de stations soit déterminé et les ressources financières disponibles et prévues soient comptabilisées. On pourra juger préférable de ne pas inclure cette station dans la première étape de la mise en place du réseau SMN et de réexaminer la question lors des étapes suivantes.

Si nous comparons les Fig. 8 et 9, il est intéressant de noter que l'augmentation considérable de puissance et de hauteur d'antenne entre les émetteurs de test de catégorie II et de catégorie III, a peu d'incidence en termes d'amélioration de la couverture dans les parties nord-est et sud de la région (respectivement autour de la ville H et de la grande ville P), ce qui est dû, dans le premier cas, à une forte réduction de l'altitude moyenne du territoire et, dans le second cas, à une augmentation de l'altitude moyenne du territoire, comme le montre la Fig. 2. À l'évidence, ces effets importants ne peuvent pas être déterminés de manière plus détaillée sans calculs appropriés.

La couverture pour la radiogoniométrie et la localisation correspondant au réseau SMN (moins les stations 11, 7 et 4) pour des émetteurs de test de catégorie I est représentée dans la Fig. 10. Il apparaît clairement que le réseau SMN, pour ce qui est des émetteurs de test de catégorie I, ne permet pas d'atteindre l'objectif d'une meilleure couverture de la zone située entre la grande ville A et la grande ville E pour le contrôle des émissions. Il est donc nécessaire d'augmenter la densité du réseau primaire à l'intérieur de la zone en question.

FIGURE 10

Gabarit de couverture pour la localisation correspondant au réseau primaire pour des émetteurs de test de catégorie I



Rapport SM.2356-10

3.2.2.4 Subdivision de différentes cellules du réseau primaire et nouvelle optimisation du nombre de stations et de leurs paramètres

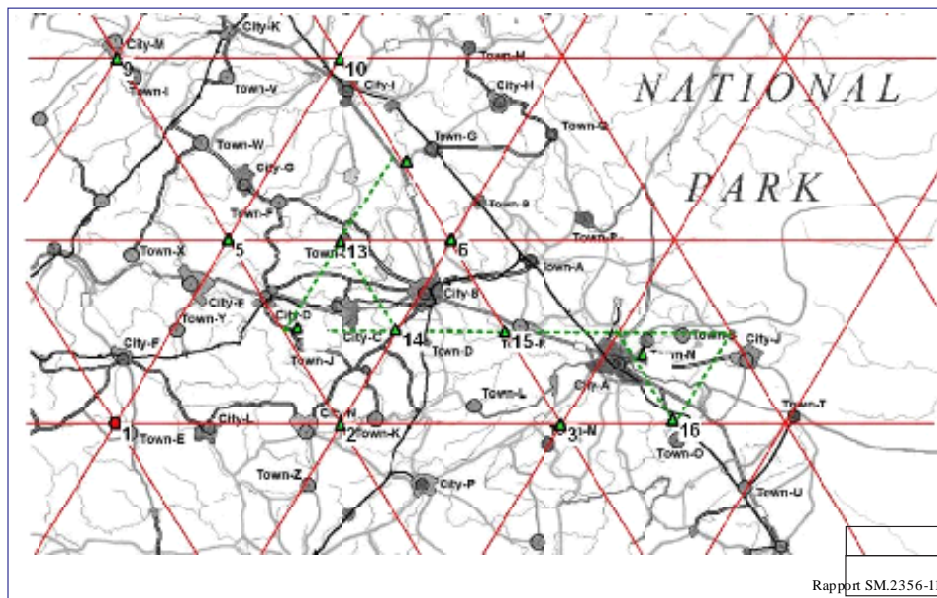
Afin d'augmenter la densité de cette partie du réseau SMN, différentes cellules triangulaires du réseau primaire peuvent chacune être subdivisées en quatre cellules triangulaires de réseau secondaire avec une distance de 30 km entre les stations, et il convient de placer des stations supplémentaires au niveau de tout ou partie des nouveaux nœuds de cellule.

Dans l'exemple considéré ici, une solution possible, qui semble optimale en termes d'économie, est représentée dans la Fig. 11 à l'aide des traits verts en pointillés.

Le triangle primaire défini par les stations 2, 5 et 6 est subdivisé en quatre triangles secondaires, pour lesquels seules deux nouvelles stations (13 et 14) sont nécessaires, car la station existante E2 est utilisée comme troisième station. Dans chacun des quatre autres triangles primaires, un seul triangle secondaire est défini, et dans trois d'entre eux, les stations existantes E1 et E3 sont utilisées.

FIGURE 11

Réseau primaire avec éléments d'un réseau secondaire



La couverture radiogoniométrique globale correspondant à ce réseau SMN plus dense pour des émetteurs de test de catégorie I est représentée dans la Fig. 12, et la couverture pour la localisation est représentée dans la Fig. 13. Il ressort clairement de ces figures que le réseau SMN ainsi obtenu répond, pour l'essentiel, aux exigences fixées, même s'il existe de petites zones, au sud-est de la grande ville B, qui sont couvertes uniquement pour ce qui est des mesures des caractéristiques des émissions (zones représentées en rose dans la Fig. 12). Mais ces zones non couvertes pour la radiogoniométrie pour des émetteurs de test de catégorie I disparaissent dès que nous utilisons des émetteurs de test de 10 W et une hauteur d'antenne de 5 m (bâtiments de plain-pied avec des antennes d'une hauteur de 2 m placées sur le toit), comme le montre la Fig. 14.

S'il est souhaitable de réduire la taille de ces zones non couvertes pour des émetteurs de test de catégorie I, la hauteur d'antenne des futures stations 3 et 15, et de la station existante E1, si nécessaire, peut être portée à 50 m. La Figure 15 montre l'amélioration de la couverture pour le contrôle des émissions lorsque la hauteur d'antenne de ces stations est portée à 50 m.

La Figure 13 illustre clairement l'influence de la topographie sur la couverture pour le contrôle des émissions. Les territoires situés au nord de la droite passant par les stations 5, 13 et 6 sont nettement mieux couverts en ce qui concerne la radiogoniométrie et la localisation que les territoires situés au sud de cette droite, malgré une densité nettement moins élevée des stations de contrôle, y compris les nouvelles, dans cette zone. Ceci est dû au fait que la partie nord de la région considérée se trouve à une certaine altitude tandis que la partie centrale se trouve dans une vallée (voir la Fig. 2). Ces caractéristiques spécifiques de couverture du territoire considéré pour le contrôle des émissions ne peuvent être déterminées par des moyens autres que des calculs particuliers.

Dans ces conditions géographiques particulières, la partie nord de la région est bien desservie y compris en ce qui concerne la fonction de localisation pour des émetteurs de test de catégorie I. Cela étant, l'administration souhaitera peut-être assurer la même couverture dans la zone centrale située entre la grande ville A et la grande ville E. Pour ce faire, deux solutions sont envisageables. La première consiste à subdiviser quelques triangles primaires supplémentaires en quatre triangles secondaires – par exemple, les triangles définis par les stations 2, 6 et 3 ainsi que par les stations 6, 3 et la station 7 précédemment exclue – et à placer des stations supplémentaires au niveau de plusieurs nœuds de ces triangles secondaires. Des calculs montrent toutefois que cette solution n'est pas efficace.

La seconde solution est nettement plus efficace et applicable de manière générale. Elle consiste à subdiviser certains triangles secondaires (avec une distance entre stations de 30 km) situés entre la grande ville A et la grande ville E en triangles tertiaires avec une distance entre stations de 15 km. Cela permet d'éliminer certaines stations du réseau primaire telles que les stations 2 et 3 ainsi que la station 16 du réseau secondaire. La couverture de la partie la plus au sud de la région sera un peu moins bonne qu'avant, mais la dégradation pourra être jugée acceptable, compte tenu de la densité de population relativement faible.

FIGURE 12

Couverture pour le contrôle des émissions correspondant au réseau SMN plus dense pour des émetteurs de test de catégorie I

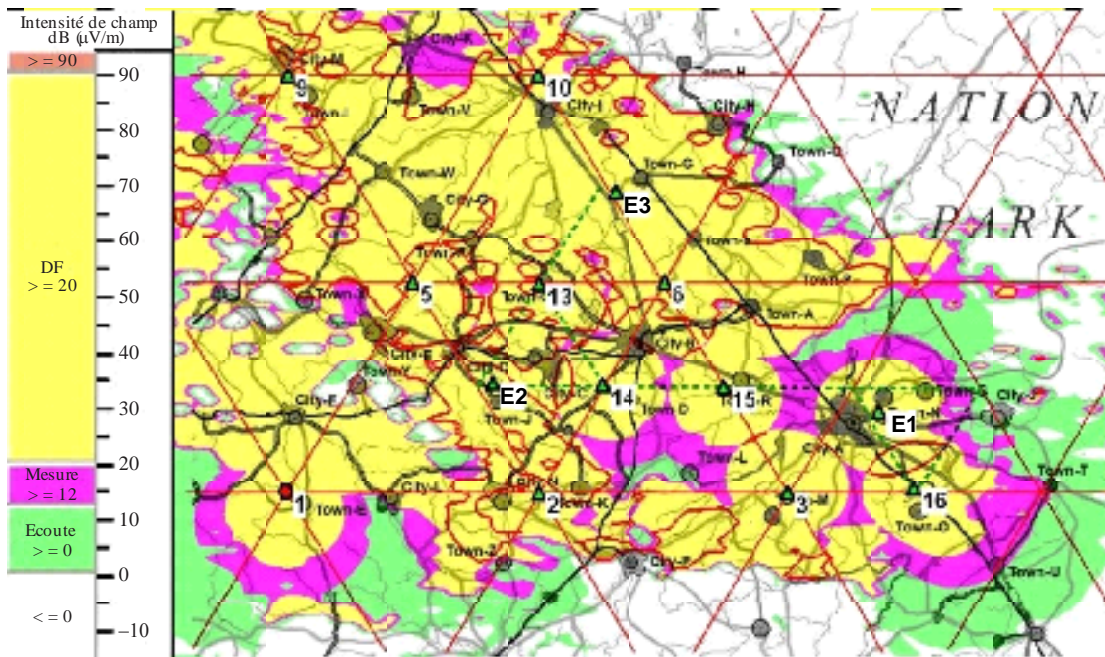
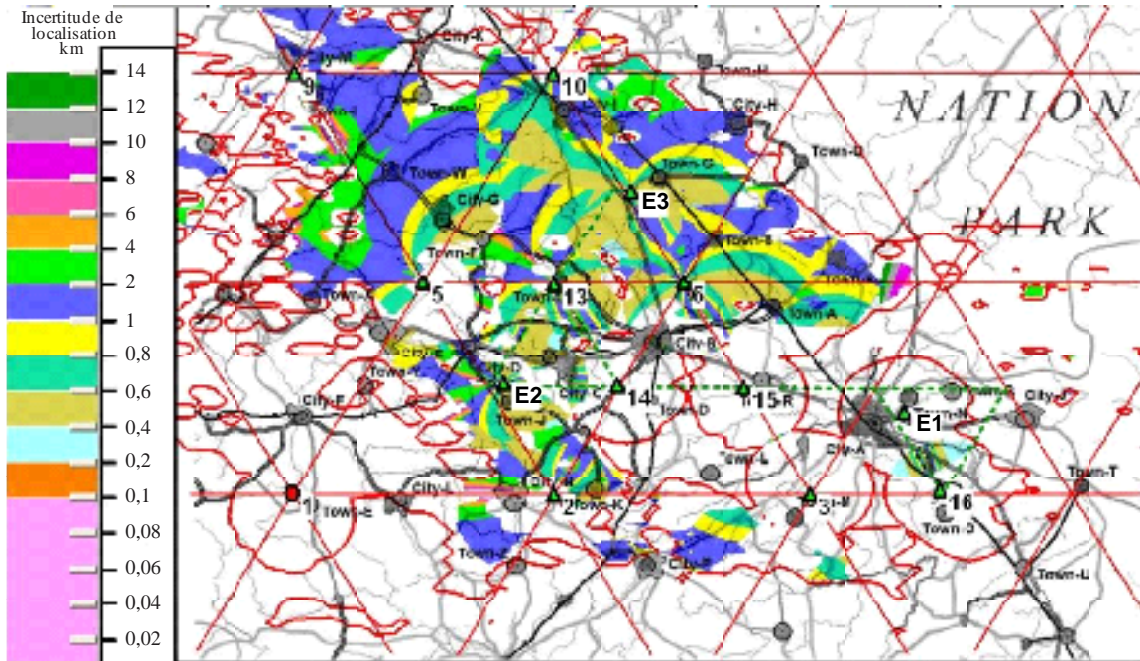


FIGURE 13

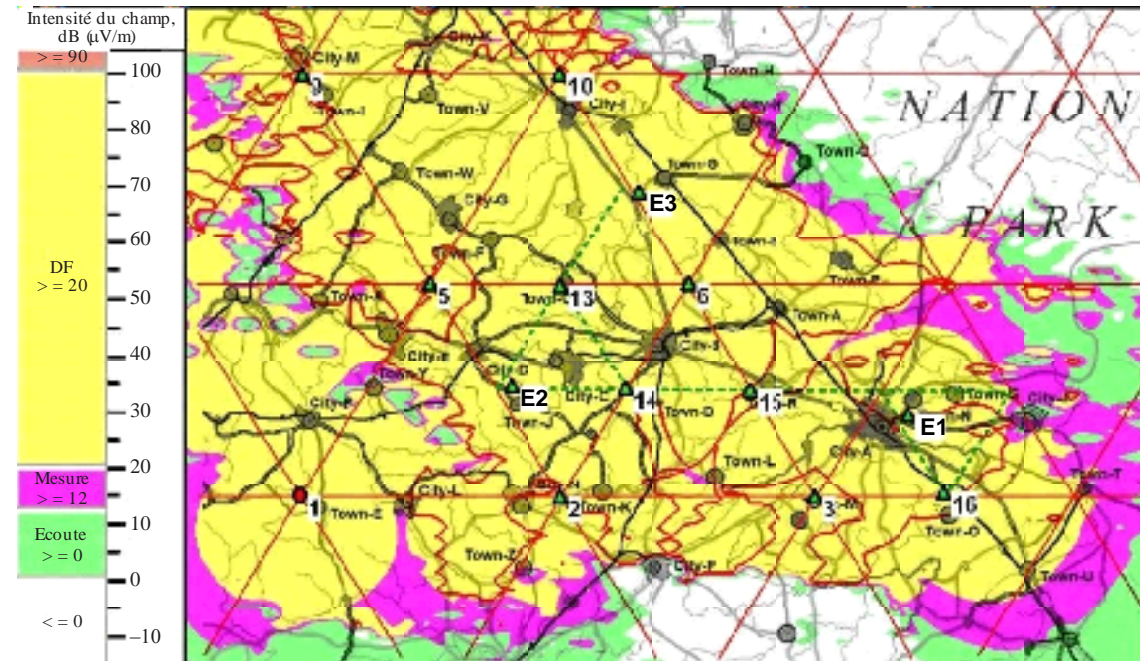
Gabarit de couverture pour la localisation correspondant au réseau SMN plus dense pour des émetteurs de test de catégorie I



Rapport SM.2356-13

FIGURE 14

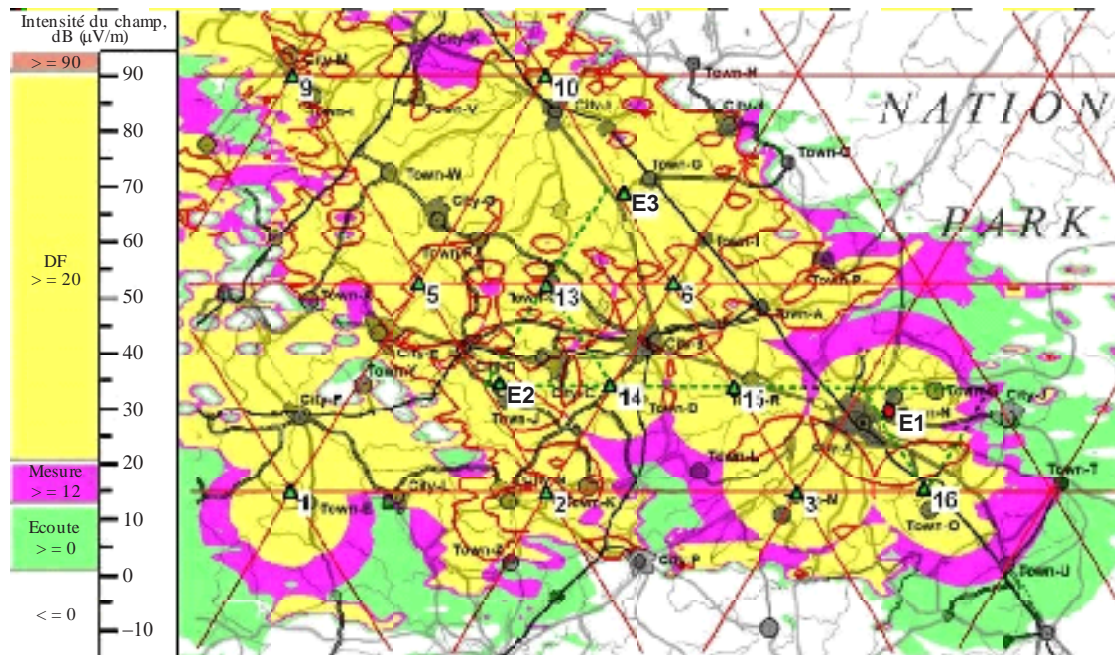
Couverture pour le contrôle des émissions correspondant au réseau SMN plus dense pour des émetteurs de test de 10 W avec une hauteur d'antenne de 5 m



Rapport SM.2356-14

FIGURE 15

Couverture pour le contrôle des émissions correspondant au réseau SMN plus dense pour des émetteurs de test de catégorie I lorsque la hauteur d'antenne des stations 3, 15 et E1 est portée à 50 m



Rapport SM.2356-15

D'après ce qui précède, il existe en principe de nombreuses solutions possibles; toutefois, on peut facilement analyser chacune d'elles à l'aide de calculs de la couverture afin de déterminer celle que l'administration acceptera comme étant la mieux adaptée à la situation.

Les figures ci-dessus et leur analyse montrent clairement que le gabarit LCT est le meilleur indicateur de qualité de l'ensemble du réseau SMN et de ses différentes parties.

3.2.3 Définition des emplacements et des paramètres des stations dans le modèle informatique

Une fois qu'une décision préliminaire a été prise concernant la configuration du réseau SMN, on peut définir dans un modèle informatique les paramètres et emplacements souhaités pour les stations.

Il faut commencer par identifier les stations destinées à remplir toutes les fonctions de contrôle. D'une manière générale, les stations peuvent être classées dans trois catégories: les stations pourvues de personnel, les stations télécommandées et les stations uniquement de radiogoniométrie (celles-ci étant exclusivement télécommandées). On notera que, dans le réseau primaire avec une distance entre stations de 60 km, pratiquement toutes les stations doivent assurer toutes les fonctions de contrôle, faute de quoi certaines zones ne seront pas couvertes en ce qui concerne les mesures des caractéristiques des émissions voire l'écoute. Dans le réseau secondaire, avec une distance entre stations de 30 km, certaines stations pourront être des stations télécommandées assurant uniquement la fonction de radiogoniométrie.

Par exemple, des calculs montrent que dans l'exemple du réseau SMN considéré ici, les stations 6, 13 et 16 peuvent être des radiogoniomètres télécommandés. Dans le réseau tertiaire, avec une distance entre stations de 15 km, un grand nombre des stations peuvent être des radiogoniomètres télécommandés. Le nombre de stations qui peuvent être des radiogoniomètres télécommandés est d'autant plus grand que le réseau SMN est dense.

Afin de déterminer quelles stations peuvent être des radiogoniomètres télécommandés, il est nécessaire de calculer la zone de couverture d'une station donnée appartenant à un groupe de stations

pour ce qui est des mesures de paramètres des émissions. Dans l'exemple présent, cette zone est représentée en rose avec, en son centre, une zone de couverture jaune pour la radiogoniométrie. Il faut ensuite déterminer laquelle de ces stations se trouve à l'intérieur de cette zone à une distance raisonnable de ses limites extérieures.

Ces stations peuvent être considérées comme des radiogoniomètres télécommandés potentiels, ce qui peut être confirmé à l'aide de calculs de leurs différentes zones de couverture.

A ce stade, il est également utile de déterminer, parmi les stations assurant toutes les fonctions de contrôle, lesquelles doivent être pourvues de personnel afin de mener à bien efficacement les études de site qui vont suivre (voir le § 3.3 ci-dessous). Il est souhaitable que les stations pourvues de personnel soient situées à l'intérieur ou à proximité de grandes villes afin de pouvoir les doter de personnel qualifié et d'une certaine infrastructure.

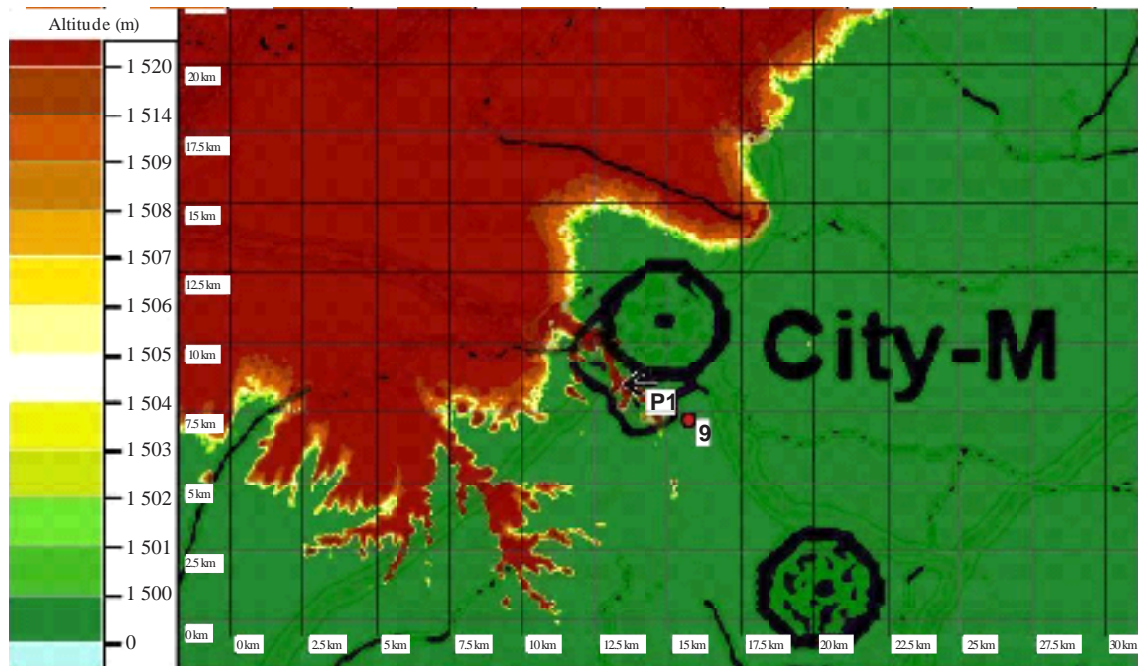
Il faut aussi avoir à l'esprit qu'avec les équipements informatiques modernes, il est possible d'installer un centre d'exploitation de station dans un quartier urbain et d'installer en dehors de la ville des équipements et antennes de station télécommandée en conteneur. Cette solution permet de trouver plus facilement des parcelles de terrain adaptées et de réduire considérablement les coûts d'acquisition de terrain, de construction et d'installation. Si toutefois nous prévoyons d'installer le centre d'exploitation dans un immeuble en zone urbaine, l'antenne pourra être installée sur le toit, ce qui évite de devoir acquérir un terrain pour son installation. Il convient toutefois de garder à l'esprit que les stations pourvues de personnel doivent disposer de zones d'entreposage pour les stations de contrôle mobiles et transportables, par exemple des garages ou des places de parking permanentes.

La distance entre stations pourvues de personnel ne doit pas dépasser 600 km, sachant que les stations mobiles sont censées desservir des endroits qui ne sont pas éloignés de plus de 300 km de leurs bases en un jour ouvrable (et ce uniquement si les routes sont en bon état).

Il est maintenant possible, y compris au stade de la modélisation informatique, d'optimiser les paramètres des stations et leurs emplacements. On peut par exemple effectuer successivement différents calculs pour déterminer les zones de couverture des stations pour le contrôle des émissions, à la fois pour chacune des stations et pour toutes, et ainsi optimiser la hauteur de leur antenne. Lorsque le réseau SMN est plus dense, la hauteur d'antenne de certaines stations peut être ramenée de 30 m (hauteur utilisée pour le calcul initial) à 20 m et dans certains cas à 10 m, ce qui permet à l'administration de réaliser des économies en termes de mâts d'antenne. Lorsqu'il est nécessaire, dans le cas d'autres stations, d'améliorer leur zone de couverture, la hauteur d'antenne peut être portée à 50 m; pour cela, il est bien souvent plus efficace de déplacer l'antenne sur un terrain plus haut plutôt que d'augmenter la hauteur physique du mât d'antenne. Une étude détaillée de la topographie autour de l'emplacement déterminé précédemment est alors nécessaire afin de recenser les zones à une altitude plus élevée qui pourraient convenir.

A titre d'exemple, la Fig. 16 montre en gros plan la topographie au voisinage de la station 9. On voit clairement qu'au point P1, éloigné de seulement trois kilomètres de l'emplacement calculé pour cette station, se trouve un terrain en hauteur s'étendant en direction du nord-ouest. L'altitude en P1 est supérieure d'environ 20 m à celle de l'emplacement calculé; le déplacement de la station 9 sur le terrain plus haut permettra d'augmenter considérablement sa zone de couverture pour le contrôle des émissions, y compris avec un mât d'antenne réduit. La Figure 16 montre qu'il existe un certain nombre d'autres endroits en hauteur à l'ouest de la station 9, qui offrent autant de possibilités de repositionnement de la station afin d'étendre sa zone de couverture pour le contrôle des émissions.

FIGURE 16
Topographie au voisinage de la station 9



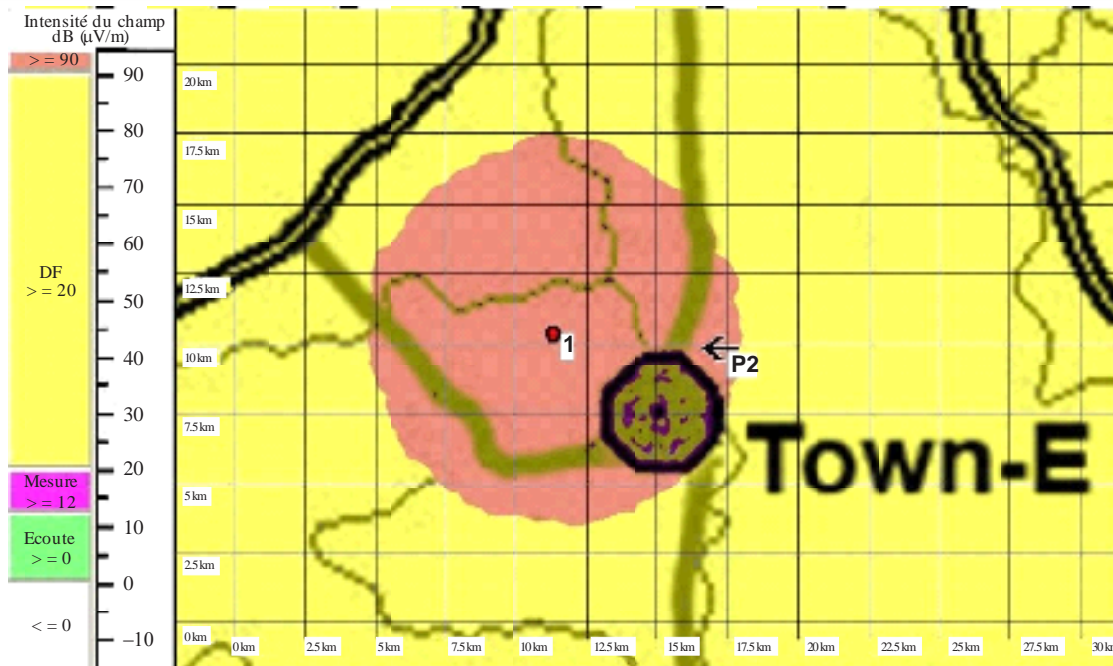
Rapport SM.2356-16

En outre, compte tenu des données collectées sur la région en question (voir le § 2 ci-avant), on peut examiner l'emplacement virtuel de chaque station dans le modèle et l'optimiser par rapport à la protection contre les brouillages et les effets indésirables causés par les bâtiments voisins et les autres structures, conformément à la Recommandation UIT-R SM.575-2 et au § 2.6 du Manuel sur le contrôle du spectre (édition de 2011).

Considérons par exemple le cas d'un émetteur de radiodiffusion de 500 W fonctionnant à 110 MHz, doté d'une antenne à une hauteur de 50 m, placé conformément à un registre national des assignations de fréquence à l'emplacement repéré par P2 dans la Fig. 17. Si nous calculons la zone de couverture de la station 1 par rapport à un émetteur de test ayant les paramètres considérés, avec un champ limite de 30 mV/m, soit 90 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$), alors nous constatons que l'émetteur se trouve à l'intérieur de cette zone (représentée en marron dans la Fig. 17). Cet émetteur génère au niveau de la station 1 un champ qui dépasse le niveau admissible (voir le § 2.6 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre, édition de 2011). Pour résoudre ce problème, il faut déplacer la station 1 d'au moins 1,2 km environ vers l'ouest.

FIGURE 17

Zone de protection de la station 1 contre les brouillages



Rapport SM.2356-17

De même, les emplacements des autres stations du modèle doivent être vérifiés afin de s'assurer qu'ils se trouvent au-delà des distances minimales spécifiées par rapport aux lignes électriques à haute tension, aux voies ferroviaires électrifiées, aux hauts mâts métalliques, etc., sur la base de données fiables sur ces caractéristiques. Si nécessaire, des stations du modèle peuvent être déplacées et il faut alors procéder aussi à une optimisation sur la base de calculs des zones de couverture correspondantes pour le contrôle des émissions, comme décrit ci-dessus.

Le résultat de toutes ces opérations fournit un modèle informatique complet de la configuration du réseau SMN en projet qu'il convient d'ajuster à l'aide d'une étude des sites sur place.

3.3 Ajustement des emplacements des stations lors de l'étude des sites et acquisition du terrain

Tous les sites potentiels pour les stations de contrôle recensés par la modélisation informatique doivent faire l'objet d'une étude méticuleuse afin de s'assurer qu'ils respectent les critères de protection donnés dans la Recommandation UIT-R SM.575-2 et au § 2.6 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011), et de garantir qu'il est possible de réaliser les travaux de construction requis pour créer l'infrastructure nécessaire. Concernant l'infrastructure, le premier impératif est de vérifier la possibilité d'assurer un raccordement au réseau électrique et de créer des routes d'accès.

Si c'est absolument nécessaire, on peut utiliser des pistes non revêtues («chemins de terre») pour accéder aux stations distantes en conteneur non pourvues de personnel. Pour les stations pourvues de personnel, il est nécessaire de disposer de parcelles plus grandes et de routes revêtues, ainsi que de raccordements pour l'électricité, l'eau potable et l'assainissement. Il convient aussi d'assurer en permanence la sécurité physique du site, y compris pour les stations en conteneur, ce qui nécessite un niveau minimal d'infrastructures essentielles.

Une méthode appropriée pour l'étude des sites et la présentation des résultats est décrite en détail dans l'Annexe 1 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011).

L'étude des sites peut révéler que les emplacements choisis dans le modèle informatique ne peuvent pas, pour diverses raisons, être utilisés dans la pratique. Par exemple, il se peut qu'ils ne respectent pas les critères de protection contre les brouillages ou les effets extérieurs, ou qu'ils ne soient pas utilisables en raison de la difficulté de mise en place des infrastructures nécessaires, etc. Toutefois, le problème qui se pose le plus souvent est simplement l'absence de sites adaptés disponibles à la vente. Les difficultés qui peuvent se présenter pour trouver des sites appropriés sont mentionnées dans la Recommandation UIT-R SM.1392-2. Le degré de difficulté varie bien évidemment d'un pays à l'autre, en fonction des conditions sociales et économiques, de la législation, des règlements administratifs, etc.

C'est la raison pour laquelle on pourra, dans le cadre de l'étude des sites, recenser d'autres emplacements potentiels qui sont disponibles et plus adaptés concrètement. Des calculs doivent alors être effectués pour contrôler leurs zones de couverture pour le contrôle des émissions. Il se peut très bien que la hauteur d'antenne (par exemple) doive être augmentée pour pouvoir maintenir la couverture requise pour le contrôle des émissions sur un nouvel emplacement. L'administration doit alors décider si elle souhaite augmenter la hauteur d'antenne, accepter une zone de couverture réduite, ou bien trouver un nouvel emplacement.

Il s'ensuit que dans la plupart des cas, l'étude d'un site donné ne se fait pas en une seule étape mais doit être répétée, parfois plusieurs fois, ce qui nécessite de répéter les calculs de la couverture pour le contrôle des émissions, les résultats de ces calculs étant cruciaux pour choisir le meilleur emplacement.

Il se peut que, pour une nouvelle station de contrôle, on ne puisse pas trouver, à proximité du lieu souhaité, un emplacement adapté où les niveaux de brouillage sont inférieurs aux critères établis au § 2.6 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011). Si tel est le cas, il convient d'examiner les emplacements pour lesquels le niveau de champ des signaux brouilleurs est minimal (même s'il dépasse 90 dB(μ V/m)) et d'éviter d'utiliser des éléments d'antenne actifs (voir le § 2.6.1.4 du Manuel).

C'est uniquement lorsque les différentes étapes de l'étude des sites, du calcul de la couverture et de l'acquisition des emplacements ont été menées à bien que l'on peut considérer que le processus de planification du réseau SMN est achevé. Il est alors possible de lancer un appel d'offres pour les travaux nécessaires de génie civil et l'achat des équipements de contrôle, conformément aux directives énoncées dans l'Annexe 1 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011).

Une fois que le réseau SMN a été planifié, les calculs finaux détaillés de la couverture pour le contrôle des émissions peuvent être effectués pour différentes fréquences (sachant que la couverture a tendance à se détériorer à mesure que la fréquence augmente) et pour des émetteurs de test fonctionnant à différents niveaux de puissance et avec différentes hauteurs d'antenne. Ces calculs peuvent être utilisés pour compiler un atlas de couverture du réseau SMN pour le contrôle des émissions, qui constituera son «empreinte de couverture» technique unique. L'atlas indiquera clairement les zones non couvertes pour des conditions et des paramètres spécifiques (fréquence, puissance des émetteurs de test, hauteur d'antenne, etc.), qui nécessitent une plus grande attention lorsqu'il s'agit de planifier l'exploitation de stations de contrôle portables et mobiles. Ces indications sont particulièrement importantes en zone accidentée ou montagneuse.

Les résultats de ces calculs finaux permettent aussi d'optimiser le nombre de stations fixes, portables et mobiles dans le réseau SMN. D'une manière générale, plus on compte de sites non desservis par des stations fixes, plus il faudra de stations portables et mobiles pour maintenir l'efficacité requise du réseau SMN dans son ensemble. Dans les zones du réseau SMN non couvertes par des stations fixes (par exemple, aux fréquences supérieures de la gamme d'ondes décimétriques, dans les zones de terres basses), il pourra être nécessaire de prévoir des stations portables pour pouvoir réaliser diverses campagnes de mesure. Les emplacements optimaux pour ces stations portables peuvent aussi être déterminés à l'avance par des calculs pertinents. En outre, des

périodes d'exploitation plus longues doivent être prévues pour les stations mobiles dans ces zones non couvertes.

3.4 Planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux

3.4.1 Planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN pour les très grandes villes

Nous avons examiné le processus de planification et d'optimisation d'un réseau SMN régional relativement vaste. Si en revanche nous avons besoin de planifier ou d'optimiser un petit réseau SMN isolé constitué d'un petit nombre de stations (pas plus de cinq environ), la procédure peut être considérablement simplifiée. Dans ce cas, nous pouvons commencer par placer des stations virtuelles dans le modèle informatique en des endroits commodes sans créer de réseau régulier superposé, puis optimiser le réseau SMN résultant en commençant à l'étape décrite au § 3.2.2.3 ci-dessus. Un exemple de procédures pratiques pour la planification de réseaux locaux de contrôle des émissions sur un terrain relativement plat est présenté dans l'Annexe 1.

Dans les très grandes villes, les réflexions multiples compliquent considérablement la radiogoniométrie. Pour améliorer la fiabilité de la radiogoniométrie, et donc aussi de la localisation, et pour permettre de contrôler un grand nombre d'émetteurs et d'autres sources d'émission, les stations fixes sont en principe plus rapprochées dans les très grandes villes que dans les zones rurales. Ainsi, lors de la planification de nouveaux réseaux SMN ou de l'optimisation de réseaux SMN existants dans les très grandes villes, l'étape décrite au § 3.2.2.2 peut commencer par la superposition, sur le territoire de la grande ville, d'un réseau régulier tertiaire avec une distance entre stations de 15 km, voire d'un réseau du quatrième ordre avec une distance entre stations de 7,5 km (voir le § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre, édition de 2011).

Une autre méthode de planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux est décrite plus loin au § 6. Contrairement à la méthode reposant sur un réseau régulier, elle peut nécessiter beaucoup plus de calculs, de sorte qu'elle est recommandée pour la planification de réseaux SMN relativement petits.

3.4.2 Planification des réseaux SMN dans les régions montagneuses ou vallonnées

Dans les régions montagneuses ou vallonnées, il est possible d'augmenter de manière significative la couverture pour le contrôle des émissions en plaçant les antennes de stations fixes à une certaine altitude. Dans le même temps, la couverture assurée est susceptible de dépendre beaucoup plus des emplacements particuliers qui sont choisis. Il convient aussi de tenir compte de la présence éventuellement accrue d'effets dus à la réflexion des signaux.

Toutes ces questions sont examinées en détail dans l'Annexe 2.

4 Planification et optimisation des réseaux SMN TDOA

Des méthodes de planification pour assurer la couverture complète d'une vaste zone par des stations TDOA (analogue à la méthode basée sur un réseau régulier pour la planification de stations AOA telle que présentée au § 3 ci-dessus) ont récemment été élaborées. Certaines suggestions supplémentaires sur le sujet sont présentées au § 4.7.3.2 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011) et dans le Rapport UIT-R SM.2211-1.

4.1 Principes essentiels

Le paragraphe 3.2.2.2 décrit les méthodes et principes applicables à l'emplacement des sites pour les stations de contrôle AOA. Une approche similaire peut être utilisée pour l'emplacement des sites de contrôle TDOA. L'élaboration d'une grille des stations TDOA dans les réseaux primaires, secondaires

et, le cas échéant, tertiaires, permet d'optimiser la couverture RF et de localiser les émetteurs avec plus de précision dans les régions considérées.

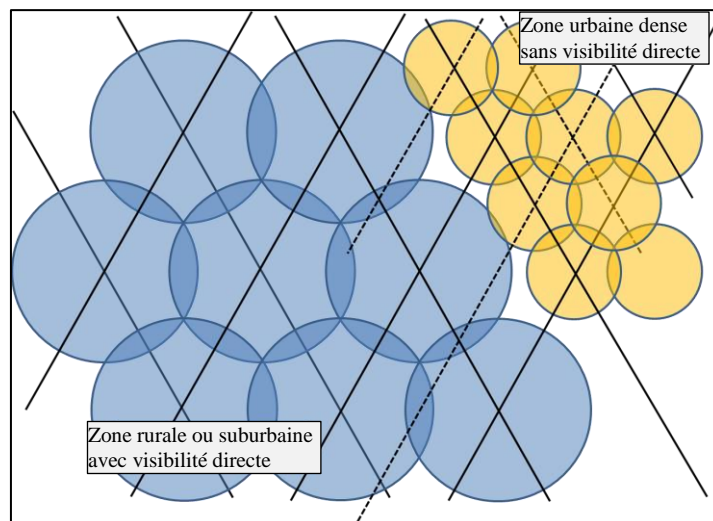
Cela étant, la principale différence en ce qui concerne la planification de réseaux TDOA tient à la relation qui existe entre la distance de détection RF et la zone de couverture correspondante de la géolocalisation. Cette question sera examinée en détail. Par souci de cohérence, on suppose que la couverture complète de la région est souhaitée.

4.1.1 Distance de détection RF et stations de contrôle TDOA

Dans le cas d'un réseau SMN TDOA, la distance de détection RF est utilisée pour déterminer l'espacement entre les noeuds des réseaux primaires, secondaires et tertiaires dans la grille de contrôle. Dans les zones rurales ou suburbaines avec visibilité directe, l'espacement entre les stations peut être plus important. Dans les zones suburbaines ou urbaines denses, l'espacement nécessaire pour assurer la couverture RF est moindre. Ces principes sont valables pour les technologies AOA et TDOA. On en trouvera une illustration théorique à la Fig. 18.

FIGURE 18

Distance de détection RF dans les réseaux réguliers primaires et secondaires



Le chevauchement des zones de détection RF pour les stations de contrôle crée une couverture complète nécessaire aux fonctions d'écoute et de mesure des caractéristiques des émissions, comme indiqué au § 3.1 du présent Rapport.

4.1.2 Zone de couverture de la géolocalisation pour les réseaux de contrôle TDOA

Dans le cas des réseaux TDOA, les stations peuvent être espacées de telle manière à minimiser le chevauchement des zones de détection RF tout en conservant une large zone de couverture de la géolocalisation allant jusqu'aux zones de couverture des stations de contrôle adjacentes, et bien souvent au-delà. Ceci s'explique par le gain de corrélation croisée entre les stations TDOA espacées spatialement. Ce gain est lié au produit du temps d'acquisition du signal (t) par la largeur de bande (B), ou au produit temps-largeur de bande. L'expression mathématique est la suivante:

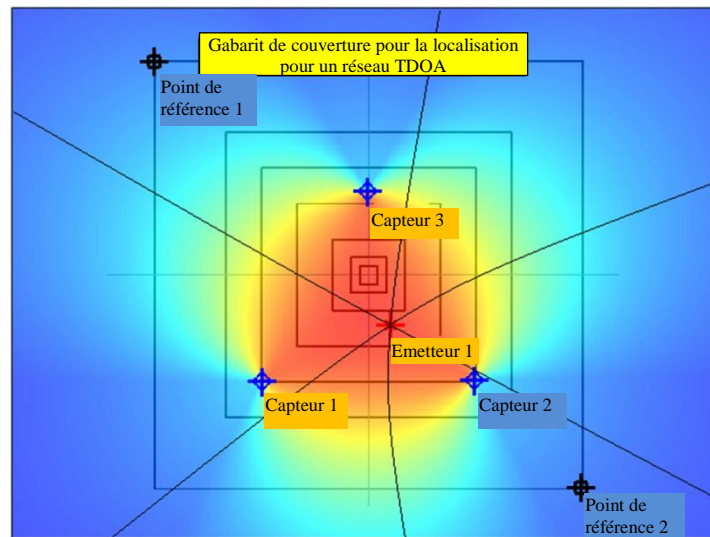
$$10 \log_{10}(t \times B)$$

Les unités sont le dB. Ce gain de traitement peut étendre efficacement la zone de couverture de la géolocalisation des réseaux TDOA au-delà de la limite de chaque zone de détection RF des stations de contrôle.

Le gabarit de couverture pour la localisation (LCT) d'un réseau de trois capteurs, tel que défini au § 3.1 et illustré à la Fig. 4, serait mieux défini par la dilution géométrique de la précision (GDOP, geometric dilution of precision) du réseau et représenterait plus précisément la limite des stations de contrôle TDOA, selon le modèle décrit à la Fig. 19.

FIGURE 19

Le gabarit LCT pour un réseau TDOA s'apparente à la GDOP



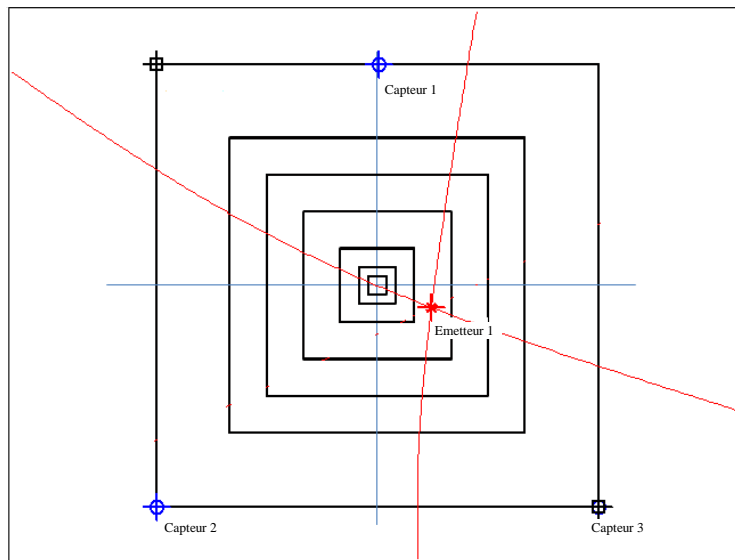
Le gain de corrélation augmente à mesure que la largeur de bande du signal augmente, ce qui est très avantageux en milieu urbain où l'affaiblissement sur le trajet est plus important. Il n'est toutefois pas possible, dans la pratique, de tirer pleinement parti du gain de corrélation, puisqu'au moins une station devrait être située dans la zone de détection RF du signal afin de mesurer les caractéristiques de ce dernier et de permettre une meilleure corrélation avec les autres stations. Une durée d'acquisition des données IQ plus longue peut aussi accroître le gain de corrélation si le canal de propagation entre l'émetteur et les stations de contrôle reste cohérent pendant toute la durée de l'acquisition. Toutefois, les canaux ne resteront pas longtemps cohérents dans un environnement urbain dynamique. C'est pour cette raison qu'on ne peut pas toujours compter sur des durées d'acquisition de données IQ plus longues pour étendre la zone de couverture de la géolocalisation des réseaux TDOA dans un tel environnement.

4.1.3 Planification pour des mesures de localisation de qualité

Comme indiqué précédemment, les réseaux TDOA fonctionnent sur la base de corrélations de séries de données IQ entre paires de stations de contrôle. Dans un réseau comprenant trois stations TDOA, il y aura trois paires de corrélations. Il doit y avoir une corrélation entre au moins deux paires de stations pour que l'emplacement d'un émetteur puisse être déterminé. On trouvera une illustration théorique à la Fig. 20. Dans cet exemple, la corrélation des capteurs 1 et 2 permet de produire une hyperbole presque horizontale (aussi appelée isochrone). La corrélation des capteurs 2 et 3 permet de produire la ligne rouge quasi verticale. Il n'y a pas de corrélation entre les capteurs 1 et 3 et par conséquent aucune isochrone.

FIGURE 20

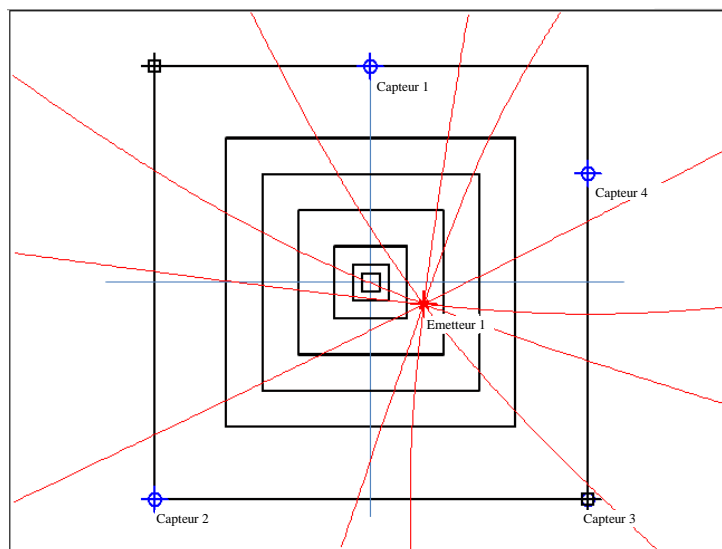
Localisation d'un émetteur grâce à seulement deux paires de corrélations dans un réseau TDOA de trois stations



L'ajout d'une quatrième station TDOA multiplie par deux le nombre de paires de corrélations possibles, qui est porté à six, et augmente considérablement les chances d'estimer avec précision l'emplacement de l'émetteur, comme illustré à la Fig. 21. Les six paires de corrélations possibles sont dessinées, mais seules deux d'entre elles suffiraient pour estimer l'emplacement.

FIGURE 21

Localisation d'un émetteur grâce à six paires de corrélations dans un réseau TDOA de quatre stations



4.2 Planification de réseaux SMN TDOA en zone urbaine

Les environnements urbains sont ceux qui posent le plus de difficultés pour la planification et l'optimisation des réseaux SMN afin de disposer d'une bonne couverture RF et de déterminer l'emplacement précis des émetteurs. Les villes sont très dynamiques, avec des réflecteurs en mouvement comme les bus, les voitures, les tramways et les avions. Les grands bâtiments agissent comme des réflecteurs statiques à proximité qui créent des phénomènes difficiles de propagation des ondes radioélectriques par trajets multiples. Les rues et les avenues traversent les villes selon

différents tracés qui dépendent des concepts appliqués par les urbanistes – et de l'expansion et de la modernisation.

Ce paragraphe présente des approches essentielles pour la planification de réseaux efficaces de sites de contrôle TDOA en zone urbaine. Ces lignes directrices ne suppriment pas la nécessité d'utiliser les critères habituels de sélection des sites, mais visent plutôt à fournir une approche initiale pour la planification de la configuration du réseau. Elles complètent les directives énoncées dans l'Annexe 1 du Rapport UIT-R SM.2211.

4.2.1 Utilisation des lignes de visibilité

Les réseaux de contrôle urbains efficaces tirent parti de la grille naturellement formée par les rues et avenues de la ville. Les larges avenues et les rues principales créent des lignes de visibilité pour la propagation de l'énergie radioélectrique.

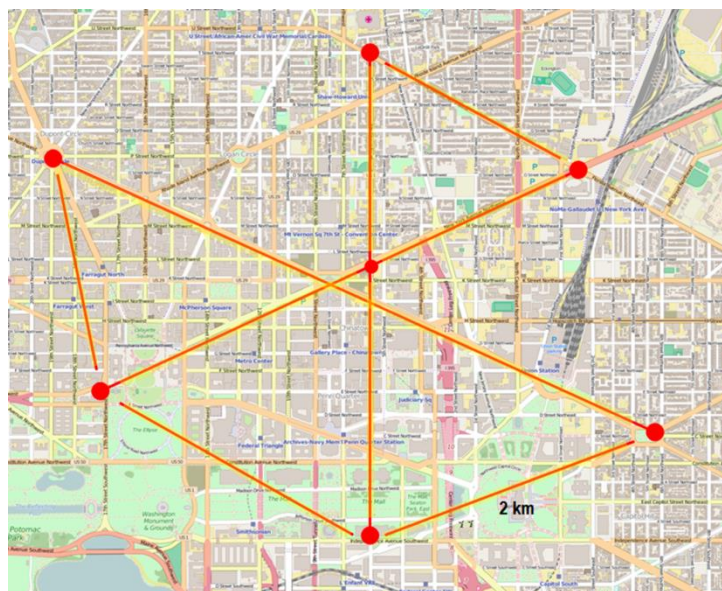
«Dans les zones bâties, les effets d'écran des bâtiments et les effets d'acheminement des ondes radioélectriques le long des rues rendent difficile toute prévision de la valeur médiane de l'intensité du signal. Bien souvent, les trajets qui permettent les plus fortes intensités ne sont pas évidents ou directs, et l'intensité du signal dans les rues radiales ou pratiquement radiales par rapport à la direction de la station de base dépasse souvent celle du signal dans les rues circulaires» [6].

Ceci peut servir de principe directeur pour la planification d'un réseau de contrôle efficace en zone urbaine. Le tracé des rues des villes a tendance à suivre l'un des modèles qui peuvent être utilisés pour trouver des emplacements potentiels pour les sites de contrôle. Les différents modèles illustrés aux Fig. 30 et 31 sont basés sur les lignes de visibilité disponibles dans différents plans de ville.

A la Fig. 22, le tracé des rues correspond à la superposition d'une grille orthogonale secondaire et d'une grille diagonale primaire. Les alentours des intersections de la grille diagonale peuvent offrir de bons emplacements potentiels pour les stations de contrôle (comme l'indiquent les points rouges). La configuration géométrique de cette ville fournit un modèle pour l'emplacement des sites de contrôle secondaires et tertiaires, modèle qui est favorable pour la localisation des émetteurs au moyen des algorithmes TDOA, RSS (intensité du signal reçu) et hybride (TDOA/RSS).

FIGURE 22

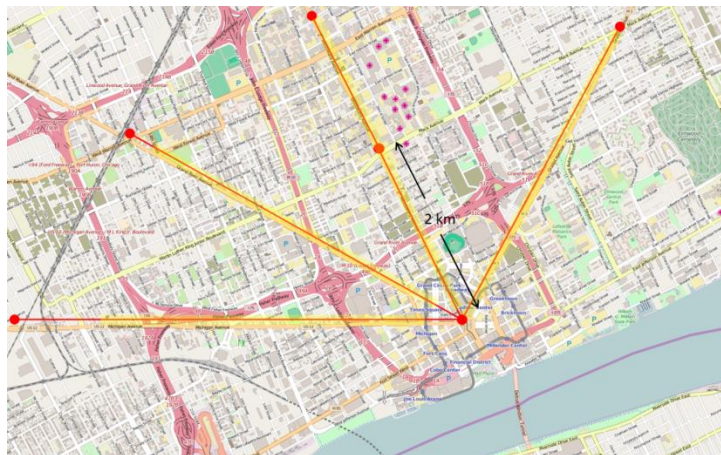
Lignes de visibilité diagonales dans une zone urbaine



La Figure 23 représente une ville dont la configuration géométrique est différente, avec une superposition d'une grille orthogonale secondaire et d'une grille radiale primaire. Dans ce cas, les grandes lignes de visibilité rayonnent vers l'extérieur, depuis un centre urbain jusqu'à des zones de plus en plus suburbaines dans lesquelles les lignes de toiture plus basses permettent d'espacer davantage les sites de contrôle TDOA.

FIGURE 23

Lignes de visibilité radiales dans un centre urbain



4.2.2 Espacement des stations de contrôle

Le responsable de la planification du système doit tenir compte de plusieurs objectifs de conception liés à l'espacement lors du déploiement d'un réseau de contrôle TDOA dans un centre urbain. Des considérations additionnelles liées à la performance du récepteur sont exposées à l'Annexe 3.

- L'espacement aura une incidence sur le chevauchement des zones de couverture pour différentes catégories d'émetteurs. L'affaiblissement sur le trajet en zone urbaine est bien plus important que dans d'autres zones dans lesquelles on s'attend à avoir une visibilité directe.
- Pour localiser les signaux à bande étroite, les stations trop proches les unes des autres peuvent ne pas disposer d'une ligne de base adéquate pour déterminer les différences entre les instants d'arrivée (TDOA). La combinaison d'erreurs de synchronisation et des effets de la propagation par trajets multiples peut empêcher la corrélation entre une paire de capteurs TDOA.
- A mesure que le réseau de contrôle s'étend depuis les zones urbaines denses vers les zones suburbaines et industrielles environnantes, les stations peuvent être davantage espacées car les lignes de visibilité et l'altitude des antennes améliorent leur distance de détection RF.

4.3 Planification de réseaux de contrôle TDOA pour les grandes zones rurales

Dans les zones rurales, des réseaux réguliers primaires et secondaires devraient être déployés en suivant les lignes directrices décrites au § 3.1. Les distances de séparation devraient être déterminées selon les principes énoncés dans le présent § 4.

5 Planification des réseaux de contrôle hybrides

La planification des réseaux de contrôle hybrides AOA/TDOA est basée sur les mêmes principes et aspects que ceux décrits aux § 3 et 4 ci-avant pour les réseaux AOA et TDOA. Il peut être très avantageux d'employer des réseaux de systèmes de contrôle des émissions, de radiogoniométrie et

TDOA capables de mettre en œuvre des techniques hybrides sur des équipements qui respectent ou dépassent les critères fixés dans les Recommandations de l'UIT en matière de sensibilité, de stabilité et de précision des systèmes. Par rapport aux réseaux utilisant uniquement des techniques AOA ou uniquement des techniques TDOA, les réseaux hybrides AOA/TDOA permettent en théorie de couvrir une zone plus vaste avec moins de stations, tout en assurant une géolocalisation plus précise à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la zone délimitée par les stations de contrôle du spectre.

5.1 Comparaison des méthodes de géolocalisation

Il est important de bien comprendre les points forts et les points faibles des différentes méthodes de géolocalisation, afin de prendre des décisions éclairées concernant les méthodes les mieux adaptées pour une exigence de couverture donnée. Une comparaison détaillée des méthodes de géolocalisation AOA, TDOA et hybrides AOA/TDOA est présentée dans le Rapport UIT-R SM.2211-1, qui contient notamment un tableau récapitulatif des principales caractéristiques de ces méthodes.

5.2 Simulation de la couverture et de la précision de la géolocalisation

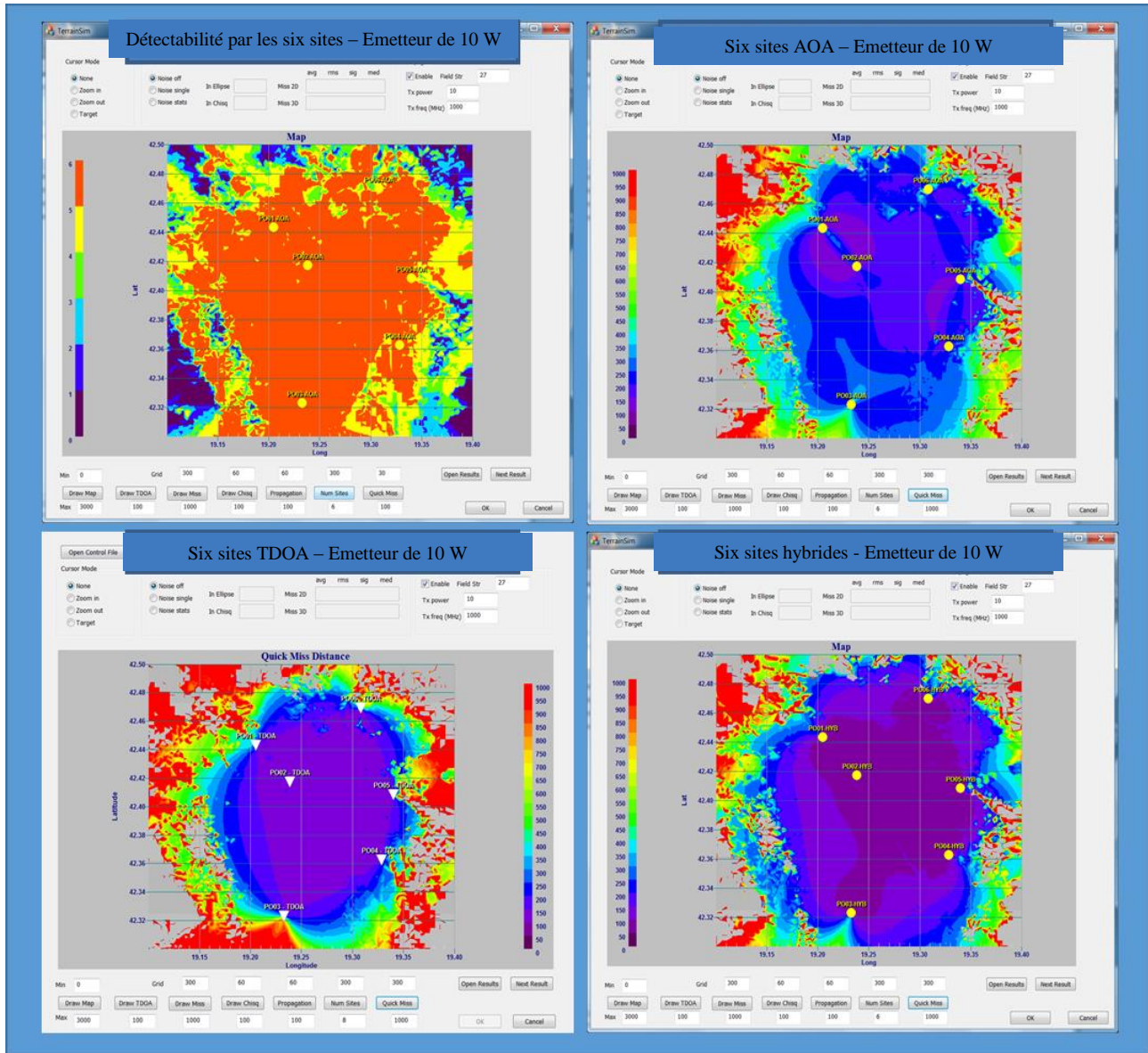
Différentes configurations de systèmes de contrôle du spectre (SMS) AOA, TDOA et hybrides AOA/TDOA ont été simulées et comparées en termes de couverture et de précision pour ce qui est de la géolocalisation.² Pour l'analyse, on a utilisé un outil logiciel basé sur un calcul de géolocalisation associé à la détectabilité du signal cible au niveau des différentes stations considérées, en fonction de la puissance de l'émetteur et des caractéristiques de propagation du signal fondées sur les données topographiques en 3D. La précision de la géolocalisation a été évaluée sur la base de l'écart en distance. Cette analyse a été menée dans diverses conditions, avec par exemple un nombre variable de stations utilisées dans le réseau SMN, une puissance de l'émetteur comprise entre 1 W et 100 W, des conditions de propagation différentes et des techniques de géolocalisation différentes. Les hypothèses concernant la zone de couverture comprennent la couverture souhaitée à la fois à l'intérieur de la zone délimitée par les stations et à l'extérieur de cette zone.

Sur la base des exigences de couverture et des conditions de fonctionnement simulées (voir le Rapport UIT-R SM.2211-1), l'utilisation de techniques hybrides AOA/TDOA a donné une meilleure précision sur une zone de couverture plus grande à la fois dans le cas de trois stations et dans le cas de quatre stations. La Figure 24 présente l'exemple supplémentaire de six stations avec un émetteur de 10 watts. Un système constitué de stations AOA couvre l'intégralité de la zone considérée, mais la précision de la géolocalisation est faible en raison du fort espacement entre les émetteurs. Un système constitué de stations TDOA donne une bonne précision dans la zone délimitée par les sites TDOA, mais la précision de la géolocalisation se dégrade rapidement en dehors de cette zone. Dans l'exemple simulé, un réseau hybride AOA/TDOA tire parti à la fois de la couverture d'une zone plus grande offerte par les stations AOA (pour un nombre donnée de stations) et de la complexité moins grande des équipements/antennes offerte par les stations TDOA.

² En ce qui concerne la propagation, on a utilisé pour cette simulation le modèle TIREM (Terrain Integrated Rough Earth Model) (voir le Manuel de l'UIT-R sur la gestion nationale du spectre).

FIGURE 24

Exemple d'une couverture par six stations, montrant la détectabilité d'un émetteur de 10 W et la couverture des systèmes AOA, TDOA et hybride



5.3 Résumé concernant la performance des systèmes hybrides

Une solution de géolocalisation hybride AOA/TDOA devrait nécessiter moins de stations qu'une solution de géolocalisation purement TDOA pour obtenir une couverture et une précision identiques voire meilleures, dans de nombreux cas couramment rencontrés où les zones à couvrir sont étendues. La solution hybride tire parti à la fois des avantages offerts par les systèmes AOA (meilleure performance avec des signaux à bande étroite, couverture d'une zone étendue, etc.) et des avantages offerts par les systèmes TDOA (installation et caractéristiques d'antenne plus simples, rejet du bruit non corrélé, etc.).³ Par conséquent, dans certains cas, les coûts d'installation et les coûts récurrents pour un réseau hybride AOA/TDOA pourront être moins élevés pour une zone de couverture donnée sur la durée de vie du réseau.

6 Méthode générale de planification des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux

Pour planifier un réseau de stations de contrôle, il convient d'abord de déterminer les fonctions qui devront être assurées par ce réseau, sachant que pour l'écoute et/ou la mesure de caractéristiques de signaux radio, dans certains cas une seule station de contrôle peut suffire, alors qu'un réseau AOA comporte au minimum deux stations et un réseau TDOA au minimum trois stations. La zone de couverture des stations de contrôle dans chacun de ces cas est définie en fonction de la valeur du champ minimal requis.

Par conséquent, si on suppose que le futur réseau SMN doit assurer plusieurs fonctions, il convient, pour sa planification, de s'intéresser en premier lieu à la fonction pour laquelle le champ minimal requis est le plus élevé, puis de procéder par ordre décroissant de champ minimal requis:

- 1) radiogoniométrie et estimation de l'emplacement d'un émetteur (20 dB(μ V/m)) conformément au Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre);
- 2) mesure de paramètres d'un signal radioélectrique (12 dB(μ V/m)) conformément au Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre);
- 3) écoute des émissions (0 dB(μ V/m)) conformément au Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre).

Cette séquence permettra de couvrir la zone étudiée avec le nombre le plus petit de stations de contrôle et d'éviter des dépenses inutiles.

Lors de l'étape préparatoire, il convient de prendre toutes les décisions mentionnées au § 2 ci-avant, à savoir définir le territoire à contrôler, choisir une méthode de calcul de la propagation des ondes radioélectriques, déterminer la valeur maximale possible d'incertitude de localisation des émetteurs (pour la planification d'un réseau AOA/TDOA), calculer la valeur limite du champ minimal, identifier les zones à l'intérieur desquelles il n'est pas recommandé de placer des stations de contrôle, etc.

On emploie les termes et définitions qui suivent dans la méthode décrite ci-après:

«**liaison AOA**» – deux stations de contrôle d'un réseau SMN AOA qui peuvent être utilisées pour déterminer l'emplacement d'un émetteur avec une incertitude de localisation prédéfinie.

«**liaison TDOA**» – trois stations de contrôle d'un réseau SMN TDOA qui peuvent être utilisées pour déterminer l'emplacement d'un émetteur avec une incertitude de localisation prédéfinie.

émetteur de test «couvert» – émetteur de test dont le champ au niveau de la station de contrôle est supérieur à la valeur seuil (champ minimal requis) et dont l'erreur de localisation (emplacement de

³ On trouvera une description plus complète au § 3 du Rapport UIT-R SM.2211-1.

l'émetteur déterminé par les stations de contrôle AOA/TDOA) ne dépasse pas la valeur prédéfinie de l'incertitude maximale de localisation.

indice de couverture de l'emplacement d'une station de contrôle – nombre d'émetteurs de test se trouvant dans la zone étudiée qui peuvent être couverts par une station de contrôle installée sur cet emplacement.

indice de couverture de la «liaison AOA» – nombre d'émetteurs de test se trouvant dans la zone étudiée qui peuvent être couverts par cette «liaison AOA».

indice de couverture de la «liaison TDOA» – nombre d'émetteurs de test se trouvant dans la zone étudiée qui peuvent être couverts par cette «liaison TDOA».

6.1 Modélisation informatique des petits réseaux SMN et des réseaux SMN locaux spéciaux

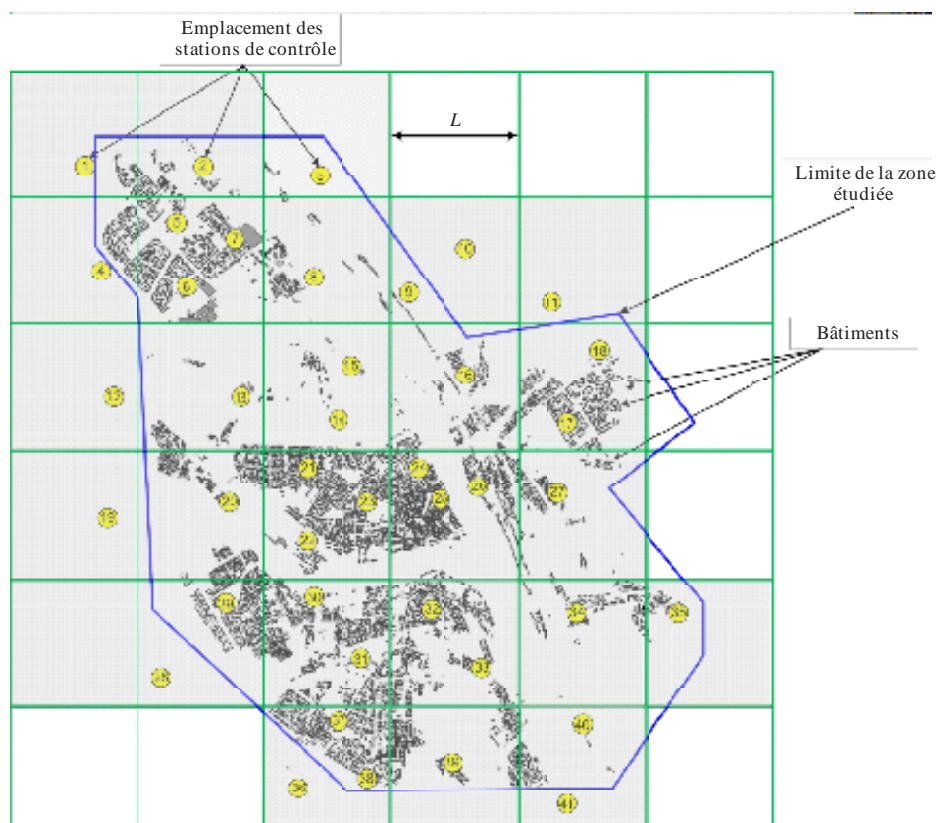
Etape 1: Choix des emplacements possibles pour les stations de contrôle des émissions

Après avoir déterminé le territoire qui doit être contrôlé, il convient de choisir les emplacements des futures stations de contrôle des émissions. Pour ce faire, on applique une grille de pas L compris entre 0,5 et 5 km couvrant la zone étudiée ainsi que les alentours. Il est préférable de choisir un petit pas, mais ce choix dépend dans une large mesure des ressources de calcul disponibles.

Dans chaque cellule de la grille, il convient de choisir au moins un emplacement susceptible de pouvoir accueillir une station de contrôle des émissions (on peut choisir plusieurs emplacements dans certaines cellules). Par exemple, dans les zones urbaines, il peut s'agir de toits d'immeuble, tandis que dans les zones rurales, il peut s'agir d'un endroit en hauteur près d'une route ou d'un endroit disposant des infrastructures nécessaires (voir la Fig. 25).

FIGURE 25

Choix des emplacements possibles pour les stations de contrôle des émissions



Etape 2: Superposition d'un «quadrillage»

Il convient de superposer un «quadrillage» dans les limites de la zone dans laquelle les émissions doivent être contrôlées. Le pas de ce «quadrillage» ne doit pas être trop grand par rapport aux autres objets situés à l'extérieur. Par exemple, pour la planification de réseaux SMN dans des zones urbaines, il peut être compris entre 5 et 50 m. Des émetteurs de test sont placés aux nœuds de ce quadrillage. La p.i.r.e., la hauteur médiane et les autres caractéristiques des émetteurs de test doivent correspondre aux caractéristiques de stations radioélectriques réelles, qui sont supposées être sous contrôle (voir la Fig. 26).

FIGURE 26

Superposition d'un «quadrillage» (dans le cas d'émetteurs à l'extérieur)



Rapport SM.2356-26

Etape 3: Réalisation des calculs

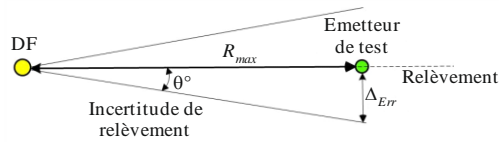
Il convient de calculer la zone de service pour tous les emplacements choisis. Si la zone étudiée est couverte en partie par le réseau de contrôle existant qui sera modernisé, on fait tous les calculs suivants en tenant compte de la couverture de ces stations avec leurs caractéristiques mises à jour. La zone de couverture de chaque station de contrôle est définie par les conditions suivantes:

- la distance maximale (R_{max_loc}) entre la station de contrôle et un émetteur de test donné est définie par la formule (uniquement pour la planification de réseaux SMN AOA, voir la Fig. 27):

$$R_{max} = \text{incertitude maximale de localisation } (\Delta_{Err}) / \text{tangente (incertitude de relèvement } (\theta^\circ));$$
- le champ calculé sur les emplacements choisis pour les stations de contrôle doit être supérieur au champ minimal requis (voir la Fig. 28).

FIGURE 27

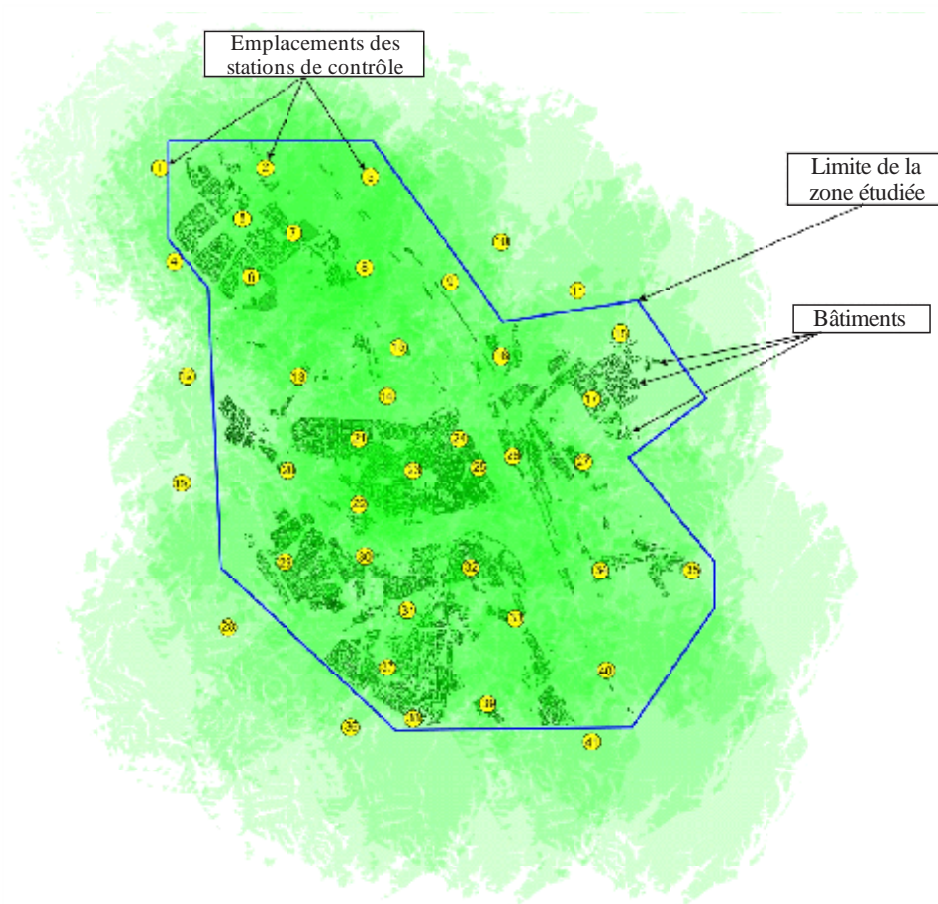
Exemple de définition de la distance maximale entre une station de contrôle et un émetteur de test (uniquement pour la planification de réseaux SMN AOA)



Rapport SM.2356-27

FIGURE 28

Zones de couverture des emplacements choisis pour les stations de contrôle



Rapport SM.2356-2

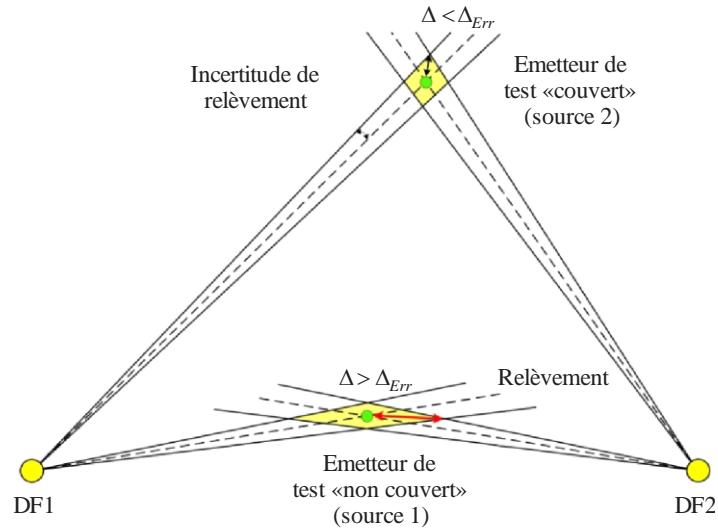
Etape 4: Réalisation du diagramme des «liaisons AOA/TDOA» et choix des stations de contrôle de référence

Planification des réseaux SMN AOA

Pour la planification des réseaux SMN AOA, il est nécessaire que chaque émetteur de test soit couvert par au moins deux stations de contrôle. Ainsi, pour chaque paire de stations de contrôle, la zone de couverture associée est déterminée par la zone à l'intérieur de laquelle l'incertitude de localisation ne dépassera pas la valeur prédéfinie d'incertitude maximale de localisation (Δ_{Err}), voir la Fig. 29).

FIGURE 29

Exemple de détermination de la zone de couverture associée à deux stations AOA



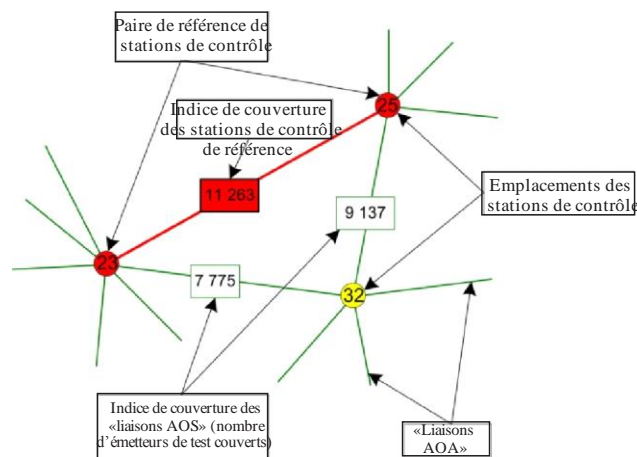
Rapport SM.2356-25

L'indice de couverture de cette «liaison AOA» (paire de stations de contrôle) est égale au nombre d'émetteurs de test couverts se trouvant dans cette zone. Après avoir calculé l'indice de couverture pour toutes les «liaisons AOA», il est possible de réaliser le diagramme des «liaisons AOA».

Parmi toutes les paires de stations AOA, il convient de choisir la paire de stations de contrôle ayant l'indice de couverture le plus élevé (ayant la couverture la plus large dans la zone étudiée). Si nécessaire, on examine en outre les emplacements de futures stations de contrôle. La première paire résultante de stations de contrôle est considérée comme la «paire de référence» (Fig. 30).

FIGURE 30

Partie du diagramme des «liaisons AOA»

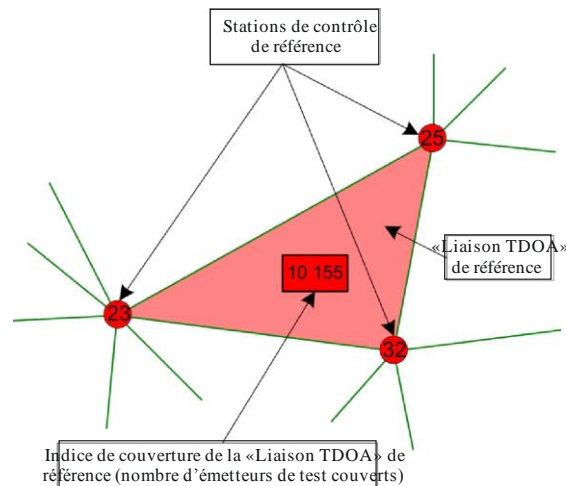


Rapport SM.2356-3C

Planification des réseaux SMN TDOA

Une procédure analogue est suivie pour la planification des stations TDOA, à ceci près que, dans ce cas, il est nécessaire que chaque émetteur de test soit couvert par au moins trois stations de contrôle (Fig. 31).

FIGURE 31
Partie du diagramme des «liaisons TDOA»



Rapport SM.2356-31

Planification des réseaux SMN pour l'écoute et la mesure de paramètres d'un signal radio

Dans le cas de la planification des réseaux SMN pour l'écoute et la mesure de paramètres d'un signal radio, il convient de choisir la station ayant la couverture la plus large dans la zone étudiée (ayant l'indice de couverture le plus élevé). Si nécessaire, on examine en outre l'emplacement d'une future station.

Etape 5: Définition de la zone non couverte

Après avoir spécifié les emplacements des stations de contrôle des émissions, on «retire» leurs zones de couverture de la zone étudiée. Il convient de noter qu'après cette itération, les indices de couverture des emplacements restants des stations de contrôle ou les indices de couverture des «liaisons AOA/TDOA» restantes vont changer.

Etape 6: Choix des emplacements pour les nouvelles stations de contrôle

La partie non couverte de la zone étudiée est analysée. Il s'agit d'obtenir des réponses aux questions suivantes: La couverture peut-elle être assurée par des stations mobiles? Est-ce nécessaire de prévoir des stations de contrôle fixes supplémentaires? Si c'est nécessaire, il faut alors choisir, pour chaque station de contrôle supplémentaire, l'emplacement suivant ayant l'indice de couverture le plus élevé pour la partie non couverte de la zone étudiée.

Planification des réseaux SMN AOA

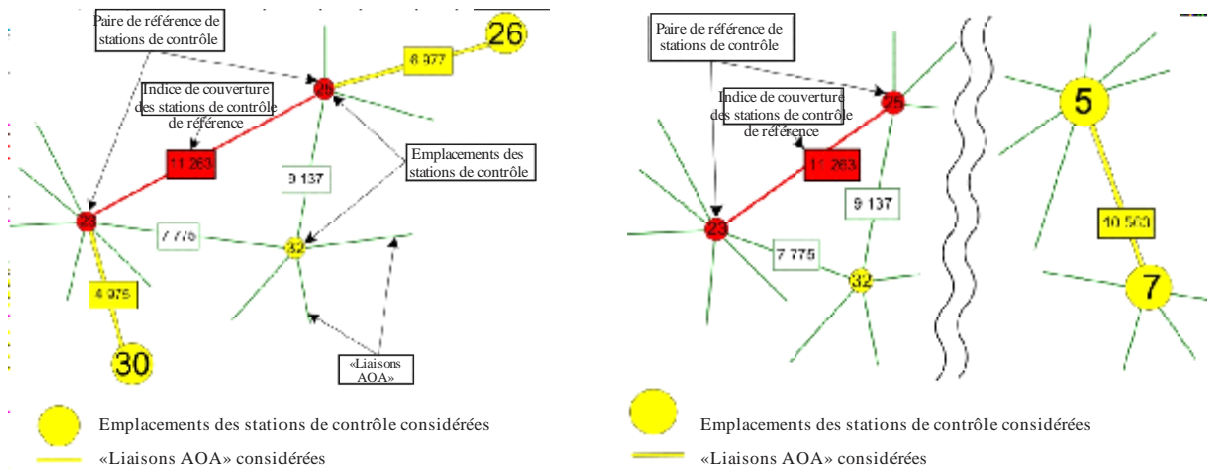
Dans le cas de la planification de réseaux SMN AOA, on choisit la paire suivante de stations ayant l'indice de couverture le plus élevé. Si cette paire n'est pas adjacente à la «paire de référence», il convient de déterminer s'il y a lieu de rallonger la chaîne de la «paire de référence» pour en faire une chaîne à quatre stations, afin que la somme des indices de couverture de la chaîne résultante soit supérieure à l'indice de couverture total des deux «liaisons AOA» prises isolément. Il convient de choisir la variante ayant l'indice de couverture total le plus élevé (voir la Fig. 32). Il est à noter que:

Indice de couverture ($S_{30-23} - S_{23-25} - S_{25-26}$) = Indice de couverture ($S_{30-23} \cup S_{23-25} \cup S_{25-26}$);

Indice de couverture ($S_{30-23} - S_{23-25} - S_{25-26}$) \neq Indice de couverture (S_{30-23}) + Indice de couverture (S_{23-25}) + Indice de couverture (S_{25-26}).

FIGURE 32

Exemple de choix d'emplacements pour les stations de contrôle (partie du diagramme des «liaisons AOA»)



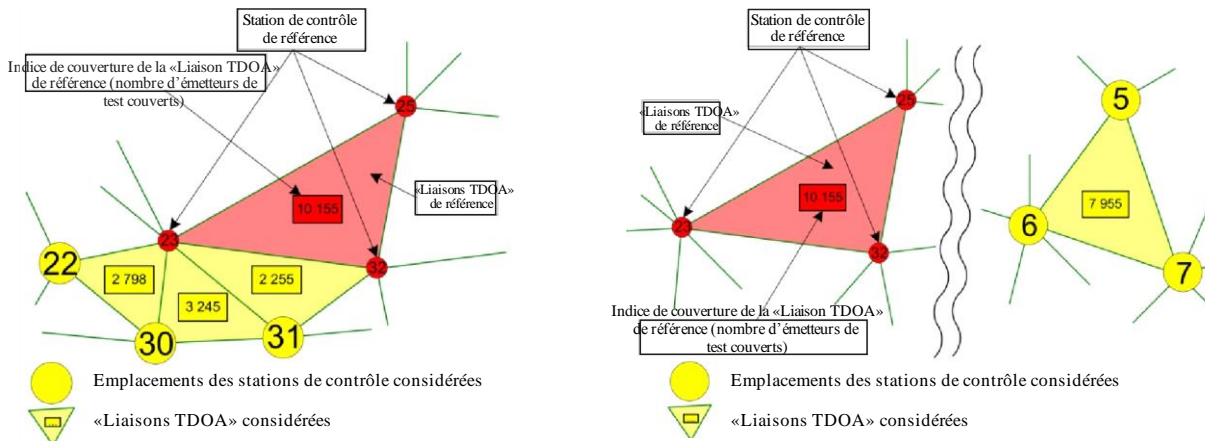
Rapport SM.2356-32

Planification des réseaux SMN TDOA

Une procédure analogue est suivie pour la planification des stations TDOA. Dans ce cas, on choisit la «liaison TDOA» suivante ayant l'indice de couverture le plus élevé. Si ces stations ne sont pas adjacentes aux «stations de référence», il convient de déterminer s'il y a lieu de rallonger la chaîne des «stations de référence», afin que la somme des indices de couverture de la chaîne résultante soit supérieure à l'indice de couverture total des deux «liaisons TDOA» prises isolément. Il convient de choisir la variante ayant l'indice de couverture total le plus élevé (Fig. 33).

FIGURE 33

Exemple de choix d'emplacements pour les stations de contrôle (partie du diagramme des «liaisons TDOA»)



Rapport SM.2356-33

Planification des réseaux SMN pour l'écoute et la mesure de paramètres d'un signal radio

Dans le cas de la planification de réseaux SMN pour l'écoute et la mesure de paramètres d'un signal radio, il convient d'analyser la partie non couverte de la zone étudiée puis de choisir la station suivante ayant l'indice de couverture le plus élevé (ayant la couverture la plus large dans la partie non couverte de la zone étudiée).

Etape 7: Réalisation de nouvelles itérations

Si nécessaire, il convient de répéter les étapes 5, 6 et 7.

7 Conclusion

Le processus de planification de nouveaux réseaux SMN et d'optimisation des réseaux SMN existants en termes de couverture pour le contrôle des émissions est relativement complexe et nécessite que certaines décisions administratives soient prises à diverses étapes. En outre, il peut être relativement long, en particulier lorsqu'il s'agit d'acquérir les parcelles nécessaires pour installer des stations fixes, car, pour chaque emplacement potentiel, il faut vérifier s'il convient et déterminer la couverture correspondante. Il pourra être nécessaire de répéter la procédure afin de trouver des emplacements qui sont disponibles et respectent toutes les exigences, dans la mesure du possible.

Des calculs de la couverture pour le contrôle des émissions sont nécessaires à pratiquement toutes les étapes de la planification et de l'optimisation d'un réseau SMN. Comme il ressort clairement de la Recommandation UIT-R SM.1392-2, ces calculs jouent donc un rôle fondamental dans le processus, en particulier les calculs du gabarit LCT, ce paramètre précis étant, comme nous l'avons vu, le meilleur indicateur de qualité de l'ensemble du réseau SMN et de ses différentes parties.

Annexe 1

Exemple pratique de planification d'un réseau SMN AOA local sur un terrain relativement plat

A1-1 Introduction

L'efficacité de fonctionnement d'un service national de contrôle du spectre dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont les suivants:

- la structure du réseau SMN;
- le nombre de stations de contrôle du spectre et d'équipements de contrôle des émissions utilisés, et leurs capacités techniques.

La structure du réseau SMN est déterminée par les fonctions de contrôle du spectre à assurer, la bande de fréquences de fonctionnement et la répartition des émetteurs radio à l'intérieur de la zone relevant du service de contrôle du spectre.

Dans la plupart des cas, la bande de fréquences de fonctionnement des réseaux SMN fixes est limitée à 3 000 MHz au maximum et la bande de fréquences de fonctionnement des réseaux fixes de radiogoniométrie est limitée à 1 000 MHz au maximum.

La zone totale couverte par le réseau SMN est formée par la réunion des zones de couverture des toutes les stations de contrôle fixes.

La zone totale couverte par le réseau de radiogoniométrie ou par le groupe de radiogoniomètres est formée par la réunion des zones couvertes par tous les radiogoniomètres du réseau.

La zone totale couverte pour la localisation est formée par l'intersection des zones couvertes par au moins deux radiogoniomètres.

La zone de couverture d'une station de contrôle fixe donnée et la zone couverte par un radiogoniomètre donné peuvent être calculées à l'aide de la méthode décrite dans la version la plus récente de la Recommandation UIT-R P.1546 pour des conditions de propagation en espace libre ou peuvent faire l'objet de mesures pratiques.

Les données initiales requises aux fins de la comparaison du contour des zones de couverture radiogoniométrique sont les suivantes: valeur type de sensibilité (valeur seuil de champ) des récepteurs des radiogoniomètres et des récepteurs des stations de contrôle pour différents modes de fonctionnement, puissance type de sortie des émetteurs, hauteur d'antenne type des stations de contrôle et hauteur d'antenne type des émetteurs, comme indiqué dans le Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre.

A1-2 Données initiales pour la planification de la topologie d'un réseau SMN

Dans la pratique, il existe deux approches principales qui peuvent être utilisées pour la planification d'un réseau SMN fixe:

- couvrir la zone terrestre la plus vaste possible en utilisant le plus petit nombre possible de stations de contrôle fixes;
- couvrir, en termes de contrôle des émissions, le plus grand nombre possible d'émetteurs radio en utilisant le plus petit nombre possible de stations de contrôle fixes.

La première approche, décrite au § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011), repose sur l'utilisation d'un réseau régulier de radiogoniomètres, dans lequel les radiogoniomètres sont placés aux sommets de triangles réguliers. Mais cette méthode ne donne pas le nombre minimal de radiogoniomètres (ou de stations de contrôle fixes). Dans le calcul de la zone couverte par les radiogoniomètres en vue d'optimiser l'efficacité du réseau SMN, on peut tenir compte du terrain.

Dans la deuxième approche, on effectue des simulations préliminaires de diverses topologies de réseau SMN fixe. Dans ce cas, qui consiste à planifier la topologie du système de contrôle du spectre, il est nécessaire de tenir compte de trois facteurs principaux:

- la répartition des émetteurs radio dans la zone considérée;
- les conditions de propagation des ondes radioélectriques dans les différentes bandes de fréquences;
- la méthode de multiplexage qui est utilisée dans certains systèmes de télécommunication.

La méthode de multiplexage détermine la possibilité pour le réseau de radiogoniomètres de localiser les émetteurs radio.

A1-3 Optimisation de la topologie du réseau SMN le plus simple

Le réseau de radiogoniométrie le plus simple est constitué de deux radiogoniomètres, espacés d'environ 8 à 10 km. Malheureusement, ce type de structure peut comporter des zones non couvertes, à savoir des zones dans lesquelles le réseau de radiogoniométrie ne permet pas de localiser les émetteurs avec la précision requise ou permet pas du tout de les localiser.

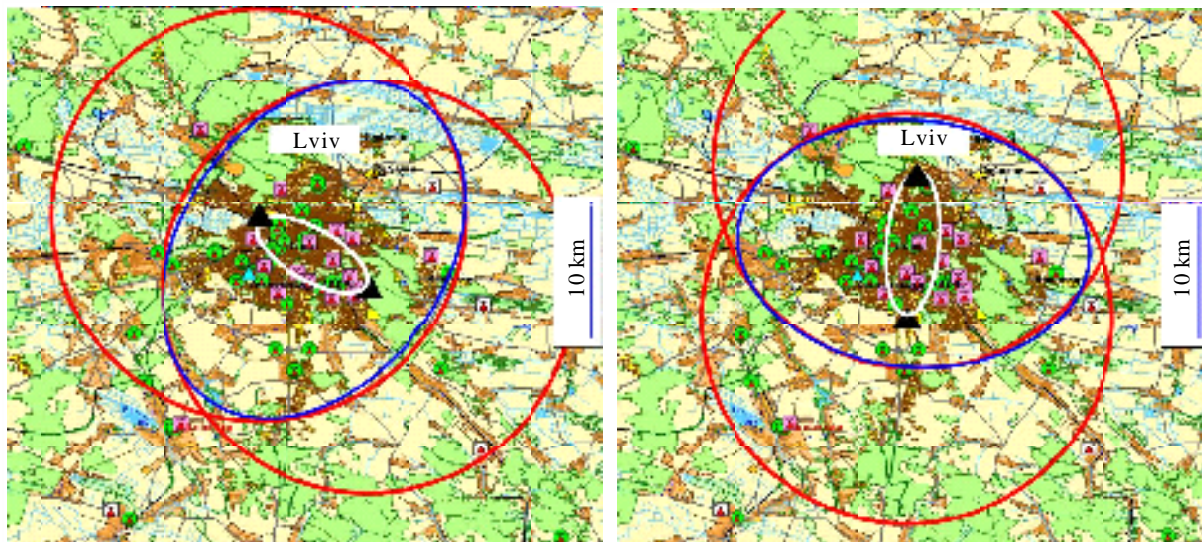
A titre d'exemple, deux variantes possibles pour les emplacements de deux radiogoniomètres à Lviv (Ukraine) sont représentées dans la Fig. A1-1. Les positions des émetteurs radio en ondes décimétriques qui fonctionnent dans la bande de fréquences des 400 MHz sont repérées par des icônes vertes et roses, et les emplacements des radiogoniomètres sont repérés par de petits triangles noirs. Les contours des zones de radiogoniométrie calculées dans des conditions de propagation en espace libre sont représentés par une ligne rouge, et le contour de la zone totale couverte pour la localisation par une ligne bleue.

Si les deux radiogoniomètres sont placés en des points opposés de la zone peuplée, certains émetteurs se trouvent dans la zone totale couverte pour la localisation, tandis que les autres se trouvent dans la zone non couverte (dont le contour est représenté par une ligne blanche dans la Fig. A1-1). Dans ce cas, le nombre d'émetteurs non couverts correspond à environ 30% du nombre total des émetteurs.

Dans la pratique, il existe deux solutions pour éliminer la zone non couverte:

- utiliser un troisième radiogoniomètre;
- optimiser les emplacements des radiogoniomètres.

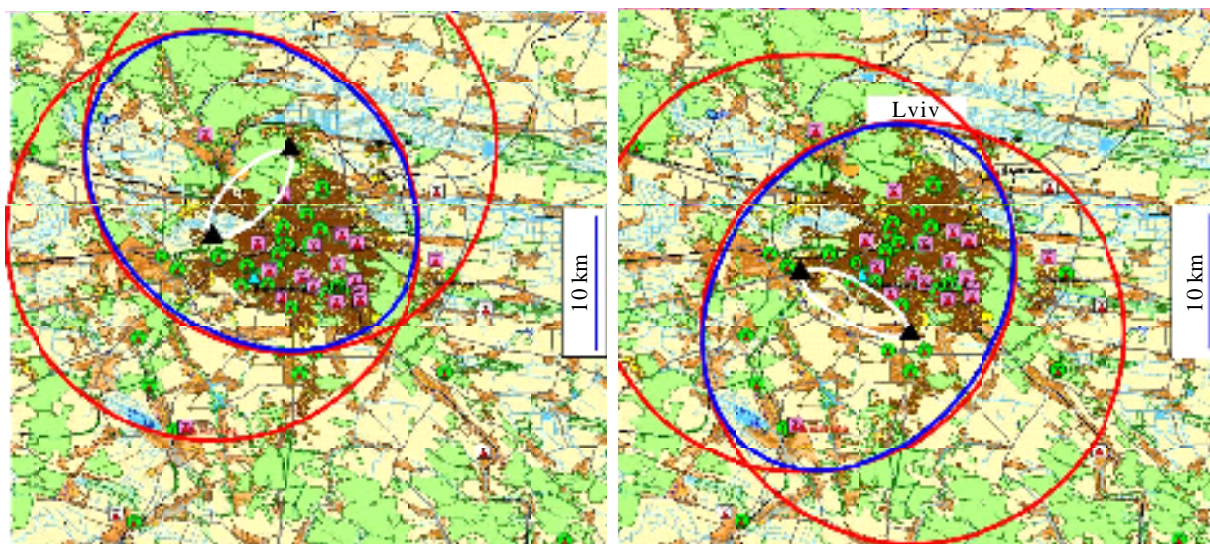
FIGURE A1-1

Variantes possibles pour les emplacements de deux radiogoniomètres

Rapport SM.2356-A1-01

La deuxième solution repose sur l'utilisation de seulement deux radiogoniomètres. Des variantes possibles pour les emplacements des radiogoniomètres sont présentées dans la Fig. A1-2. Dans ce cas, tous les émetteurs se trouvent dans la zone totale couverte pour la localisation et aucun ne se trouve dans la zone non couverte.

FIGURE A1-2

Autres variantes possibles pour les emplacements de deux radiogoniomètres à Lviv

Rapport SM.2356-A1-02

La topologie du réseau de localisation le plus simple constitué de deux radiogoniomètres est optimale lorsque les radiogoniomètres sont espacés d'environ 8 à 10 km et placés près de la périphérie de la ville, ce qui permet de minimaliser le nombre d'émetteurs radio qui risquent de se trouver dans la zone non couverte.

A1-4 Topologie régulière d'un vaste réseau SMN

Pour assurer le contrôle des émissions et la localisation d'émetteurs radio sur un vaste territoire, il est nécessaire d'utiliser de nombreux radiogoniomètres.

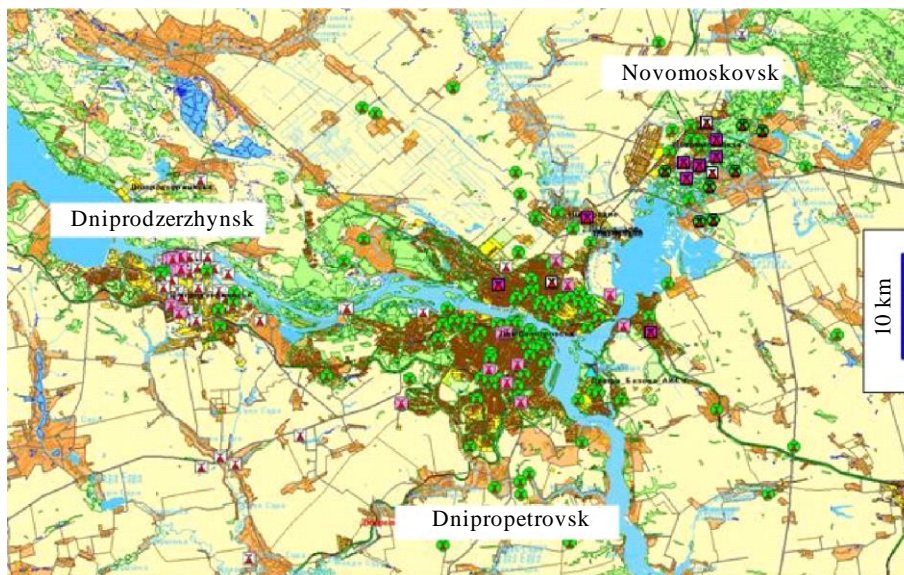
La Figure A1-3 montre la répartition des émetteurs radio (stations de base à ressources partagées et émetteurs en ondes décimétriques) dans la bande de fréquences des 400 MHz à Dnipropetrovsk et dans les villes voisines que sont Dniprodzerzhynsk et Novomoskovsk (Ukraine). Les positions des émetteurs sont repérées par des icônes vertes et roses.

Les Figures A1-4 et A1-5 montrent deux variantes possibles de topologie calculées pour le réseau fictif de radiogoniométrie et de localisation, qui couvrent les émetteurs sur le territoire considéré et sont basées sur une structure de réseau régulière.

Le réseau représenté dans la Fig. A1-4, constitué de huit radiogoniomètres, couvre 100% de la zone considérée et assure la détection et la mesure des paramètres de fréquence d'environ 99% des émetteurs mais il assure la localisation de moins de 87% des émetteurs radio.

FIGURE A1-3

Répartition des stations de base à ressources partagées et des émetteurs en ondes décimétriques dans la bande de fréquences des 400 MHz



Report SM.2356-A1-03

Le réseau représenté dans la Fig. A1-5 couvre 100% de la zone considérée et assure la détection, la mesure des paramètres de fréquence et la localisation d'environ 99% des émetteurs radio. Mais sept radiogoniomètres au moins sont nécessaires.

FIGURE A1-4

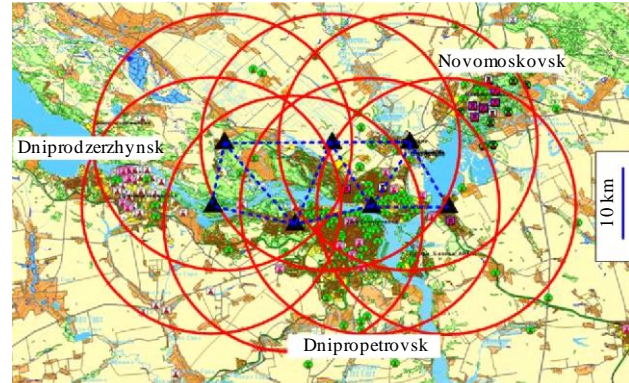
Réseau régulier fictif pour la radiogoniométrie et la localisation (Var. 1)



Rapport SM.2356-A1-04

FIGURE A1-5

Réseau régulier fictif pour la radiogoniométrie et la localisation (Var. 2)



Rapport SM.2356-A1-05

A1-5 Structure irrégulière de la topologie d'un réseau SMN

La topologie d'un vaste réseau de radiogoniométrie est basée sur une structure irrégulière et est déterminée en plusieurs étapes sur la base de deux critères:

- couvrir, en termes de contrôle des émissions, le plus grand nombre possible d'émetteurs radio en utilisant le plus petit nombre possible de stations de contrôle fixes;
- minimaliser le nombre d'émetteurs radio se trouvant dans la zone non couverte entre les deux radiogoniomètres les plus proches.

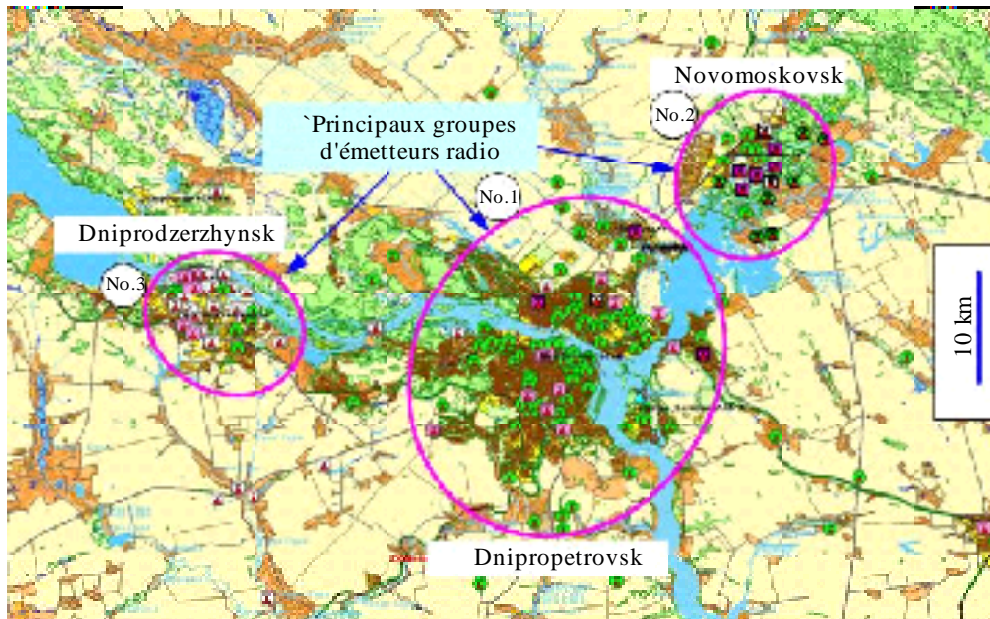
Etape 1. On détermine la répartition des émetteurs radio dans la zone considérée dans la bande de fréquences donnée. La répartition des émetteurs radio dans les bandes d'ondes métriques/décimétriques sur le territoire couvrant Dnipropetrovsk et les villes voisines que sont Dniprodzerzhinsk et Novomoskovsk est représentée dans la Fig. A1-3.

Etape 2. On détermine les grands groupes d'émetteurs radio dans la zone considérée.

La Figure A1-6 montre trois grands groupes de stations de base à ressources partagées et d'émetteurs radio en ondes métriques dans la bande de fréquences des 400 MHz, délimités par des ellipses roses.

FIGURE A1-6

Principaux groupes d'émetteurs dans la bande de fréquences des 400 MHz



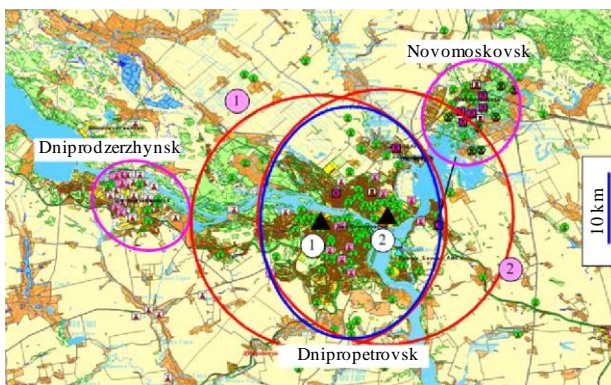
Rapport SM.2356-A1-06

Etape 3. On simule la topologie préliminaire du système de contrôle du spectre.

La topologie du réseau SMN est déterminée à l'aide d'une procédure itérative. La première proposition consiste bien évidemment à créer la zone de couverture du groupe N° 1 pour la localisation en déployant deux radiogoniomètres (Fig. A1-7).

FIGURE A1-7

Première version de la topologie du réseau SMN



Rapport SM.2356-A1-07

FIGURE A1-8

Zone totale couverte pour la localisation correspondant au réseau SMN



Rapport SM.2356-A1-08

Mais dans ce cas, pour pouvoir localiser les émetteurs appartenant aux groupes N° 2 et N° 3, il est nécessaire de déployer deux autres paires de radiogoniomètres (Fig. A1-8). Le contour de la zone totale couverte pour la localisation correspondant à ce réseau SMN est représenté par une ligne bleue.

Etape 4. Optimisation de la topologie du réseau SMN.

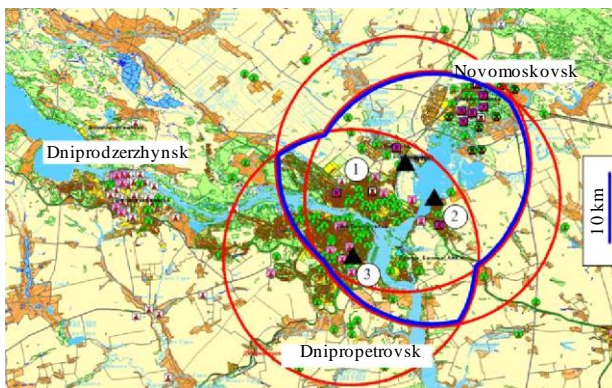
En utilisant une structure irrégulière, il est possible de minimaliser le nombre de radiogoniomètres ainsi que d'optimiser la topologie du réseau SMN.

Au premier stade de la modélisation du réseau de localisation, on place trois radiogoniomètres (1, 2 et 3) pour créer la zone de couverture pour la localisation englobant le groupe N° 2 d'émetteurs et la plus grande partie du groupe N° 3 d'émetteurs (Fig. A1-9).

Au deuxième stade, la zone est étendue par l'introduction des radiogoniomètres 4 et 5 (Fig. A1-10). Le contour de la zone totale couverte pour la localisation est représenté par une ligne bleue.

FIGURE A1-9

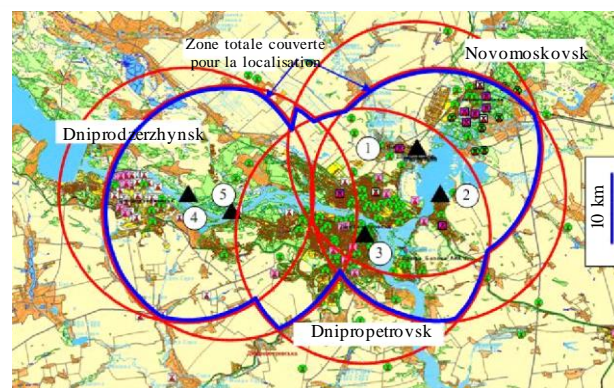
Premier stade de modélisation de la topologie irrégulière d'un réseau SMN



Rapport SM.2356-A1-09

FIGURE A1-10

Deuxième stade de modélisation de la topologie irrégulière d'un réseau SMN



Rapport SM.2356-A1-10

Pour créer la zone de couverture prédéterminée, on peut ajouter certains radiogoniomètres en utilisant les critères décrits ci-avant.

La topologie de ce sous-réseau local de radiogoniométrie et de localisation à Dnipropetrovsk, Dniprodzerzhinsk et Novomoskovsk a été déterminée sur la base de résultats simulés. Ce sous-réseau comprend cinq radiogoniomètres et couvre environ 100% des émetteurs radio en ondes métriques et environ 99% de la vaste zone. En outre, il ne comporte pas de zone non couverte, y compris l'éventuelle zone non couverte entre les radiogoniomètres fixes 4 et 5.

Au cours de la planification, on peut optimiser la structure irrégulière de la topologie du réseau de radiogoniométrie et de localisation afin qu'il couvre davantage d'émetteurs radio en utilisant le plus petit nombre possible de radiogoniomètres fixes.

Annexe 2

Planification d'un réseau SMN AOA dans des régions montagneuses ou vallonnées

A2-1 Préface

On sait que les zones de couverture des stations de contrôle augmentent lorsqu'on augmente la hauteur de leur antenne. Toutefois, toute augmentation importante de la hauteur physique du mât de l'antenne présente de nombreuses difficultés techniques et des coûts financiers considérables. Dans la pratique, on augmente donc généralement la hauteur équivalente de l'antenne d'une station en choisissant un emplacement sur un terrain plus haut. Dans les pays avec des régions montagneuses, la hauteur équivalente des antennes peut parfois atteindre 3 000 m, valeur qui est citée dans la Recommandation UIT-R P.1546-4.

La méthode générale qui a été élaborée récemment [1, 2] et le logiciel correspondant pour la planification des réseaux SMN (décrit dans l'Annexe 5 du Manuel de l'UIT-R sur l'application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique, édition de 2015) permettent de procéder à des évaluations quantitatives des avantages susceptibles de résulter du choix d'un tel emplacement pour les antennes de station fixe, d'analyser les phénomènes associés et de formuler des Recommandations appropriées [3].

Les calculs de couverture pour le contrôle des émissions ont été basés sur la méthode décrite au § 4.7.3.1.4 et au § 6.8 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011). L'émetteur de test utilisé pour ces estimations était un émetteur PMR (radiocommunications mobiles privées) de 10 W fonctionnant à 900 MHz, avec une hauteur d'antenne de 6 m au-dessus du sol, ce qui correspond à un mât d'antenne de 3 m installé sur le toit d'un bâtiment de plain-pied. On dispose ainsi d'un modèle utile de petite station de base radio mobile avec des paramètres ayant leurs valeurs minimales. Le modèle de propagation des ondes radioélectriques utilisé repose sur la méthode décrite dans l'Annexe 5 de la Recommandation UIT-R P.1546-4, dont le § 1.1 décrit une méthode recommandée de calcul applicable au contrôle des émissions. L'incertitude de radiogoniométrie est prise égale à 1° r.m.s. pour toutes les stations fixes considérées et à 2° r.m.s. pour les stations mobiles.

A2-2 Zones de couverture pour la radiogoniométrie et la localisation dans le cas d'antennes de station placées à une certaine altitude

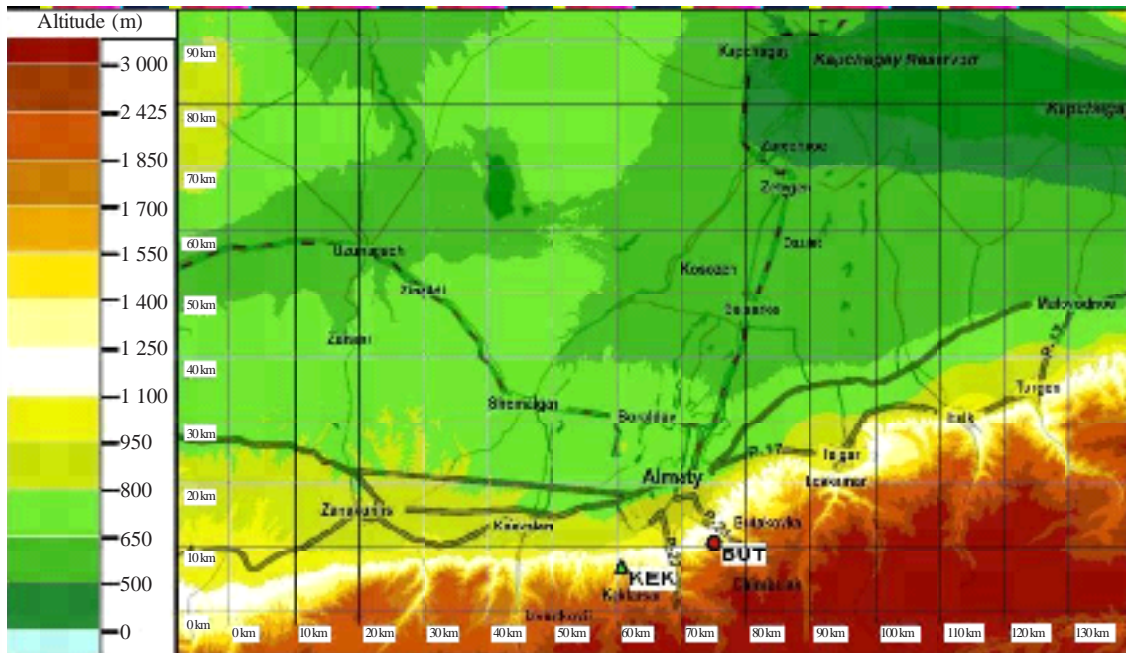
Lorsqu'on cherche à augmenter la hauteur équivalente de l'antenne d'une station, il ne faut pas oublier que la station a besoin d'une infrastructure appropriée pour pouvoir fonctionner, notamment d'une alimentation électrique et d'une route d'accès, infrastructure qui est nécessaire y compris dans le cas d'une station automatique sans personnel, pour pouvoir assurer la maintenance, etc.

Dans la pratique, les emplacements des stations et de leurs antennes dans les zones montagneuses doivent donc être choisis en deçà de la limite supérieure de la zone habitable dans laquelle une telle infrastructure existe déjà.

On prend le cas de deux stations fixes virtuelles avec des antennes situées dans les contreforts au sud d'Almaty (République du Kazakhstan) [3]. Cette situation est représentée dans la Fig. A2-1, qui montre la topographie de la zone en question. L'antenne de l'une des stations (KEK) est placée à une altitude de 1 506 m et l'autre (BUT) à 1 568 m. La hauteur physique des mâts d'antenne est supposée être de 10 m, étant donné que, dans cette situation, la hauteur physique d'une antenne n'influe quasiment pas sur sa hauteur équivalente telle qu'elle est déterminée conformément à la procédure décrite dans la Recommandation UIT-R P.1546-4. Une hauteur plus basse du mât d'antenne n'est pas recommandée pour des raisons de sécurité. Les emplacements des antennes ont été choisis avec soin afin de maximaliser la couverture pour le contrôle des émissions (voir ci-après).

La Figure A2-2 montre le gabarit de couverture pour la localisation (LCT) correspondant aux deux stations.

FIGURE A2-1
Emplacements des stations virtuelles et topographie de la région considérée



Rapport SM.2356-A2-01

Il ressort clairement de la Fig. A2-2 qu'avec un tel emplacement des antennes des stations, il est possible d'effectuer un contrôle des émissions sur de très grandes distances dans la plaine adjacente à la chaîne de montagnes, en particulier vers le nord et l'ouest d'Almaty (jusqu'à 70 km voire plus loin), et que, par ailleurs, la partie au sud d'Almaty est couverte avec une incertitude de localisation comprise entre 200 et 400 m, et la partie au nord avec une incertitude de localisation comprise entre 400 et 600 m, ce qui permet d'accélérer considérablement le processus de radiorallèlement d'un émetteur (ou de toute autre source d'émissions) au moyen d'une station mobile, lorsque c'est nécessaire. En revanche, près du contour du gabarit LCT à une distance d'environ 60 à 70 km d'Almaty, les valeurs de l'incertitude de localisation sont très élevées (environ 12 à 14 km). Dans cet exemple, la valeur de l'incertitude de localisation varie donc d'un facteur 70 à l'intérieur du gabarit LCT. Il convient d'en tenir compte lors des activités de radiorallèlement.

La Figure A2-2 montre qu'un emplacement des antennes des stations à une certaine altitude est très efficace et permet de couvrir des zones très vastes au moyen d'un petit nombre de stations fixes. Mais il faut choisir ces emplacements avec beaucoup de soin. En effet, alors qu'en plaine, le fait de déplacer les antennes de quelques centaines de mètres, voire de quelques kilomètres, a peu d'incidence sur les zones de couverture globales d'un groupe de stations de contrôle du réseau SMN, en montagne, le fait de déplacer les antennes ne serait-ce que de quelques dizaines de mètres peut réduire considérablement les zones de couverture des stations de contrôle concernées, et peut aussi réduire la zone de couverture globale pour la localisation si le réseau SMN compte peu de stations fixes. La Figure A2-3 montre le gabarit LCT obtenu lorsque la station BUT n'est déplacée que de 100 m vers le sud (emplacement B2). Lorsqu'on compare cette figure à la Fig. A2-2, les conséquences négatives d'un tel déplacement sont claires.

C'est la raison pour laquelle, une fois que la modélisation informatique du réseau de contrôle dans une zone montagneuse a été effectuée, il est essentiel d'étudier avec soin les emplacements potentiels,

en particulier de bien inspecter visuellement la zone (au moyen de jumelles) afin de repérer les éventuels obstacles à la propagation des ondes radioélectriques dans la direction du territoire à contrôler.

A2-3 Réduction de la probabilité des effets dus aux réflexions

Un autre facteur, très caractéristique des zones montagneuses, est le phénomène des réflexions par les montagnes voisines [4]. Ce phénomène requiert une attention particulière lors du choix des emplacements pour les antennes des stations. Il convient de choisir des emplacements situés sur des arêtes de montagne donnant sur le territoire contrôlé, ce qui réduira la probabilité que des réflexions soient causées par les chaînes voisines de même hauteur ou plus hautes. Les effets dus aux réflexions par les montagnes plus basses sont un peu moins probables.

La Figure A2-4 montre un exemple d'application de cette approche concernant les emplacements choisis pour les antennes des stations KEK et BUT. Si en revanche, pour une antenne de station, on choisit un emplacement en retrait entre des arêtes de même hauteur ou plus hautes, comme dans le cas de la station N dans la Fig. A2-4, la probabilité de brouillage dû aux réflexions est nettement supérieure. La Figure A2-4 montre que la probabilité que l'antenne de la station N reçoive des signaux réfléchis en provenance de l'émetteur T_r est élevée.

FIGURE A2-2

Couverture pour la radiogoniométrie et la localisation avec des emplacements appropriés pour les stations KEK et BUT

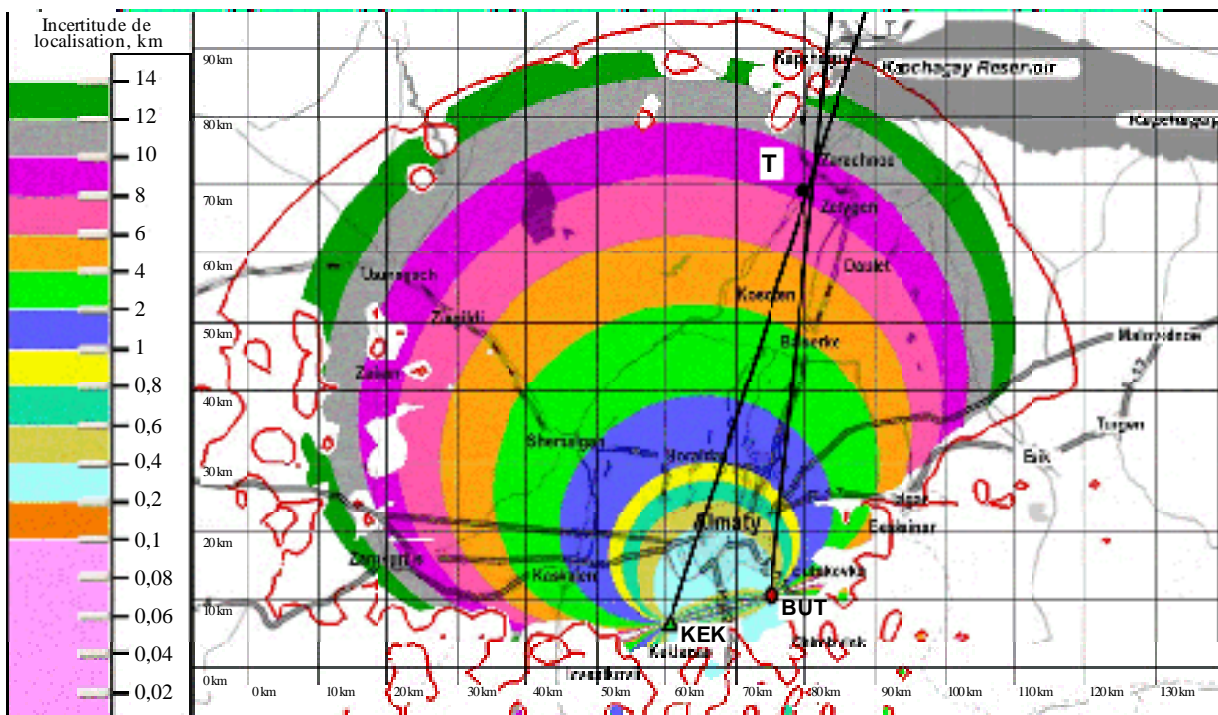
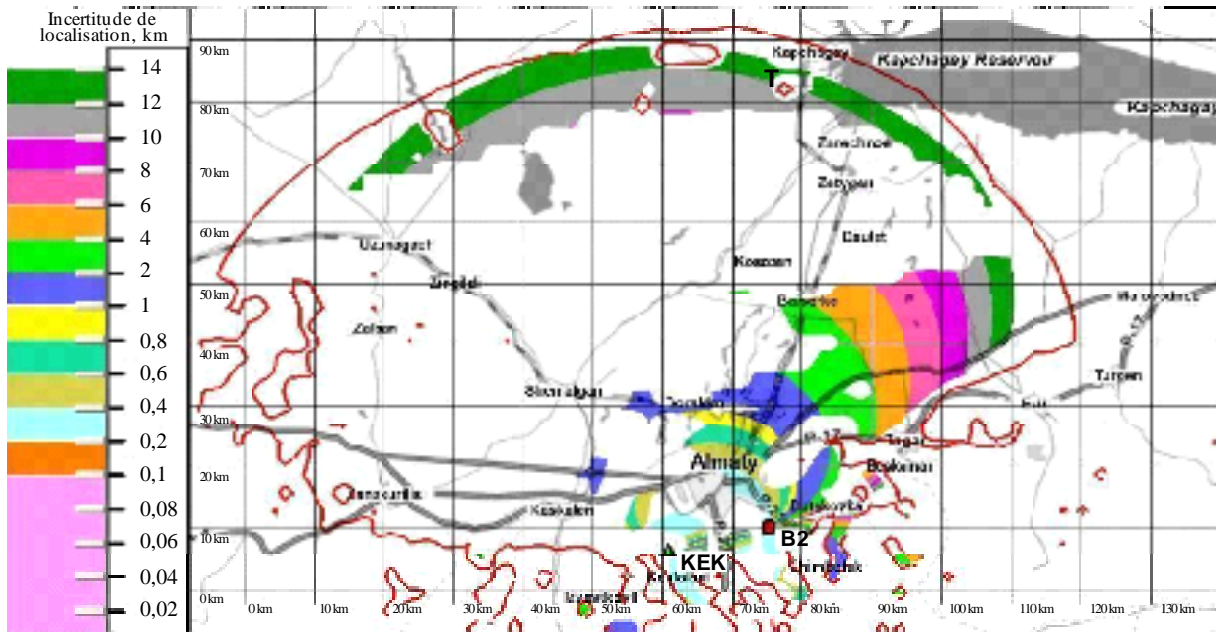
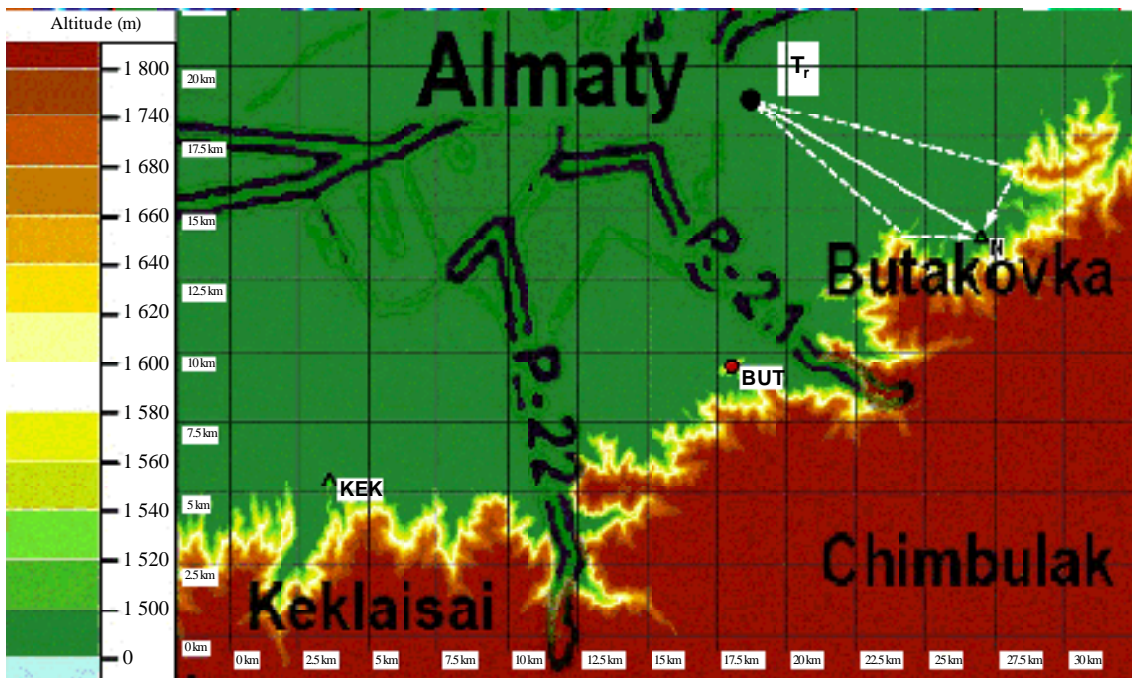


FIGURE A2-3
 Couverture pour la radiogoniométrie et la localisation avec un emplacement inapproprié pour la station BUT



Rapport SM.2356-A2-03

FIGURE A2-4
 Emplacements des stations pour réduire la probabilité des effets dus aux réflexions



Rapport SM.2356-A2-04

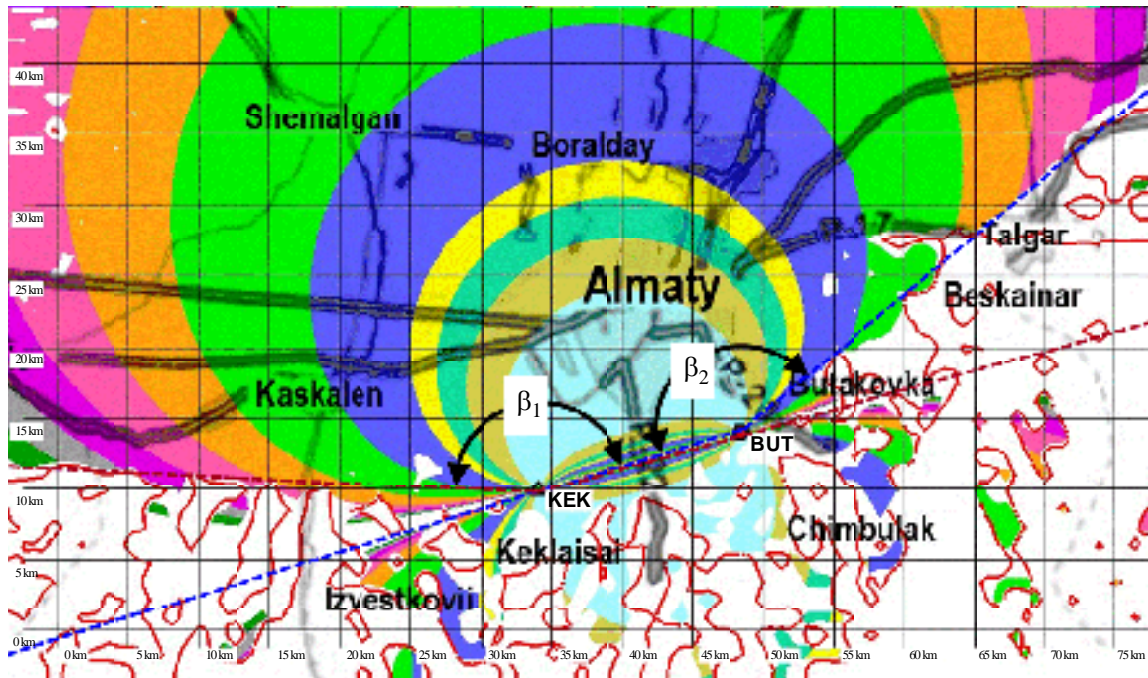
Afin d'éviter les effets dus aux réflexions par les hautes montagnes situées plus loin de la station concernée (par rapport au territoire contrôlé) ou de part et d'autre de la station, on peut utiliser des logiciels appropriés pour bloquer tous les faux relèvements résultant de telles réflexions [4]. Dans le cas considéré ici, comme indiqué dans la Fig. A2-5, on peut bloquer, au niveau des stations KEK

et BUT, les relèvements correspondant à des angles situés respectivement en dehors des secteurs β_1 et β_2 .

Ces territoires comptent très peu de villes ou de villages de haute montagne dans lesquels se trouvent des émetteurs radio susceptibles de devoir être contrôlés et, dans ce type de zones, il n'y a pour ainsi dire aucun contrôle des émissions avec des stations fixes.

FIGURE A2-5

Blocage des faux relèvements générés par les réflexions dues aux montagnes



Rapport SM.2356-A2-05

A une grande distance du groupe de stations de contrôle fixes, les valeurs de l'incertitude de localisation peuvent être très élevées. Mais l'emplacement d'un émetteur recherché peut malgré tout être déterminé à l'aide d'une station mobile dans ce type de zones ainsi que dans les zones à l'extérieur du gabarit LCT, dans lesquelles la radiogoniométrie est assurée par une seule station de contrôle fixe, s'il existe une interaction efficace entre ces stations de contrôle mobiles et fixes, comme décrit dans la référence [5].

A2-4 Remarques finales

On peut tirer parti efficacement d'une topographie montagneuse pour étendre la zone de couverture d'un petit nombre de stations de contrôle fixes dans toute la zone de plaine jouxtant une chaîne de montagne. Toutefois, dans une telle situation, il est particulièrement important de choisir des emplacements appropriés pour les antennes et d'étudier avec soin les sites afin de garantir une visibilité directe ininterrompue dans la direction de la zone contrôlée. Des mesures sont en outre nécessaires pour réduire les effets dus aux réflexions par les montagnes voisines situées derrière une station donnée par rapport au territoire contrôlé.

Annexe 3

Performance du récepteur et incidence associée sur la couverture du réseau

A3-1 Incidence de la performance du récepteur sur l'espacement des stations dans le réseau de géolocalisation

Pour une station de contrôle du spectre, la sensibilité du système est définie par de nombreux paramètres de conception différents, dont le gain d'antenne, la largeur de bande instantanée du récepteur (IBW), le facteur de bruit du récepteur, la dynamique instantanée du récepteur et le bruit de phase du récepteur.

Les spécifications de la performance du récepteur de contrôle influenceront directement sur l'espacement prévu entre les nœuds du réseau régulier primaire et, par conséquent, sur la zone de couverture. Plus les récepteurs sont performants, plus les stations de contrôle peuvent être espacées, permettant ainsi de réduire le nombre de stations nécessaires pour couvrir un territoire donné. Ces principes s'appliquent aux réseaux AOA, TDOA et hybrides. Dans ce qui suit, nous désignons par $NF_{receiver}$ le facteur de bruit équivalent du récepteur, à savoir le facteur de bruit réel du récepteur auquel on associe les effets liés à la dynamique instantanée et au bruit de phase du récepteur. Le facteur de bruit type pour un récepteur moderne est de 12 dB.

A3-2 Dynamique instantanée

La largeur de bande des signaux modernes ne cesse d'augmenter, atteignant 20 MHz voire plus. Pour pouvoir analyser efficacement ces signaux, les systèmes SMS modernes utilisent des récepteurs large bande. L'augmentation de la largeur de bande des récepteurs entraîne un effet secondaire imprévu, à savoir une augmentation de la probabilité d'avoir à la fois des signaux de forte intensité et de faible intensité dans la largeur de bande des récepteurs. La probabilité qu'un système de contrôle soit installé à proximité de signaux de forte intensité est un vrai problème qui découle du fait que la densité des émetteurs ne cesse de croître.

Pour pouvoir recevoir un signal de faible intensité en présence de signaux de forte intensité, le récepteur large bande doit avoir une grande dynamique dans la bande, faute de quoi il ne pourra pas détecter les signaux de faible intensité⁴. L'effet d'une dynamique insuffisante est que les signaux de faible intensité ne peuvent pas être détectés, ce qui équivaut à une augmentation du facteur de bruit *équivalent* du récepteur. Il est à noter qu'on peut réduire les effets des signaux voisins de forte intensité en utilisant des récepteurs ayant deux largeurs de bande, une grande et une petite, la petite largeur de bande (en général 1/10ème de la grande largeur de bande) étant utilisée en présence de signaux voisins de très forte intensité.

A3-3 Bruit de phase

L'oscillateur local d'un récepteur est conçu pour produire un signal de mélange aussi pur que possible, mais dans la pratique, la pureté qu'il est possible d'obtenir varie largement en fonction de la conception. La pureté est mesurée en dB au-dessous de la porteuse (dBc) pour plusieurs décalages de fréquence. Le problème est que le bruit de phase de l'oscillateur local peut, par suite d'un mélange réciproque dans le récepteur, masquer les signaux de faible intensité en présence de signaux de forte intensité. L'effet du mélange réciproque équivaut à nouveau à une augmentation du facteur de bruit *équivalent* du récepteur. Afin de réduire autant que possible les effets du mélange réciproque, le bruit

⁴ Les mesures telles que l'utilisation de filtres coupe-bande pour réduire les signaux de forte intensité ne sont pas prises en considération dans cette analyse.

de phase du récepteur doit être faible. Le bruit de phase d'un récepteur moderne devrait être supérieur à -100 dBc/Hz pour un décalage de 10 kHz.

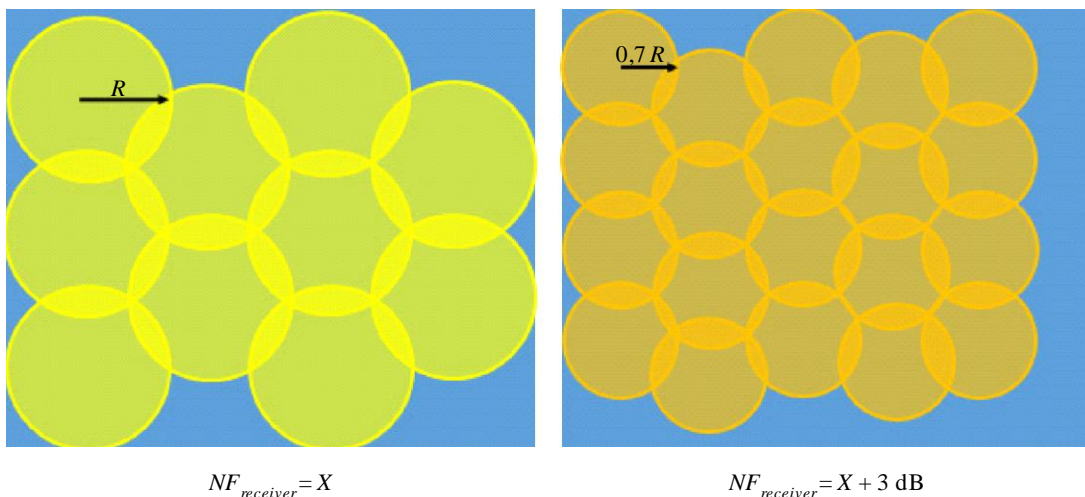
A3-4 Effets sur la zone de couverture

La Figure A3-1 illustre la relation entre le facteur de bruit équivalent du récepteur et le nombre total de stations nécessaires pour assurer la couverture complète d'une zone théorique donnée. La Figure de gauche montre un réseau de stations avec $NF_{receiver} = X$, auquel cas on a un rayon de couverture R et une zone de couverture CA . Dans ce cas, la zone considérée peut être couverte par environ neuf stations.

La Figure de droite illustre le cas d'un récepteur dont le facteur de bruit équivalent est supérieur de 3 dB: $NF_{receiver} = X + 3$ dB. Dans ce cas, le rayon de couverture est ramené à $0,7 R$ et la zone de couverture est ramenée à $\frac{1}{2} CA$.

FIGURE A3-1

Exemple de relation entre le facteur de bruit équivalent du récepteur et le nombre total de stations nécessaires pour assurer la couverture complète d'une zone théorique donnée



Rapport SM.2356-A3-01

D'après ce modèle d'analyse simple, chaque fois que le facteur de bruit équivalent du récepteur augmente de 3 dB, il faut environ deux fois plus de stations de contrôle.

Il convient de noter que tout ce raisonnement n'est valable que pour la propagation en espace libre. Dans la pratique, cette situation pourrait être pire: dans les zones suburbaines et urbaines, la formule idéale $20 \log(d)$ devient 40 ou $50 \log(d)$ – ainsi, chaque fois que le facteur de bruit augmente de 3 dB, il faut un nombre encore plus grand de récepteurs pour assurer la couverture complète.

On trouvera davantage d'informations concernant les récepteurs de contrôle au § 3.3 du Manuel de l'UIT-R sur le contrôle du spectre (édition de 2011).

A3-5 Conclusion

Il est important d'utiliser un récepteur dont les performances sont égales ou supérieures aux spécifications figurant dans les Recommandations en vigueur de l'UIT. D'après le modèle d'analyse le plus simple, chaque fois que le facteur de bruit équivalent du récepteur augmente de 3 dB, il faut au moins deux fois plus de stations de contrôle.

Références

- [1] Krutova, O.E., Pavlyuk, A.P., *Planning procedures for spectrum monitoring networks in the VHF/UHF frequency range* – Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2012. Rome, Italie, septembre 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6396919>
 - [2] Bykhovsky, M.A., (ed.). *Osnovy upravleniya ispolzovaniem radiochastotnogo spectra, Tom 1: Mezhdunarodnaya i natsionalnaya sistemy upravleniya PChS. Radiokontrol i radionadzor.* (Basic principles of managing radio spectrum use, Vol. 1: International and national systems of spectrum use. Monitoring and inspection. M. URSS. 2012). (en russe).
 - [3] Nurshabekov, R.R., Aitmagabetov, A.Z., *Ispolzovanie gornogo relefa mestnosti dlya rasshireniya zon okhvata monitoringom v OVCh/UVCh polose chastot*, Vestnik KazATK, Vyp. No. 1, 2013. (Use of a location's mountainous topography to extend monitoring coverage in the VHF/UHF band, in Bulletin KazATK, No. 1, 2013.) (en russe; une traduction en anglais est disponible à l'adresse: http://csse.faculty.iitu.kz/?page_id=261).
 - [4] Nurmatov, B.N., *Osobennosti radiopelengatsii v usloviyakh Kyrgyzskoy Respubliki.* VI Mezhdunarodny simpozium po elektromagnitnoy sovmestimosti i elektromagnitoy ekologii, Sankt Petersburg, Russia, 21-24 June 2005. (Special characteristics of radio direction finding in the conditions prevailing in the Kyrgyz Republic. VI International Symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint Pétersbourg, Russie, 21-24 juin 2005.)
 - [5] Nurshabekov, R.R., Aitmagabetov, A.Z., *Dopoisk radioperedatchikov s pomoshchyu podvizhnykh stantsiy monitoringa*, Vestnik KazATK, Vyp. No. 1, 2013. (Homing of radio transmitters using mobile monitoring stations, in Vestnik KazATK, No. 1, 2013.) (en russe; une traduction en anglais est disponible à l'adresse: http://csse.faculty.iitu.kz/?page_id=261).
 - [6] Parsons, J.D., *The Mobile Radio Propagation Channel Second Edition*, Chichester: Wiley, Print. 2000. Chapter 4, Propagation in Built-up Areas.
-