

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2211-2
(06/2018)

Comparaison de la méthode de géolocalisation de signal fondée sur la différence entre les instants d'arrivée par rapport à celle fondée sur l'angle d'arrivée

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 œuvre 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	Systèmes 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.2211-2

Comparaison de la méthode de géolocalisation de signal fondée sur la différence entre les instants d'arrivée par rapport à celle fondée sur l'angle d'arrivée

(2011-2014-2018)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	1
2 Présentation de la technologie TDOA	2
3 Points forts et points faibles de la méthode TDOA par rapport à la méthode AOA classique.....	2
4 Systèmes hybrides	8
5 Résumé	8
6 Références	9
Annexe 1 – Facteurs ayant une incidence sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation pour les stations de contrôle.....	9
Annexe 2 – Etude de simulation de la précision et de la zone de couverture de la géolocalisation pour des stations de contrôle hybrides AOA/TDOA	24
Annexe 3 – Etude expérimentale de l'utilisation d'un système TDOA avec un système AOA existant	34

1 Introduction

Le présent Rapport explicite les points forts et les points faibles de la méthode de géolocalisation de signal fondée sur la différence entre les instants d'arrivée (TDOA, *time-difference-of-arrival*) par rapport à celle fondée sur l'angle d'arrivée (AOA, *angle-of-arrival*). Le présent Rapport est consacré à la technique TDOA, mais il convient de noter qu'il existe d'autres techniques de géolocalisation¹. La méthode AOA, qui consiste à déterminer l'angle d'arrivée d'une onde en un point de mesure, est couramment utilisée dans de nombreuses applications de radiogoniométrie, et présente certains avantages mais aussi certains inconvénients, concernant les caractéristiques des antennes par exemple. La méthode TDOA consiste quant à elle à calculer la différence entre les instants d'arrivée d'une onde en plusieurs points de mesure, et à calculer le point source sur la base de comparaisons de caractéristiques temporelles et de caractéristiques de l'onde. Peu utilisée pour le contrôle du spectre,

¹ La méthode de la puissance d'arrivée (POA, *power of arrival*) utilise la mesure du rapport de puissance d'un signal en plusieurs points de mesure pour calculer le point source. Elle est souvent utilisée pour la géolocalisation en intérieur. La méthode de la différence de fréquence à l'arrivée (FDOA, *frequency-difference-of-arrival*) utilise le décalage de fréquence Doppler d'une source en mouvement (et/ou plusieurs récepteurs) pour calculer le point source. Elle est souvent utilisée en association avec la méthode TDOA pour les applications à bord d'aéronefs.

la méthode TDOA s'avère de plus en plus utile en raison de la disponibilité de calculateurs puissants qui sont compacts et peu onéreux, de récepteurs radio évolués, de liaisons de données accessibles facilement et d'un signal de rythme distribué qui est précis. Le présent document décrit brièvement la technologie TDOA puis donne les points forts et les points faibles de la méthode TDOA par rapport à la méthode AOA plus classique.

2 Présentation de la technologie TDOA

La technique TDOA consiste à mesurer l'instant d'arrivée d'un signal RF en plusieurs points de l'espace et à comparer la différence entre les instants mesurés à chaque récepteur. La méthode classique utilisée pour estimer la différence TDOA consiste à calculer la corrélation croisée d'un signal arrivant dans deux récepteurs. Cette estimation correspond au délai qui maximalise la fonction de corrélation croisée. Si on connaît l'emplacement de chaque récepteur, on peut alors en déduire une estimation de l'emplacement de la source des émissions sous réserve que tous les récepteurs soient synchronisés temporellement. L'équivalent de la ligne de relèvement (LoB, *line-of-bearing*) obtenue avec un système AOA est une hyperbole correspondant à une différence constante entre les instants d'arrivée, appelée isochrone ou ligne de position (LoP, *line-of-position*). On trouvera plus de détails sur la méthode TDOA dans le Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre, Edition 2011, au § 4.7.3.2.

La méthode TDOA a été utilisée à des fins de radiolocalisation dans certaines applications de défense et, plus récemment, dans certaines applications spécifiques comme la localisation de téléphones cellulaires mobiles pour des interventions urgentes (incendie, ambulance, etc.). Dans le passé, le principal obstacle à la généralisation de son utilisation pour des applications civiles était la nécessité de disposer d'une synchronisation temporelle de l'ordre de la nanoseconde. Etant donné que les rayonnements électromagnétiques se propagent à une vitesse d'environ 30 cm/ns, toute gigue de rythme importante entre les récepteurs aura une incidence directe sur la dilution de la précision de la localisation. Aujourd'hui, avec les systèmes de navigation par satellite (GPS, Galileo et GLONASS), on dispose de moyens accessibles et peu onéreux pour assurer la synchronisation temporelle. En conséquence, plusieurs fournisseurs de différents pays à travers le monde proposent désormais des systèmes reposant sur la méthode TDOA.

3 Points forts et points faibles de la méthode TDOA par rapport à la méthode AOA classique

Afin de mieux comprendre la méthode TDOA, nous présentons une brève analyse comparative de ses points forts et de ses points faibles par rapport à la méthode AOA. Il est à noter que les méthodes TDOA et AOA sont des techniques complémentaires pour la géolocalisation. Un système de géolocalisation qui combine les deux peut donner de meilleurs résultats que chacune d'elles utilisée seule [1]. Par ailleurs, le fait de disposer d'une deuxième méthode permettant de confirmer la géolocalisation peut être essentiel pour les mesures coercitives liées à l'utilisation du spectre.

Pour simplifier notre propos, nous supposons que le système TDOA utilise une détection fondée sur une corrélation croisée, et que les récepteurs de mesure transmettent les signaux échantillonnés à un serveur central en vue de déterminer les différences TDOA. Pour la plupart des applications de contrôle du spectre, cette méthode est celle qui est préférée à la fois pour ses performances en matière de localisation et pour sa souplesse. Pour simplifier encore notre propos, nous comparons le système TDOA à un système AOA utilisant un interféromètre corrélatif. L'interférométrie corrélatrice est une technique AOA largement mise en oeuvre pour le contrôle des nouveaux signaux. On trouvera une présentation de l'interféromètre corrélatif au § 4.7.2.2.5 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre, Edition 2011.

(NOTE 1 – Les numéros de paragraphe cités dans les Tableaux 3-1 et 3-2 renvoient au Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre, Edition 2011. Les numéros entre crochets figurant dans les Tableaux renvoient aux documents de référence énumérés au § 6 Références.)

TABLEAU 3-1

Points forts de la méthode TDOA

Caractéristiques d'antenne plus simples	<p>L'antenne est peu onéreuse et peu complexe, et peut avoir de petites dimensions.</p> <p>Les récepteurs TDOA peuvent employer une seule antenne simple (par exemple une antenne unipolaire ou une antenne doublet). Contrairement aux systèmes AOA, il n'est pas nécessaire que l'antenne présente des tolérances mécaniques et une précision électrique élevées, ni qu'elle fasse l'objet de tests opérationnels et de mesures pour l'étalonnage. Un autre avantage est que l'antenne peut être de petites dimensions et discrète, ce qui est important lorsqu'il s'agit de déployer des systèmes de contrôle dans des sites historiques ou restreints du point de vue architectural ou lorsqu'il s'agit de négocier des accords d'emplacement avec des tierces parties.</p>
Critères plus simples pour l'emplacement et l'étalonnage	<p>Les critères d'emplacement sont moins restrictifs que pour un système AOA et un système TDOA nécessite peu voire pas d'étalonnage.</p> <p>On dispose ainsi d'une plus grande marge de manoeuvre pour choisir les emplacements des récepteurs TDOA, lesquels sont donc plus rapides à mettre en place. En zone urbaine, des récepteurs TDOA supplémentaires peuvent être utilisés pour pallier aux effets d'écran dus aux structures hautes.</p> <p>En revanche, les emplacements des récepteurs AOA doivent être choisis de manière à ce que la distorsion du front d'onde résultant de la ré-émanation due aux obstacles locaux, aux réflexions sur le sol et aux modifications de la conductivité du sol soit minimale. Certains réseaux d'antennes AOA doivent être étalonnés après leur installation afin de minimaliser les erreurs en fonction de la fréquence et de la direction. L'étalonnage des réseaux d'antennes est l'un des facteurs les plus importants qui limitent les performances dans le cas de la méthode AOA [2]. Pour plus de détails sur le choix des emplacements des récepteurs AOA, on se reportera aux §§ 4.7.2.3.1.2 et 2.6.1.3.</p>

TABLEAU 3-1 (suite)

<p>Signaux large bande, signaux à faible rapport signal/bruit, et signaux de courte durée</p>	<p>La méthode TDOA donne de bons résultats pour les nouveaux signaux à modulation complexe, large bande ou de courte durée.</p> <p>La méthode AOA donne tout particulièrement de bons résultats pour les signaux à bande étroite, mais on peut appliquer des méthodes AOA évoluées pour localiser des signaux large bande, complexes ou de courte durée.</p> <p>Les performances de la méthode TDOA dépendent fortement de la largeur de bande du signal. Celles de la méthode AOA sont grosso modo indépendantes de la largeur de bande du signal sous réserve que l'espacement des canaux FFT soit analogue à la largeur de bande du signal. D'une manière générale, la méthode TDOA donne des résultats d'autant meilleurs que la largeur de bande du signal est plus grande.</p> <p>Plus le rapport signal/bruit des signaux est élevé et plus les durées d'intégration sont longues, meilleures sont les performances des deux méthodes TDOA et AOA. Le gain de traitement lié à la corrélation permet aux systèmes TDOA de détecter et de localiser des signaux pour lesquels le rapport signal/bruit est faible (voire négatif). De plus, le gain de traitement lié à la corrélation permet à des récepteurs TDOA supplémentaires de participer à une géolocalisation même s'ils reçoivent un signal pour lequel le rapport signal/bruit est très faible ou négatif. Les systèmes AOA de base ne peuvent pas détecter et localiser des signaux pour lesquels le rapport signal/bruit est négatif, et peuvent avoir des difficultés à localiser des signaux pour lesquels le rapport signal/bruit est faible. Des systèmes AOA évolués, par exemple avec résolution avancée ou avec corrélation fondée sur des données (radiogoniométrie de référence), peuvent traiter ces signaux.</p> <p>Les systèmes AOA de base ne tirent pas parti du gain de traitement lié à la corrélation des signaux, mais ils tirent parti dans une certaine mesure du gain système lié à l'utilisation de plusieurs éléments d'antenne et canaux de réception.</p> <p>Pour la géolocalisation de signaux de courte durée, il faut des récepteurs coordonnés, synchronisés temporellement sur une fraction de l'inverse de la largeur de bande du signal. Cette capacité est fondamentale pour les systèmes TDOA. De plus, les systèmes TDOA peuvent effectuer une géolocalisation en utilisant des mesures de très courte durée sur des signaux de durée plus longue. Si on permute les éléments d'antenne AOA, la durée d'intégration nécessaire sera plus faible.</p>
<p>Complexité du système</p>	<p>Les récepteurs et les antennes des systèmes TDOA sont moins complexes que les réseaux d'antennes et les récepteurs bi- ou multicanaux des systèmes AOA types.</p> <p>Un récepteur TDOA a besoin d'au moins un canal RF en temps réel pour éviter toute interruption dans le traitement et faire en sorte que la probabilité d'interception de signal soit la plus élevée possible⁽¹⁾. Un récepteur de faible complexité peut alors suffire dans les environnements radioélectriques simples. Des techniques de traitement TDOA avancées sont nécessaires lorsqu'on utilise un récepteur simple dans des environnements radioélectriques complexes. Des méthodes efficaces de synchronisation temporelle (GPS) et des interfaces de liaison de données sont disponibles facilement.</p>
<p>Rejet du bruit et du brouillage non corrélé</p>	<p>Le traitement par corrélation utilisé dans la méthode TDOA permet de supprimer les signaux de bruit et de brouillage cocanal simultanés qui ne sont pas corrélés entre les sites. Ainsi, le système peut géolocaliser des signaux pour lesquels le rapport signal/brouillage + bruit est faible.</p> <p>Des mesures coordonnées dans le temps sont réalisées à tous les récepteurs. Les signaux qui ne sont pas communs à deux récepteurs ou plus sont supprimés. Avec un traitement évolué, un système TDOA peut effectuer une géolocalisation en utilisant uniquement les corrélations avec la meilleure observation du signal émis. L'application de techniques de corrélation croisée pour l'analyse du brouillage est décrite au § 4.8.5.5.</p> <p>Des systèmes AOA évolués peuvent réduire les effets du brouillage cocanal simultané non corrélé en opérant une corrélation avec des signaux de référence. Si d'autres techniques de traitement évoluées telles que MUSIC sont efficaces contre le bruit et le brouillage non corrélés, elles nécessitent en revanche de nombreux calculs et sont peu utilisées pour le contrôle du spectre.</p>

TABLEAU 3-1 (suite)

<p>Géolocalisation en intérieur, dans un stade et sur un campus</p>	<p>Un système TDOA doté de techniques de traitement évoluées peut être utilisé pour géolocaliser des signaux large bande en intérieur ou en extérieur dans des zones peu étendues (< 100 m de côté) et où les trajets multiples sont nombreux [4].</p> <p>Les systèmes AOA ne donnent généralement pas de bons résultats dans ces conditions. Il est possible de remédier au problème de la précision de la synchronisation temporelle en intérieur en utilisant des commutateurs Ethernet compatibles IEEE-1588 et des récepteurs TDOA. Il est à noter qu'une autre technique de géolocalisation utilisant la puissance d'arrivée (POA, <i>power of arrival</i>) donne généralement de meilleurs résultats que la méthode TDOA dans les zones peu étendues et où les trajets multiples sont nombreux, en particulier pour les signaux à bande étroite.</p>
<p>Réduction du brouillage cocanal cohérent (trajets multiples) dans certaines conditions</p>	<p>Les trajets multiples, également appelés brouillage cocanal cohérent, ont une incidence aussi bien sur la méthode TDOA que sur la méthode AOA. Cette incidence est différente selon la position du capteur par rapport aux réflexions par trajets multiples.</p> <p>Avec une largeur de bande de signal suffisante, la méthode TDOA est moins sensible à la distorsion du front d'onde due aux obstacles locaux (trajets multiples locaux). Dans la méthode TDOA, un traitement du signal évolué peut être nécessaire pour résoudre les ambiguïtés de localisation dues à des obstacles distants (trajets multiples distants). Le traitement évolué peut en outre filtrer les paires de corrélation utilisées dans la géolocalisation TDOA afin d'améliorer les résultats en présence de nombreux trajets multiples. Avec un traitement TDOA évolué, on peut supprimer les trajets multiples résolus dans le temps entre sites [5], d'où de bons résultats en zone urbaine dense⁽²⁾.</p>
<p>Géométrie</p>	<p>Pour les deux méthodes TDOA et AOA, la plus grande précision est obtenue lorsque la source du signal est centrée à l'intérieur d'un périmètre passant par les sites de mesure.</p> <p>Pour la méthode TDOA, la précision de la géolocalisation est déterminée par la dilution géométrique de la précision (GDOP, <i>geometric dilution of precision</i>), la qualité de la synchronisation temporelle et la qualité de l'estimation de la différence TDOA. L'incertitude relative à l'emplacement n'est pas liée directement à la longueur de la ligne de base entre les récepteurs TDOA [6], ce qui peut présenter des avantages dans certaines conditions.</p> <p>En revanche, la précision de la méthode AOA est liée directement à la distance entre la source et chaque récepteur AOA. Dans la méthode AOA, l'incertitude relative à l'emplacement est fonction de l'incertitude relative à l'angle de relèvement et de la distance entre le récepteur et l'emplacement estimé. Lorsque la source est située loin en dehors du périmètre, la méthode TDOA donne une ligne de position approximative de manière analogue à la ligne de relèvement obtenue dans le cas de la méthode AOA. Dans cette situation, l'incertitude relative à l'emplacement et au relèvement augmente de façon analogue en fonction de la distance pour les deux méthodes.</p>
<p>Méthode bien adaptée pour une utilisation dans des réseaux de capteurs RF</p>	<p>Pour les deux méthodes TDOA et AOA, un plus grand nombre de récepteurs donne de meilleurs résultats grâce au gain de proximité et à des statistiques améliorées.</p> <p>La méthode TDOA est bien adaptée aux déploiements de multiples récepteurs car les récepteurs sont peu complexes, de petites dimensions et utilisent une puissance faible, les antennes sont simples, et les critères pour le choix des emplacements sont simples également. Une plus forte densité de stations de contrôle distantes, appelées capteurs RF ci-dessus, permet d'avoir un récepteur de contrôle plus proche du signal auquel on s'intéresse. La réduction résultante de l'affaiblissement sur le trajet, parfois appelée «gain de proximité», permet d'améliorer les résultats de la détection et de la géolocalisation [7].</p> <p>De plus, le gain de traitement lié à la corrélation obtenu dans les systèmes TDOA permet à des capteurs supplémentaires de participer à une géolocalisation même s'ils reçoivent un signal pour lequel le rapport signal/bruit est très faible ou négatif.</p>

TABLEAU 3-1 (*fin*)

Possibilité d'analyse complète en différé dans un serveur central	<p>Les systèmes TDOA peuvent enregistrer et cataloguer les mesures de signal coordonnées dans le temps effectuées par tous les récepteurs, de sorte qu'il est possible de procéder à une analyse complète en différé dans un serveur central, à savoir une analyse spectrale du signal de chaque récepteur, des mesures de corrélation croisée et une géolocalisation.</p> <p>Les systèmes AOA peuvent aussi enregistrer et cataloguer certaines mesures de signal (par exemple les résultats de relèvement et la confiance associée) dans un serveur central. Ces mesures sont coordonnées dans le temps jusqu'à un certain point, qui est fonction de la synchronisation temporelle qu'il est possible d'obtenir dans le système AOA. Des mesures telles qu'une analyse spectrale et des corrélations croisées ne sont pas courantes car les débits de données nécessaires sur les liaisons de raccordement sont analogues à ceux qui sont nécessaires pour la méthode TDOA.</p>
--	--

- (1) En général, les systèmes utilisant l'interférométrie corrélative emploient le multiplexage temporel pour réduire le nombre de récepteurs nécessaires. Ces systèmes ont besoin de deux à trois récepteurs avec commutation entre les 5 ou 7 antennes ou plus. Ils sont moins complexes que des systèmes de radiogoniométrie entièrement parallèles mais il leur faut une durée minimale de signal plus longue pour la localisation.
- (2) La méthode TDOA a permis de géolocaliser des signaux à bande étroite (30 kHz) de téléphone cellulaire AMPS dans une zone urbaine dense avec une précision de l'ordre de quelques centaines de mètres RMS [5].

TABLEAU 3-2

Points faibles de la méthode TDOA

Signaux à bande étroite	<p>Avec les techniques TDOA, il peut être impossible ou difficile de localiser des signaux à variation lente, comme les porteuses non modulées ou les signaux à bande étroite.</p> <p>Les performances de la méthode TDOA dépendent fortement de la largeur de bande du signal et elles diminuent lorsque la largeur de bande du signal diminue. En outre, les trajets multiples sont susceptibles d'être plus problématiques pour les signaux à bande étroite lorsque ceux-ci présentent des caractéristiques temporelles larges par rapport à l'étalement des temps de propagation. Dans ces conditions, la distorsion de la forme d'impulsion due aux trajets multiples est difficile à distinguer, ce qui a pour effet d'ajouter une erreur à l'estimation de la différence TDOA. La largeur de bande minimale du signal pour des résultats acceptables variera en fonction de l'application. Par exemple, la méthode TDOA a permis de géolocaliser des signaux à bande étroite (30 kHz) de téléphone cellulaire AMPS dans une zone urbaine dense avec une précision de l'ordre de quelques centaines de mètres RMS [5]. Un rapport signal/bruit plus élevé et une durée d'observation plus longue permettent d'améliorer la localisation de certains signaux à bande étroite à l'aide de la méthode TDOA.</p> <p>Les systèmes AOA donnent de bons résultats pour les signaux à bande étroite ou non modulés ainsi que pour les signaux large bande.</p>
Impossibilité d'appliquer la méthode de radioralliment et la méthode à distance avec une seule station	<p>Au moins deux stations TDOA, l'une des deux au moins étant mobile, et une liaison de données sont nécessaires pour la méthode de radioralliment et la méthode à distance⁽¹⁾.</p> <p>Dans le cas des systèmes AOA, les méthodes de radioralliment et à distance peuvent être appliquées avec une seule station portable, ce qui permet d'opérer une géolocalisation dans les zones où il est impossible ou onéreux d'utiliser des récepteurs TDOA en réseau. Ces méthodes sont décrites au § 4.7.3.3.</p>
Liaisons de communication à plus haut débit	<p>Les systèmes TDOA qui transmettent des formes d'onde échantillonnées depuis les récepteurs vers un serveur central ont besoin de liaisons de communication à haut débit. Les besoins sont asymétriques, la largeur de bande nécessaire pour le téléversement étant supérieure à la largeur de bande nécessaire pour le téléchargement. Un traitement évolué, notamment une compression du signal, permet de réduire le volume de données transmises. Les systèmes TDOA pour lesquels l'instant d'arrivée est établi au récepteur auront besoin d'un débit moins élevé. On trouvera plus de détails sur les besoins des liaisons de données TDOA au § 4.7.3.2.4 «Considérations relatives au réseau».</p> <p>Les systèmes AOA ont besoin de débits moins élevés car seules certaines caractéristiques du signal telles que l'angle de relèvement, la fréquence et le temps, sont transmis à un site central.</p>

TABLEAU 3-2 (suite)

<p>Sensibilité aux sources de décorrélation des signaux</p>	<p>Un système TDOA doit veiller à réduire toutes les sources potentielles de décorrélation des signaux entre les récepteurs. Il s'agit notamment des décalages relatifs de fréquence de référence entre les récepteurs et des décalages relatifs de fréquence des signaux (décalage Doppler) dus à des sources en mouvement ou à l'environnement local. La durée d'intégration cohérente maximale sera limitée non seulement par la durée du signal, mais aussi par la stabilité de l'oscillateur de référence du récepteur et les variations du canal hertzien.</p> <p>Les systèmes TDOA de haute qualité comporteront des boucles de poursuite afin de maintenir la cohérence fréquentielle et temporelle. Une correction automatique de l'effet Doppler est essentielle pour compenser les effets de décorrélation dus aux sources avec décalage Doppler.</p> <p>Les systèmes AOA de base et certains systèmes AOA à résolution évoluée (utilisant MUSIC) ne sont pas sensibles à la décorrélation des signaux entre les sites de mesure. Les systèmes AOA évolués qui effectuent une corrélation avec des signaux de référence sont sensibles à la décorrélation des signaux.</p>
<p>Synchronisation temporelle plus précise</p>	<p>Les systèmes TDOA ont besoin d'une synchronisation temporelle de haute qualité par rapport à l'inverse de la largeur de bande du signal auquel on s'intéresse. La technologie actuelle (par exemple GPS) permet d'obtenir une synchronisation temporelle des récepteurs TDOA meilleure que 20 ns.</p> <p>Les systèmes AOA ont des exigences moins strictes en matière de synchronisation temporelle. Une synchronisation à quelques secondes près entre les récepteurs peut par exemple suffire. Dans la pratique, pour certains signaux tels que les signaux de courte durée ou les signaux à saut de fréquence, une meilleure synchronisation entre les stations AOA est nécessaire.</p>
<p>Signaux contenant des éléments périodiques</p>	<p>Bien que la probabilité soit faible, il est possible que, dans certaines conditions, les algorithmes TDOA génèrent des réponses incorrectes pour des signaux qui contiennent des éléments périodiques, par exemple des séquences de données qui se répètent ou des impulsions de synchronisation. On trouvera une description plus approfondie de ce problème et d'un moyen de le réduire significativement au § 4.7.3.2.3 «Facteurs ayant une incidence sur la précision».</p> <p>Etant donné que les systèmes AOA de base n'effectuent pas de corrélation croisée de signaux, ils ne sont pas sensibles à ce problème.</p>
<p>Vitesse de géolocalisation</p>	<p>D'une manière générale, les signaux échantillonnés sont transmis à un serveur pour effectuer la géolocalisation, d'où un besoin de capacité de réseau et de vitesse de transmission. Une liaison lente peut nettement retarder la géolocalisation.</p> <p>Les vitesses de géolocalisation types peuvent être de l'ordre d'une position par seconde au maximum pour les systèmes TDOA (dans le meilleur des cas) contre 100 positions par seconde pour les systèmes AOA. L'utilisation de liaisons de données ayant une bande plus large permet d'améliorer la vitesse de géolocalisation TDOA. Le recours à des durées d'observation plus courtes et/ou à des techniques de compression évoluées permet également de réduire la largeur de bande nécessaire pour les données. Une fois que les mesures ont été transmises à un serveur central, les géolocalisations TDOA sont beaucoup plus rapides car elles sont effectuées à partir de données enregistrées localement.</p>
<p>Méthode pas très bien adaptée pour la géolocalisation simultanée de nombreux émetteurs</p>	<p>Certains systèmes AOA prennent en charge la géolocalisation simultanée de nombreux signaux espacés en fréquence. On parle souvent de radiogoniométrie large bande. Cette prise en charge est possible sur les systèmes TDOA mais n'est pas adaptée, surtout en raison du volume beaucoup plus grand de données à transmettre.</p> <p>Le volume de données à transmettre peut être réduit pour les systèmes TDOA dans le cas fondé sur des données en effectuant une synchronisation des signaux (établissement de l'instant d'arrivée) à chaque récepteur.</p>
<p>Impossibilité de localisation par un seul site</p>	<p>Au moins 2 capteurs sont nécessaires pour générer une ligne de position (LoP, <i>line of position</i>), et au moins 3 capteurs sont nécessaires pour la géolocalisation en 2-D, et 4 pour la géolocalisation en 3-D.</p> <p>Avec la méthode AOA, la localisation par un seul site est possible.</p>

TABLEAU 3-2 (*fin*)

Géométrie	<p>Pour les deux méthodes TDOA et AOA, la plus grande précision (meilleure dilution géométrique de la précision) est obtenue lorsque la source du signal est située à l'intérieur d'un périmètre délimité par un groupe de stations de radiogoniométrie et/ou de capteurs en interaction.</p> <p>Immédiatement en dehors de ce périmètre, la précision de la localisation et l'efficacité diminuent plus rapidement dans le cas de la méthode TDOA que dans le cas de la méthode AOA (voir l'Annexe 1 et la référence [8]).</p> <p>Lorsque la source est située loin en dehors de ce périmètre, la méthode TDOA peut donner une ligne de position approximative de manière analogue à la ligne de relèvement obtenue dans le cas de la méthode AOA (voir l'Annexe 1 et la référence [8]). La méthode AOA permet de procéder à une géolocalisation (d'indiquer l'intersection de deux lignes de relèvement) à l'intérieur des zones dans lesquelles les zones de couverture de deux stations de radiogoniométrie se chevauchent.</p> <p>Pour plus d'informations sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation pour les réseaux TDOA et AOA, on se reportera à l'Annexe 1.</p>
Analyse en différé avec des mesures obtenues par un seul site	<p>Avec la méthode AOA, la ligne de relèvement peut être analysée en différé sur la base de mesures obtenues par un seul site. Les analyses en différé des lignes de position TDOA sont impossibles avec des mesures obtenues par un seul site.</p>

⁽¹⁾ Dans le cas des approches fondées sur la puissance d'arrivée (POA), la méthode de radorallèlement et la méthode à distance peuvent être appliquées avec une seule station portable.

4 Systèmes hybrides

La méthode TDOA peut être associée à une ou plusieurs autres technologies de géolocalisation pour produire un système dit hybride. Les technologies TDOA et AOA peuvent être associées dans une ou plusieurs stations, et on obtient alors des systèmes hybrides AOA/TDOA. La méthode TDOA peut aussi être associée à d'autres technologies de géolocalisation, telles que la technique du rapport d'amplitudes fondée sur la puissance d'arrivée (POA), auquel cas on obtient un système hybride TDOA/POA.

Les systèmes hybrides AOA/TDOA comportent au moins deux sites, dont l'un au moins possède la double capacité de mesure AOA et TDOA, et les autres sites disposent de la capacité de mesure TDOA. Les deux capteurs TDOA produisent une hyperbole représentant les valeurs TDOA comme décrit au § 4.7.3.2 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre, Edition 2011. Le système AOA produit une ligne de relèvement. L'intersection de la ligne de relèvement et de l'hyperbole TDOA détermine la position de l'émetteur. Ces systèmes sont décrits de manière plus détaillée dans l'Annexe 2 et l'Annexe 3.

5 Résumé

La méthode TDOA est une technique de géolocalisation complémentaire, peu utilisée pour le contrôle des émissions. Mais elle s'avère de plus en plus utile en raison de la disponibilité de calculateurs puissants qui sont compacts et peu onéreux, de récepteurs radio évolués, d'une connectivité ubiquitaire pour les données et d'une synchronisation temporelle répartie qui est précise. Elle présente certains points forts par rapport à la méthode AOA, en particulier en ce qui concerne la détection et la géolocalisation des nouveaux signaux large bande, des caractéristiques d'antenne plus simples, la capacité de traiter la propagation par trajets multiples proches en zone urbaine, et le fait qu'il s'agisse d'une méthode adaptée au déploiement de réseaux de capteurs peu onéreux. Elle présente aussi des points faibles par rapport à la méthode AOA, en particulier en ce qui concerne la localisation de signaux non modulés ou à bande étroite, des exigences généralement plus importantes concernant les liaisons de raccordement pour les données, et le fait qu'au moins deux récepteurs soient nécessaires pour obtenir une ligne de position et qu'au moins trois récepteurs soient nécessaires pour la

localisation en 2-D. En matière de contrôle des nouveaux signaux, la tendance est à l'augmentation des largeurs de bande des signaux et à la diminution des densités spectrales de puissance. L'utilisation de technologies de géolocalisation complémentaires telles que la technologie TDOA permet d'améliorer la probabilité de détection et de localisation des nouveaux signaux dans de nombreux environnements. Avec des systèmes hybrides AOA/TDOA, on pourra neutraliser certains points faibles de chacune des techniques tout en tirant parti des avantages de chacune. Les stations mobiles TDOA ne sont efficaces que si la méthode AOA est aussi utilisée (système hybride).

6 Références

- [1] BROUMANDAN, ALI *et al.* [2008] *Practical Results of hybrid AOA/TDOA Geolocation Estimation in CDMA Wireless Networks*. Calgary: s.n., 2008. IEEE 68th Vehicular Technology Conference. 978-1-4244-1722-3.
- [2] KRIZMAN, KEVIN J., BIEDKA, THOMAS E. and RAPPAPORT, THEODORE S. [1997] *Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies, and Sources of Error*. s.l.: IEEE, 1997. Vehicular Technology Conference. Vol. 2, p. 919-923.
- [3] SCHWOLEN-BACKES, ANDREAS. [2010] *A comparison of radiolocation using DOA respective TDOA*. Hamburg: Plath GmbH.
- [4] PATWARI, NEAL *et al.* [July 2005] Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. p. 54-69.
- [5] STILP, LOUIS A. [1997] TDOA technology for locating narrowband cellular signals: Cellphone location involves several practical and technical considerations. Time difference-of-arrival (TDOA) technology provides accuracy for locating analog cellphones in urban environments. *Urgent Communications*. [Online] 4 1.
http://mrtmag.com/mag/radio_tdoa_technology_locating/index.html.
- [6] TORRIERI, DON J. [1984] Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vols. AES-20, 2.
- [7] AGILENT TECHNOLOGIES [2009] *Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management, and Geolocation of Wireless Emitters*. Application Note. 5990-3861EN.
- [8] KOZMIN, Vladimir A., PAVLYUK, Alexander P. and TOKAREV, Anton B. [2014] Comparison of spectrum monitoring coverage features of AOA and TDOA geolocation methods – *Electrosviaz*, No. 2, 2014 (voir la version en anglais sur le site web: <http://www.ircos.ru/en/articles.html>).

Annexe 1

Facteurs ayant une incidence sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation pour les stations de contrôle

1 Introduction

Plusieurs considérations relatives au déploiement des stations de contrôle ont une incidence sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation associées à ces stations. L'efficacité globale d'une station de contrôle – indépendamment des caractéristiques de qualité de fonctionnement – dépendra des contraintes ou avantages liés au choix des équipements, à leur installation et au site.

Dans les déploiements réels, les systèmes de contrôle du spectre (SMS) comporteront certainement à la fois des stations AOA et TDOA déployées sous forme de plateformes fixes et mobiles. Le choix de la technologie de géolocalisation utilisée pour un site de contrôle repose sur un certain nombre de considérations et dépendra généralement:

- de l'accès du site à une alimentation électrique et à un réseau;
- de la proximité vis-à-vis de l'énergie des signaux – signaux utiles et signaux parasites. Dans de nombreuses zones métropolitaines, il est devenu nécessaire de placer les sites de contrôle à proximité immédiate des services hertziens ou des équipements électriques industriels;
- du terrain et de la visibilité en direction de la zone contrôlée;
- de la densité des émetteurs et de la nature du trafic spectral;
- de l'importance de la base des utilisateurs dans la zone contrôlée (infrastructures essentielles, installations publiques, etc.);
- de la durée de l'activité de contrôle. Certains produits de contrôle sont bien adaptés à des activités de contrôle de courte durée (moins de 12 heures) du fait qu'ils sont de petite taille, qu'ils fonctionnent sur batterie et qu'ils faciles à installer et à retirer;
- de facteurs liés à l'installation sur le site: taille des équipements, disponibilité d'une alimentation électrique et utilisation qui en est faite, connectivité aux réseaux, location du site, étalonnage et maintenance des équipements, etc.

En outre, dans un système de contrôle du spectre, il est possible que des technologies anciennes côtoient des technologies nouvelles (par exemple, avec l'intégration de nouveaux équipements dans des stations existantes et l'amélioration de l'état et du fonctionnement des équipements de contrôle existants). Le choix d'une seule technologie ne permet pas de traiter tous les scénarios possibles. Chaque technologie de géolocalisation comporte des aspects qui fonctionnent bien dans certains cas mais pas dans tous.

A partir de simulations avec un ensemble donné de conditions, nous allons ici illustrer l'incidence que les choix de conception et les caractéristiques des émetteurs ont sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation. Les simulations qui suivent sont basées sur des modèles de propagation normalisés par le secteur privé élaborés entre 2004 et 2007². Elles ne tiennent pas compte des données topographiques réelles en 3D, et la couverture RF est donc modélisée uniformément depuis chaque site de contrôle, ce qui permet d'observer les diverses incidences de la largeur de bande, de la puissance et de la hauteur d'antenne des émetteurs dans des conditions idéales. Les simulations sont effectuées au moyen d'un outil logiciel qui est régulièrement utilisé pour répondre à la question suivante: «Quel est le nombre approximatif de stations de contrôle nécessaires pour couvrir une zone donnée?»

2 Considérations générales

Il est important de commencer par définir la distance de détection radioélectrique (RF) et la zone de couverture de la géolocalisation:

- La distance de détection RF est définie comme la distance la plus longue (en km) depuis la station de contrôle à laquelle un émetteur peut être détecté avec un rapport SNR positif. La distance de détection peut varier d'une direction à l'autre en fonction du terrain, des caractéristiques des bâtiments, et d'autres facteurs.

² Modèles élaborés par le consortium Wireless World Initiative New Radio (WINNER I et II) sous la coordination de Nokia Siemens Networks.

- La zone de couverture de la géolocalisation est définie comme la zone géographique dans laquelle un émetteur peut raisonnablement être localisé au moyen des méthodes disponibles (à savoir AOA, TDOA, hybride, POA).

Il est important de noter la différence qui existe entre la distance de détection RF – qui nécessite un rapport SNR positif à la station de contrôle – et la zone de couverture de la géolocalisation – qui ne nécessite pas un rapport SNR positif à chaque station de contrôle. Les méthodes de géolocalisation TDOA, qui corrélerent le signal reçu en différents sites, permettent de localiser des émetteurs dont le niveau des signaux est inférieur au bruit de fond. Il n'y a pas de corrélation de la puissance de bruit reçue en ces sites. Pour plus de détails concernant le fonctionnement des méthodes de géolocalisation TDOA, on se reportera aux §§ 4.7.3.2.2 et 4.7.3.2.3 du Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre.

Pour analyser la zone de couverture de la géolocalisation pour des groupes de capteurs TDOA et de stations de radiogoniométrie AOA fixes, on peut considérer des réseaux de contrôle TDOA et AOA comportant jusqu'à trois stations en interaction, étant donné qu'on obtient alors des zones dans lesquelles les zones de couverture de trois ou deux stations se chevauchent et des zones couvertes par une seule station.

Nous considérerons la couverture de la géolocalisation pour trois capteurs fixes, désignés par S1 à S3 sur la Fig. 1, et trois stations de radiogoniométrie fixes, désignées par DF1 à DF3 sur la Fig. 2, présentant exactement la même configuration, mais fonctionnant respectivement dans des réseaux TDOA et AOA. On suppose également que les réseaux comportent des stations de contrôle mobiles, désignées par MS sur les Fig. 1 et 2, dotées d'équipements utilisant exactement la même technologie que les capteurs et les stations de radiogoniométrie fixes. Les différentes distances de détection RF pour chacune des stations fixes sont représentées sur les Fig. 1 et 2 à l'aide de contours de différentes couleurs. La zone en jaune est la zone de détection RF commune à toutes les stations fixes à l'intérieur de laquelle la source d'émission (désignée dans la suite comme étant l'"émetteur") a un rapport SNR positif. Étant donné que les capteurs TDOA utilisent la corrélation croisée synchrone dans le temps, la zone de couverture de la géolocalisation du réseau de capteurs S1 à S3 sur la Fig. 1 est plus grande que celle du réseau de stations de radiogoniométrie DF1 à DF3 sur la Fig. 2.

Il convient de noter que la distance de détection RF et les zones de couverture de la géolocalisation sur les deux figures sont définies de manière théorique sur la base d'un certain émetteur de test ayant une puissance et une hauteur d'antenne données. Toute modification de ces paramètres entraînerait inévitablement une certaine modification des contours des zones de couverture. On trouvera une description plus détaillée au § 3.

Pour un réseau TDOA, les coordonnées de l'émetteur sont déterminées à partir de l'intersection des trois lignes de position, comme indiqué sur la Fig. 1 concernant l'émetteur T1, situé à l'intersection des lignes de position 1-2, 3-1 et 3-2. Pour un réseau AOA, la géolocalisation au moyen uniquement des stations de radiogoniométrie fixes est effectuée par les trois stations de radiogoniométrie, comme indiqué sur la Fig. 2 (les lignes de relèvement 1 à 3 permettent de localiser l'émetteur T1). Le réseau AOA est également efficace dans les zones couvertes par seulement deux stations de radiogoniométrie, comme indiqué sur la même figure concernant l'émetteur T2 (lignes de relèvement 4 et 5).

FIGURE 1
Zone de couverture de la géolocalisation pour un réseau TDOA

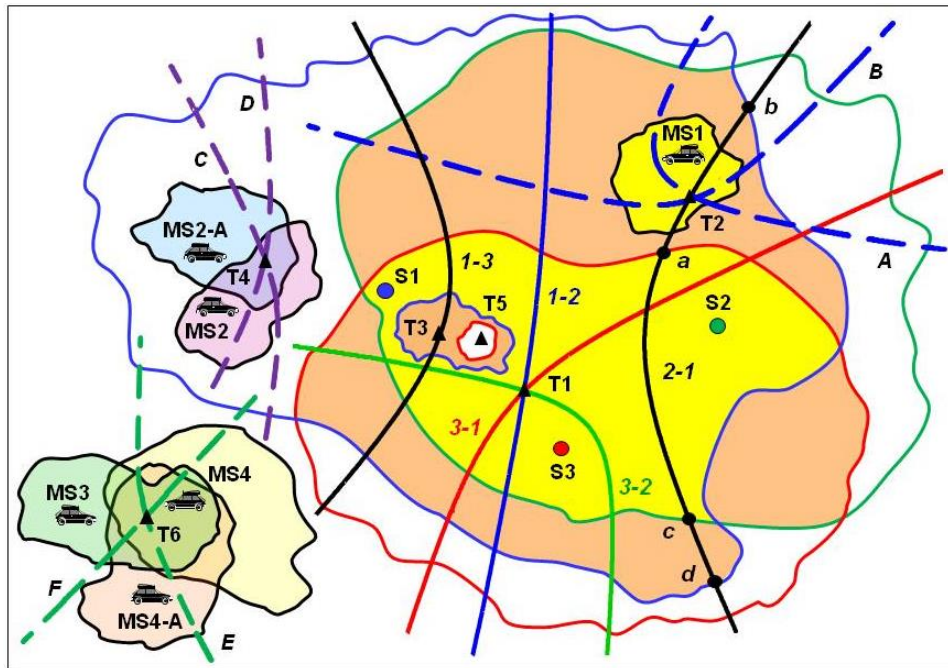
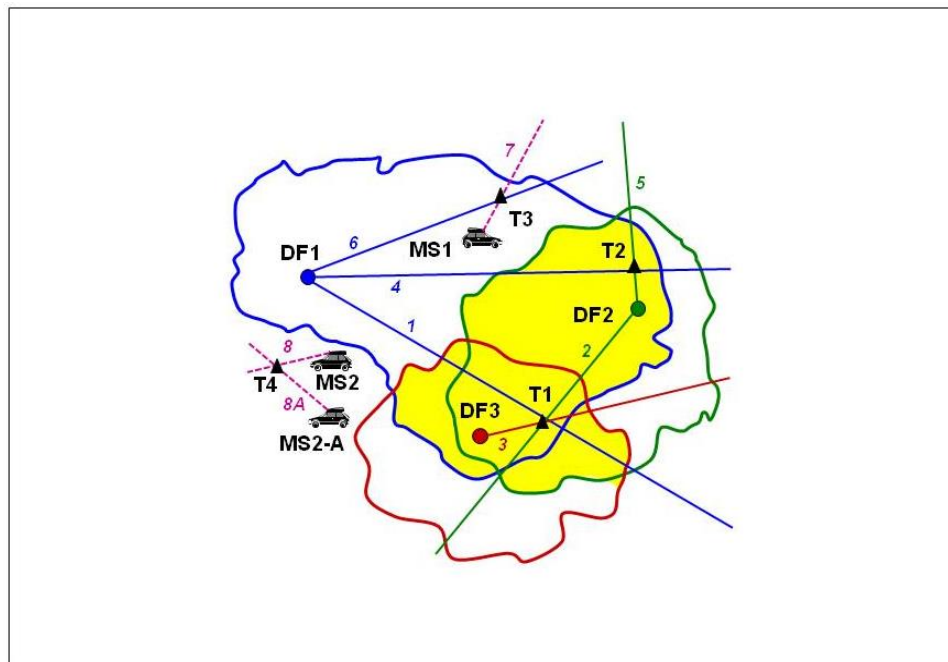


FIGURE 2
Zone de couverture de la géolocalisation pour un réseau AOA



Si, dans un réseau TDOA, l'émetteur considéré est situé dans une des zones en dehors de la zone délimitée par les capteurs (en marron sur la Fig. 1), le système ne peut produire qu'une seule ligne de position, par exemple la ligne 2-1 concernant l'émetteur T2 ou une ligne de relèvement vers l'émetteur. Dans ce cas, les coordonnées de l'émetteur doivent être déterminées avec l'aide d'une station mobile (MS1 sur la Fig. 1), interagissant avec les deux capteurs fixes. Ce cas est illustré sur

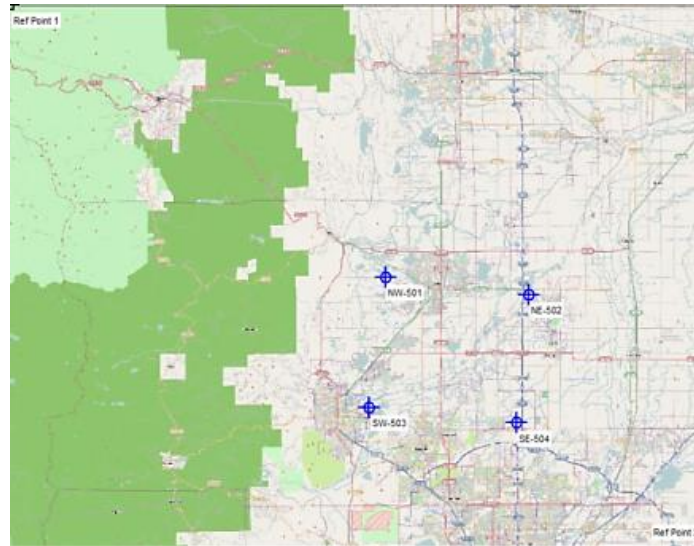
la Fig. 1 par l'intersection de la ligne de position 2-1 avec deux autres lignes de position établies à l'aide de cette station mobile (lignes de position A et B, représentées en pointillés afin de souligner le fait qu'elles varient lorsque la station se déplace).

L'émetteur considéré doit être situé à une distance inférieure à la distance de détection RF par rapport à l'une des stations TDOA s'il est intermittent (un déclenchement de la mesure est alors nécessaire). Si l'émetteur est persistant, il ne doit pas nécessairement être situé à une distance inférieure à la distance de détection RF par rapport à l'un quelconque des capteurs TDOA, mais il doit se trouver à l'intérieur de la zone de couverture de la géolocalisation, pour pouvoir produire une estimation de la position. La position exacte peut être déterminée avec l'aide de stations mobiles, mais cela peut prendre beaucoup de temps dans certains cas. Les stations mobiles ont souvent une distance de détection RF limitée en raison de la faible hauteur d'antenne. Il existe toutefois des techniques permettant de placer plus haut l'antenne d'une station mobile en recourant à des structures mises à la disposition du public (garages de stationnement par exemple) ou en tirant parti du terrain.

D'autres cas de couverture TDOA et AOA découlant des Fig. 1 et 2 ainsi que des exemples d'interaction entre stations fixes et mobiles sont traités dans la référence [8].

3 Simulations de facteurs ayant une incidence sur la distance de détection RF pour des stations de contrôle TDOA et AOA

FIGURE 3
Zone de simulation à Boulder, CO



Pour les exemples donnés dans le présent paragraphe, on utilise une région de l'état du Colorado aux Etats-Unis d'Amérique, comme indiqué sur la Fig. 3, avec quatre stations (NW-501, NE-502, SW-503 et SE-504) distantes d'environ 18 km les unes des autres. Les simulations permettront d'illustrer la distance de détection RF pour des stations AOA et TDOA classiques fonctionnant seules. Dans le cadre de ces simulations, la distance de détection est définie comme la distance la plus longue (en km) depuis la station de contrôle à laquelle un émetteur peut être détecté avec un rapport SNR positif.

La probabilité de détection obtenue dans les simulations est représentée en couleur – le rouge correspondant à une probabilité élevée et le bleu à une faible probabilité. L'objet du présent paragraphe est de mettre en évidence les facteurs qui peuvent avoir une incidence sur la distance de détection RF. Certains de ces facteurs sont du ressort de l'opérateur, par exemple:

- la hauteur et le gain de l'antenne de la station de contrôle;
- le type et la longueur du câble d'alimentation RF, le conditionnement du signal tel que l'affaiblissement, les filtres, etc.;
- l'environnement de bruit RF local au niveau de la station;
- l'environnement physique (y compris le terrain environnant).

A l'inverse, certains facteurs ne sont pas liés à la station de contrôle mais dépendent étroitement des caractéristiques de l'émetteur:

- Fréquence porteuse.
- Puissance de sortie.
- Largeur de bande du signal.
- Hauteur de l'antenne de l'émetteur.

L'outil de simulation utilisé dans le présent rapport permet à l'utilisateur de modifier une partie ou la totalité de ces facteurs pour déterminer l'incidence sur la distance de détection RF et la zone de couverture de la géolocalisation (pour des mesures de géolocalisation TDOA avec corrélation croisée). Dans un souci de simplicité, on emploie ici un modèle topographique en zone rurale avec visibilité directe. L'outil de simulation dispose d'autres modèles topographiques pour des scénarios en zone urbaine, en zone suburbaine, en intérieur et de type intérieur/extérieur. Il dispose également de modèles de propagation en visibilité directe et sans visibilité directe.

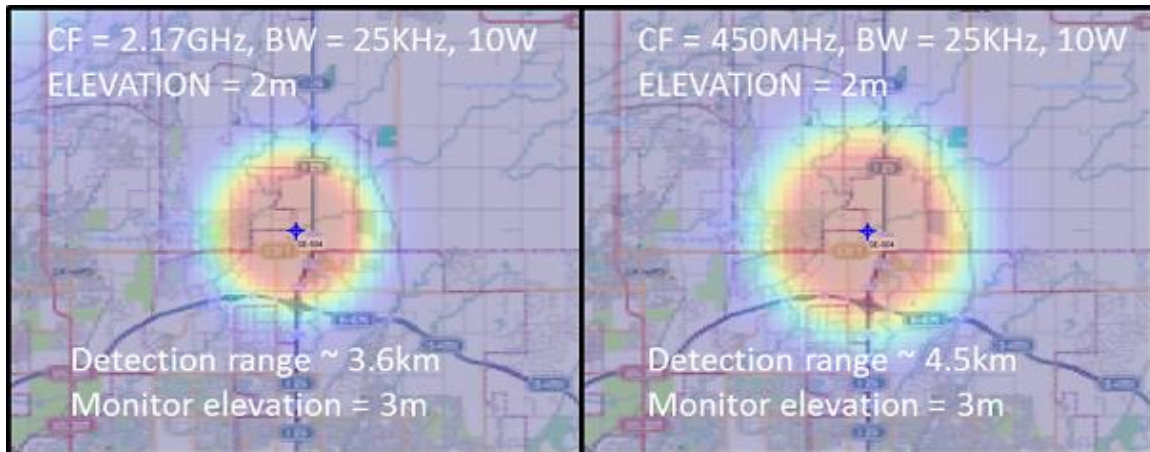
3(a) Effets de la fréquence porteuse de l'émetteur

Sur la Fig. 4, la station SE-504 est représentée sur une carte couvrant 17,2 km du nord au sud et 21,8 km d'est en ouest (cette carte sera utilisée dans toutes les simulations relatives à la distance de détection RF considérées dans le présent paragraphe). On suppose que cette station fonctionne avec un bruit de fond de -150 dBm/Hz, un gain d'antenne de 0 dB et une hauteur d'antenne de 3 m avec un câble RF LMR-400 de 2 m reliant l'antenne de réception à un capteur RF. Pour les résultats de simulation présentés à gauche, la fréquence porteuse (FP) de l'émetteur est de 2,17 GHz, la largeur de bande (LB) du signal est de 25 kHz, la puissance de sortie est de 10 W et la hauteur de l'antenne est de 2 m. Les résultats de simulation présentés à droite montrent l'effet sur la distance de détection RF d'une réduction de la fréquence porteuse de l'émetteur à 450 MHz³.

³ Plus la fréquence est faible, plus les affaiblissements de propagation sont faibles et, par conséquent, plus la distance de détection RF est grande.

FIGURE 4

Modèle de propagation en visibilité directe en zone rurale, l'émetteur et la station de contrôle sont tous deux proches du niveau du sol



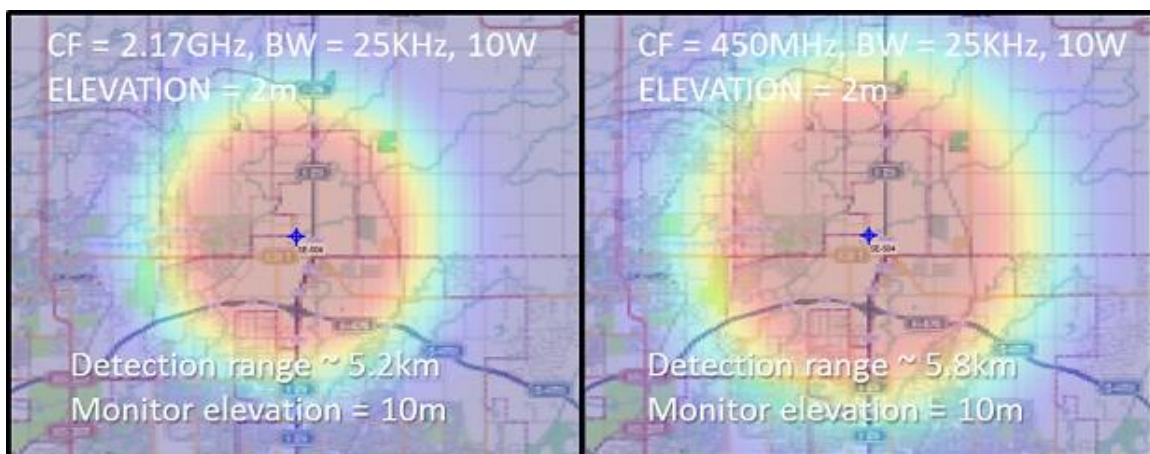
Des bandes de fréquences plus élevées (au-dessus de 3 GHz) commencent à être utilisées pour la téléphonie cellulaire et d'autres services sous licence. Le contrôle de ces services à partir de sites fixes sera de plus en plus difficile en raison du nombre d'emplacements de contrôle nécessaires pour assurer la couverture. C'est la raison pour laquelle des technologies basées sur des réseaux de stations de contrôle fixes, mobiles et repositionnables pourront devenir de plus en plus importantes.

3(b) Effets de la hauteur de l'antenne de la station de contrôle

Sur la Fig. 5, la hauteur de la station de contrôle est portée à 10 m et tous les autres facteurs restent les mêmes. La distance de détection RF attendue est nettement plus grande en raison de la probabilité accrue que les émetteurs cibles soient en visibilité directe. Le fait de placer plus haut l'antenne de l'émetteur a un effet analogue.

FIGURE 5

Modèle de propagation en visibilité directe en zone rurale, émetteur proche du sol, station de contrôle placée plus haut

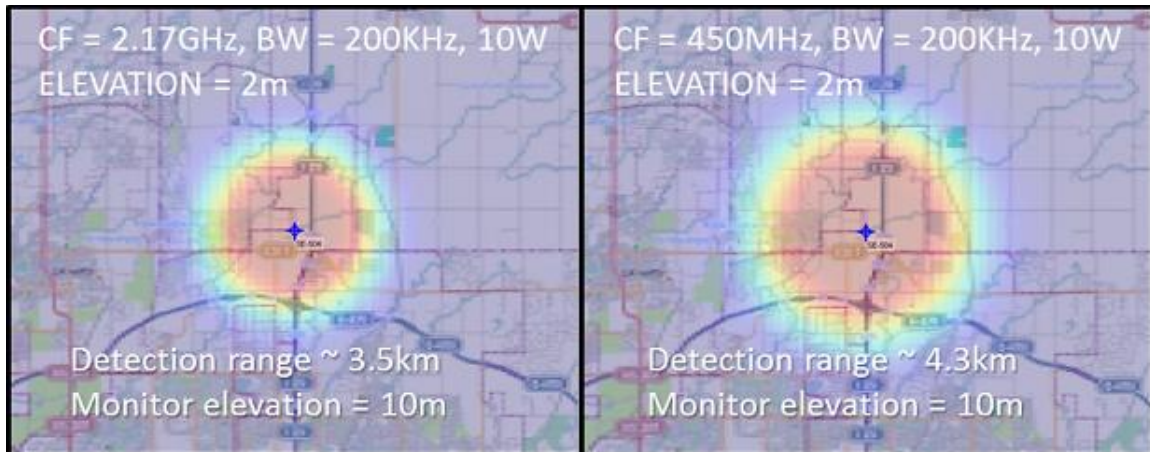


3(c) Effets de la largeur de bande du signal

Sur la Fig. 6, tous les éléments restent les mêmes que sur la Fig. 5, à ceci près que la largeur de bande du signal est portée de 25 kHz à 200 kHz. On observe une diminution de la distance de détection en raison de la réduction de la densité spectrale de puissance.

FIGURE 6

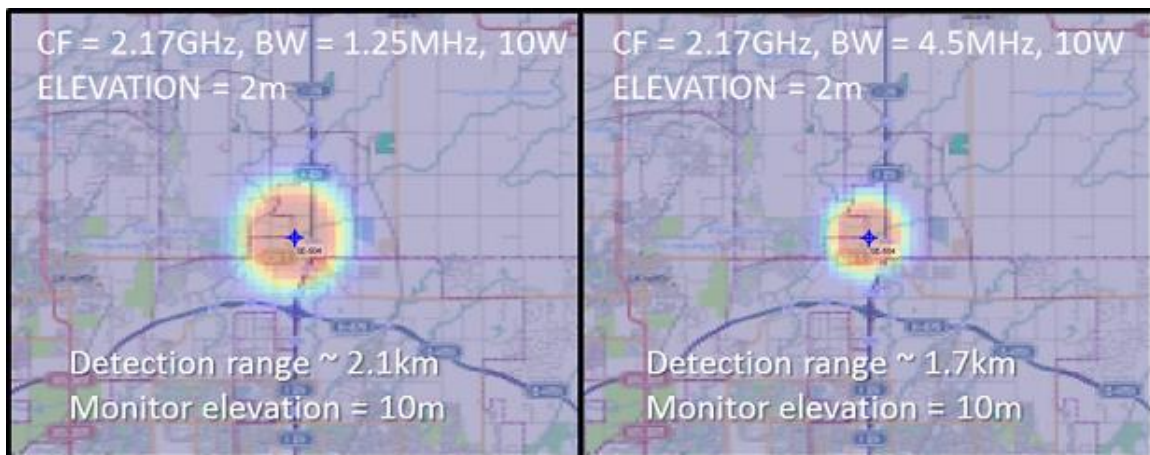
Comme pour la Fig. 5, à ceci près que la largeur de bande du signal est portée de 25 kHz à 200 kHz



La Figure 7 montre les résultats de simulations à la fréquence porteuse de 2,17 GHz, pour une largeur de bande du signal portée respectivement à 1,25 MHz et 4,5 MHz. Toutes les autres variables sont les mêmes que sur la Fig. 5 (partie de gauche). L'incidence de la largeur de bande du signal de l'émetteur sur la distance de propagation apparaît très clairement, avec la diminution de la distance de détection RF associée à la station de contrôle.

FIGURE 7

Largeur de bande du signal portée respectivement à 1,25 MHz et 4,5 MHz tandis que la puissance de l'émetteur, la hauteur et la fréquence porteuse ne sont pas modifiées

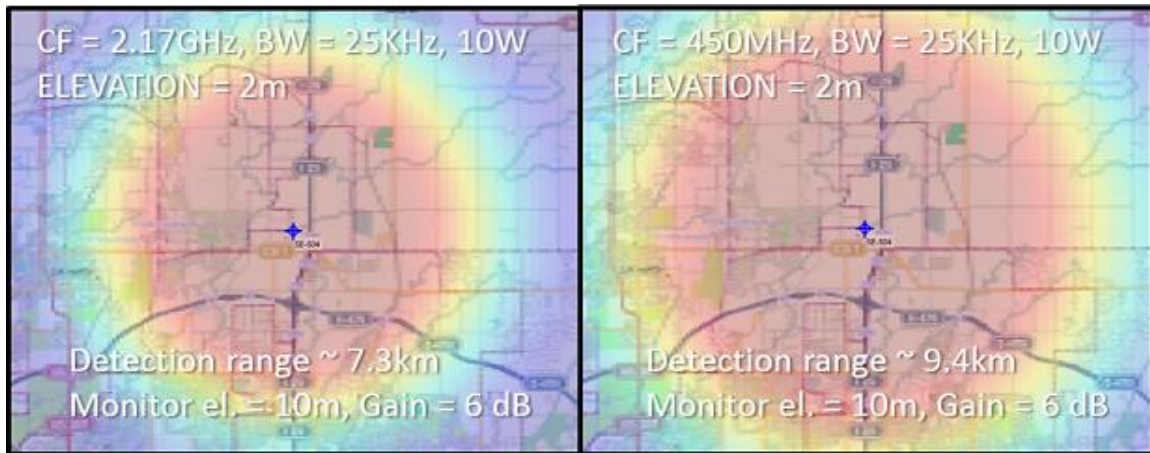


3(d) Effet du gain de l'antenne

La Figure 8 montre les résultats d'une simulation dans laquelle le gain d'antenne est porté à 6 dB pour illustrer l'utilisation d'une antenne directive. La largeur de bande du signal a été ramenée à 25 kHz. Ces résultats donnent une indication de la couverture attendue pour certaines stations AOA classiques dont le système d'antenne présente un certain gain, ou pour une station TDOA équipée d'une antenne directive. Jusqu'ici, l'échelle de la carte est restée la même pour toutes les simulations.

FIGURE 8

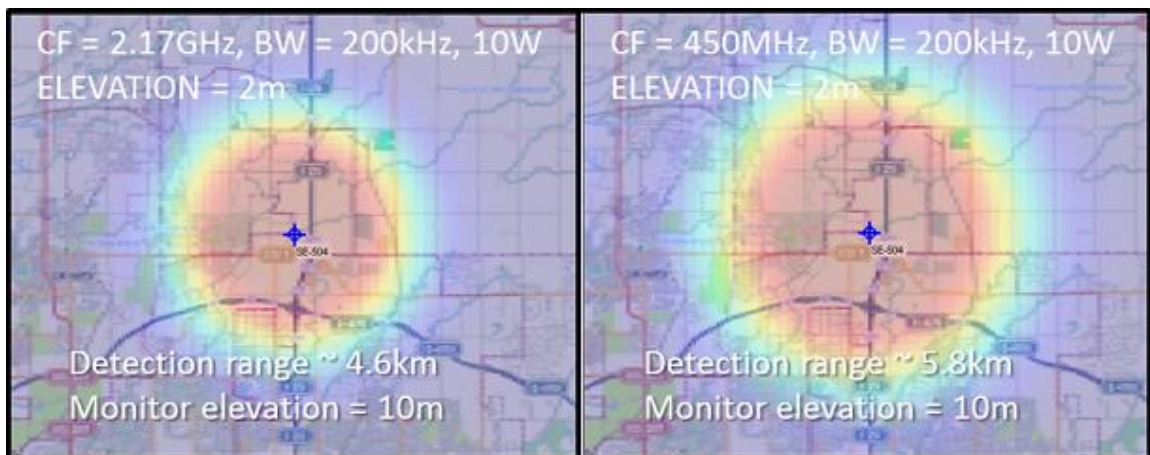
Gain d'antenne porté à 6 dB et largeur de bande de l'émetteur ramenée à 25 kHz pour des valeurs respectives de la fréquence porteuse de 2,17 GHz et de 450 MHz



La Figure 9 montre les résultats de la même simulation que pour la Fig. 8, à ceci près que la largeur de bande de l'émetteur a été portée à 200 kHz.

FIGURE 9

Comme pour la Fig. 8 à ceci près que la largeur de bande du signal a été portée à 200 kHz

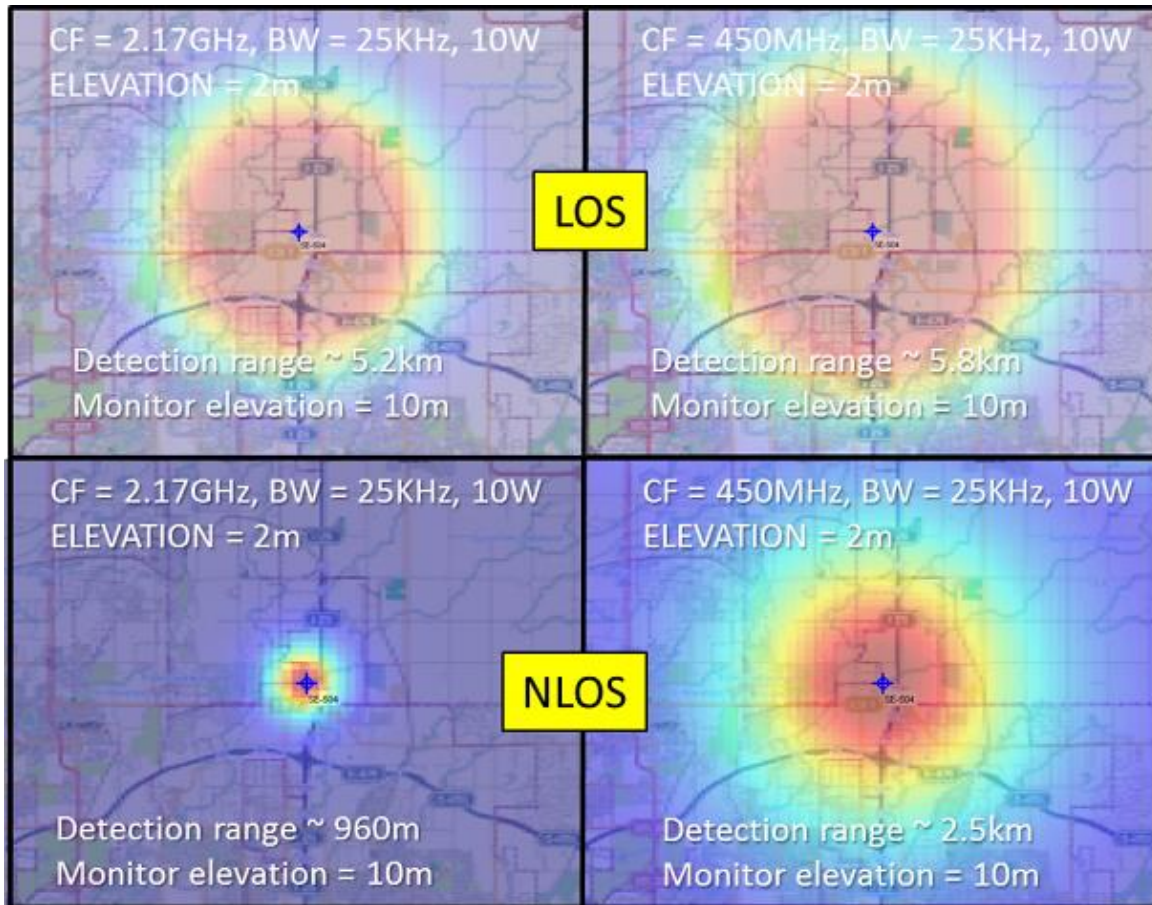


3(e) Effets du terrain et de la visibilité directe

Les Figures 4 à 9 montrent les résultats de simulations visant à illustrer l'incidence de plusieurs facteurs de conception et caractéristiques d'émetteur sur la distance de détection RF d'une station de contrôle donnée fonctionnant seule. Dans les simulations ci-dessus, il n'est pas tenu compte des effets d'écran dus aux bâtiments et au terrain. Pour montrer l'incidence de ces effets sur la distance de détection, la Fig. 10 compare les résultats obtenus pour des modèles de propagation en zone rurale en visibilité directe et sans visibilité directe. Les simulations pour la partie supérieure correspondent au scénario de la Fig. 5 tandis que celles pour la partie inférieure sont fondées sur le modèle de propagation sans visibilité directe. Ces images montrent très bien les effets de la visibilité directe sur la détection RF. Elles permettent également de souligner le rôle important des stations mobiles et repositionnables pour les systèmes modernes de contrôle du spectre. Ces facteurs doivent être pris en considération lorsqu'il s'agit de choisir un site et de concevoir une station de contrôle à utiliser pour la localisation des émetteurs.

FIGURE 10

Comparaison de l'incidence de la propagation en visibilité directe (LOS) et de la propagation sans visibilité directe (NLOS) sur la distance de détection RF



4 Simulations de facteurs ayant une incidence sur la zone de couverture de la géolocalisation pour des stations de contrôle TDOA et AOA

Dans le présent paragraphe, on considère une carte géographique élargie sur laquelle apparaissent quatre stations de contrôle. Pour ces simulations, la partie de gauche montre la distance de détection RF obtenue pour chacune des stations de contrôle fonctionnant de manière indépendante et la partie de droite montre la zone de couverture de la géolocalisation pour des mesures TDOA avec corrélation croisée.

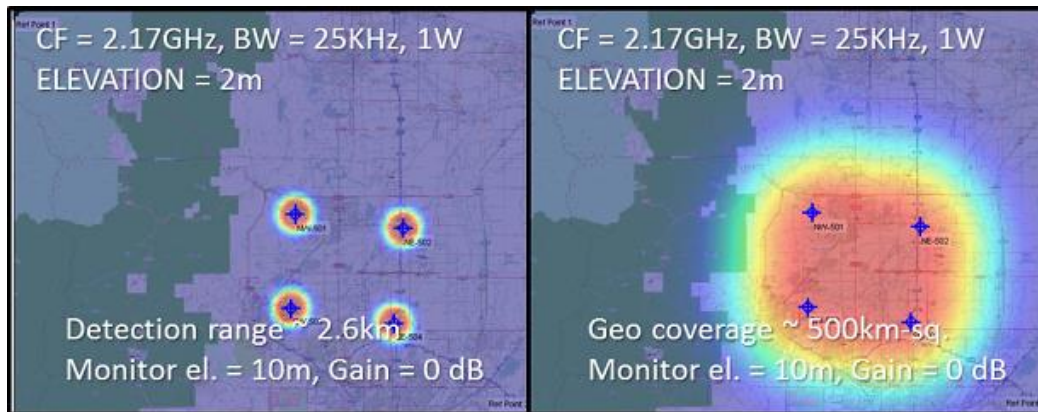
La zone de couverture de la géolocalisation est définie comme la zone géographique dans laquelle un émetteur peut raisonnablement être localisé au moyen des méthodes disponibles (à savoir AOA, TDOA, hybride, POA). Il est important de noter la différence qui existe entre la distance de détection RF – qui nécessite un rapport SNR positif à la station de contrôle – et la zone de couverture de la géolocalisation – qui ne nécessite pas un rapport SNR positif à chaque station de contrôle.

La Figure 11 montre les résultats d'une simulation dans laquelle la fréquence porteuse de l'émetteur est de 2,17 GHz mais le niveau de puissance est ramené à 1 W. Avec une hauteur de 2 m pour l'émetteur (et en continuant à utiliser le modèle de propagation en zone rurale avec visibilité directe sans données topographiques), la distance de détection de la station de contrôle est d'environ 2,6 km – ce qui est très optimiste car, dans la pratique, le signal subira certainement un effet d'écran dû aux bâtiments ou au terrain. D'après les estimations, la zone de couverture de la géolocalisation TDOA, représentée à droite, est beaucoup plus grande en raison d'une corrélation croisée des mesures

obtenues à l'aide de toutes les stations de contrôle du réseau⁴. La simulation repose sur une corrélation entre quatre paires de stations de contrôle.

FIGURE 11

Distance de détection RF pour chacune des quatre stations de contrôle (à gauche)
et zone de couverture de la géolocalisation TDOA (à droite)

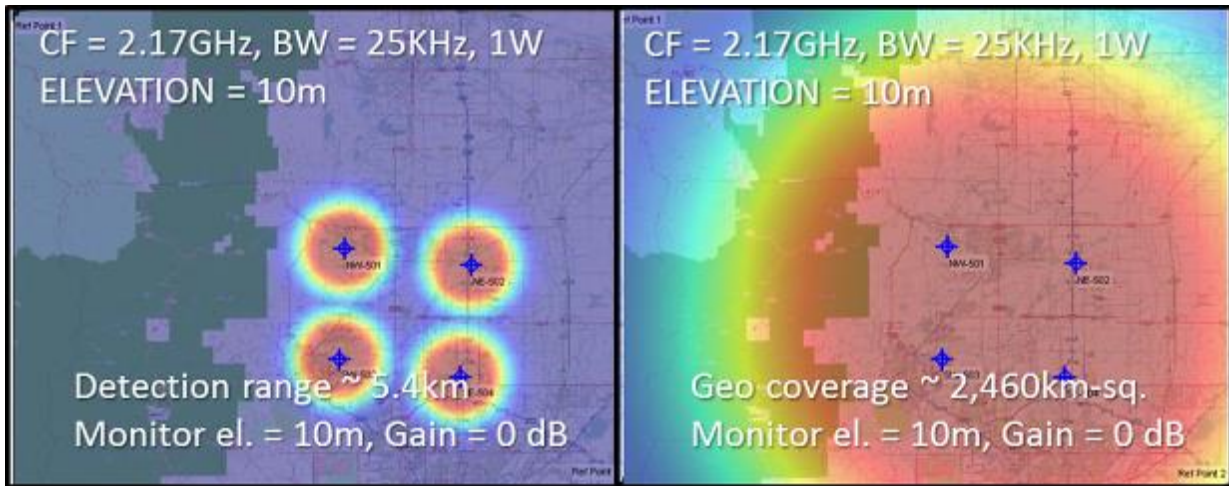


La Figure 12 montre les résultats d'une simulation dans laquelle la hauteur de l'émetteur est portée à 10 m. On observe alors une distance de détection RF plus grande pour les systèmes AOA et TDOA. La zone de couverture de la géolocalisation TDOA (à droite) est également plus étendue. Dans cette simulation, un aspect important est la dilution géométrique de la précision (GDOP) associée à la configuration des stations par rapport à la position de l'émetteur. On l'utilise pour déterminer l'incidence que des erreurs dans les données de mesure ont sur l'estimation finale de la position (voir la représentation graphique au § 5, Fig. 14). La GDOP pour les réseaux TDOA augmente à mesure que l'émetteur se déplace en dehors de la zone délimitée par les stations de contrôle. Par conséquent, on s'attend à ce que la précision de la méthode TDOA diminue en dehors du réseau de capteurs. Les résultats de la simulation montrent une grande zone dans laquelle une mesure de géolocalisation est possible, mais ils ne montrent pas l'incidence de la GDOP sur la précision attendue.

⁴ Dans le cas de mesures TDOA, une corrélation croisée est opérée sur un même signal émis au niveau de deux capteurs distincts, ce qui a pour effet de supprimer les caractéristiques de bruit indépendantes. Pour la limite théorique de longues durées de corrélation croisée, le récepteur et le bruit environnemental n'entrent pas en ligne de compte et la performance du système en matière de détection est moins limitée par la qualité de fonctionnement de chaque récepteur, y compris le facteur de bruit.

FIGURE 12

Même scénario que pour la Fig. 11 à ceci près que la hauteur de l'émetteur est portée à 10 m



Les gains de traitement obtenus par les algorithmes TDOA évolués permettent de localiser les émetteurs dans une zone plus grande que celle correspondant à la distance de détection RF de chacune des stations.

5 Comparaison de résultats de géolocalisation RF issus de simulations et de mesures réelles

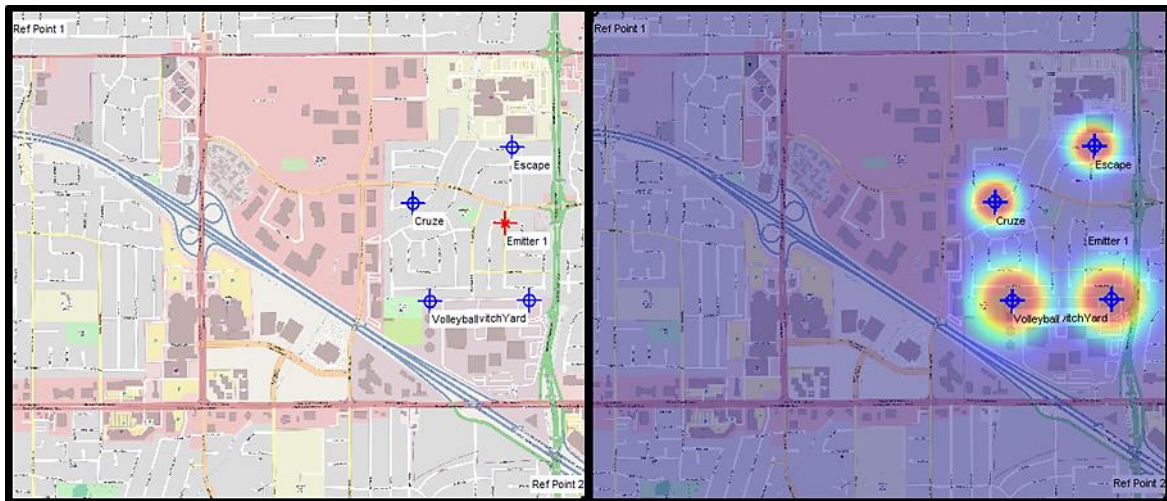
L'expérience décrite ci-dessous a été menée dans le but précis de localiser des émetteurs à faible puissance de même nature tels que des téléphones mobiles. Pour cela, les stations de contrôle étaient distantes de moins de 1 km. Ce scénario n'est pas applicable directement aux tâches habituelles de contrôle du spectre, mais il constitue un bon exemple de comparaison de résultats de simulations avec des mesures de champ réelles.

Cette expérience a été menée à Santa Clara, CA, en zone suburbaine avec un environnement industriel léger (immeubles de bureaux de cinq à six étages, hôpital, garages de stationnement, commerces de détail, etc.). Dans le modèle de simulation, nous avons utilisé un modèle topographique de type «zone suburbaine sans visibilité directe». Les stations «Volleyball» et «SwitchYard» étaient des stations temporaires mais fixes, dotées toutes deux d'éléments d'antenne équidirectifs et directifs à plaque. Elles étaient placées sur des trépieds à 2,5 m et alimentées par de petites batteries lithium-ion. Les stations «Escape» et «Cruze» étaient des stations mobiles installées dans des véhicules, dotées d'antennes à fixation magnétique et toutes étaient alimentées par batterie. L'émetteur a été déplacé dans la zone délimitée par les stations de contrôle.

La Figure 13 (partie de gauche) montre la disposition des stations de contrôle et une position de l'émetteur de test. Dans ces exemples, l'émetteur était un téléphone mobile émettant sur une liaison montante UMTS avec une puissance de 2 W à la fréquence de 831 MHz (largeur de bande du signal d'environ 4,5 MHz) depuis un véhicule. La partie de droite de la figure montre la distance de détection RF attendue pour les stations de contrôle. On constate que l'émetteur est situé en dehors des zones correspondant à la distance de détection RF de chacune des stations dans l'hypothèse d'un modèle topographique de type zone suburbaine sans visibilité directe.

FIGURE 13

Configuration du test à Santa Clara avec la position de l'émetteur et distance de détection RF attendue

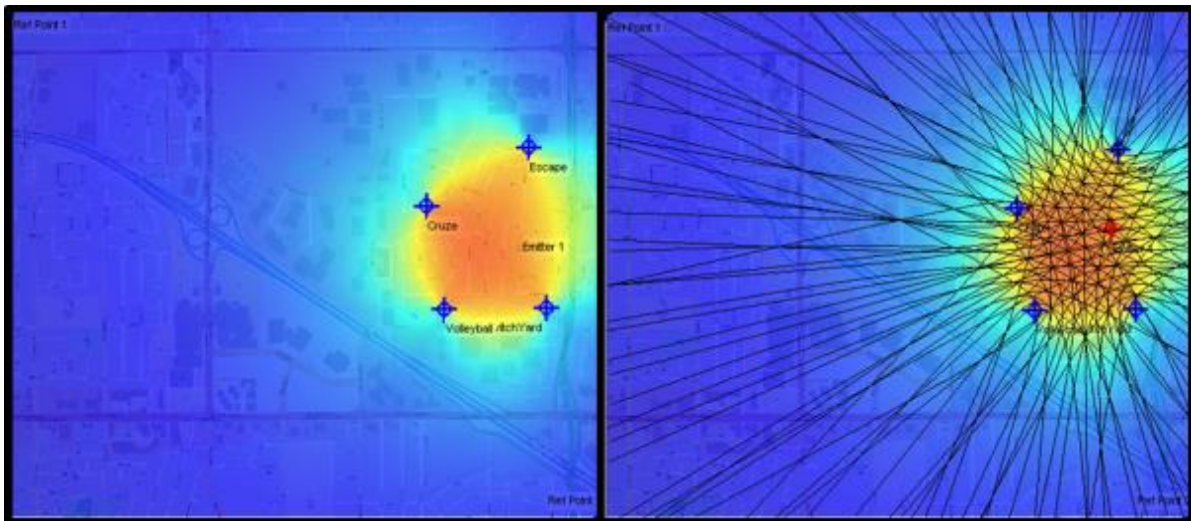


La distance de détection pour les deux stations de contrôle les plus au sud est plus grande du fait qu'elles sont légèrement plus hautes et sont dotées d'antennes directives pointées vers le nord. Toutes les stations de contrôle étaient connectées via des modems cellulaires à un serveur de géolocalisation avec une adresse IP routable situé dans un immeuble de bureaux de Santa Clara. Le réseau de capteurs était commandé via un ordinateur portable depuis le véhicule dans lequel se trouvait l'émetteur.

La Figure 14 (partie de gauche) représente une estimation de la dilution géométrique de la précision (GDOP) pour ce déploiement de stations de contrôle. On remarque qu'une faible (bonne) GDOP s'étend en dehors de la frontière du réseau dans certaines directions mais pas dans toutes. Dans la pratique, un réseau TDOA peut être capable de déterminer une ligne de position/direction vers un émetteur bien au-delà du périmètre délimité par les stations de contrôle⁵. La partie de droite de la figure montre les hyperboles attendues correspondant à une différence de temps constante entre paires de capteurs. La précision de la géolocalisation devrait être meilleure dans les régions dans lesquelles la GDOP est faible (représentées en rouge) et les hyperboles se coupent perpendiculairement.

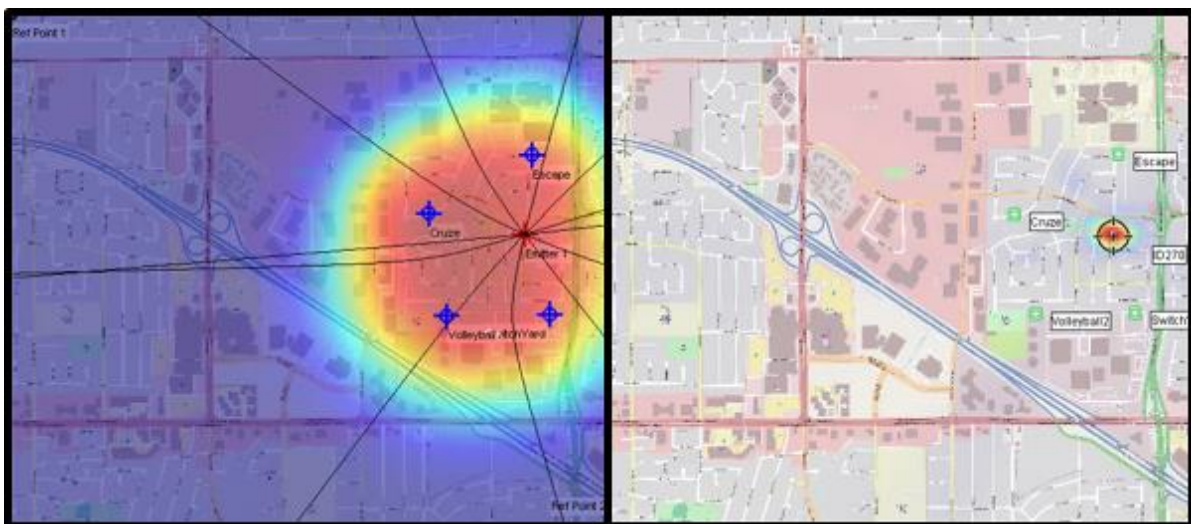
⁵ Une «ligne de position» produite à partir d'un groupe de plusieurs stations TDOA est analogue à un seul relèvement AOA obtenu à partir d'un site AOA donné, mais ne donne pas un résultat de géolocalisation. Elle donne uniquement la direction de l'émetteur (lorsque l'émetteur est en dehors de la zone délimitée par les stations TDOA).

FIGURE 14
GDOP à Santa Clara et affichage des hyperboles TDOA



La Figure 15 (partie de gauche) montre la zone de couverture de la géolocalisation attendue (dans l'hypothèse d'une corrélation entre quatre paires de capteurs au plus) et les hyperboles donnant la position de l'émetteur. La partie de droite de la figure montre une mesure réelle de la position de l'émetteur. Plusieurs mesures ont été réalisées à cet endroit avec une erreur TDOA inférieure à 50 m.

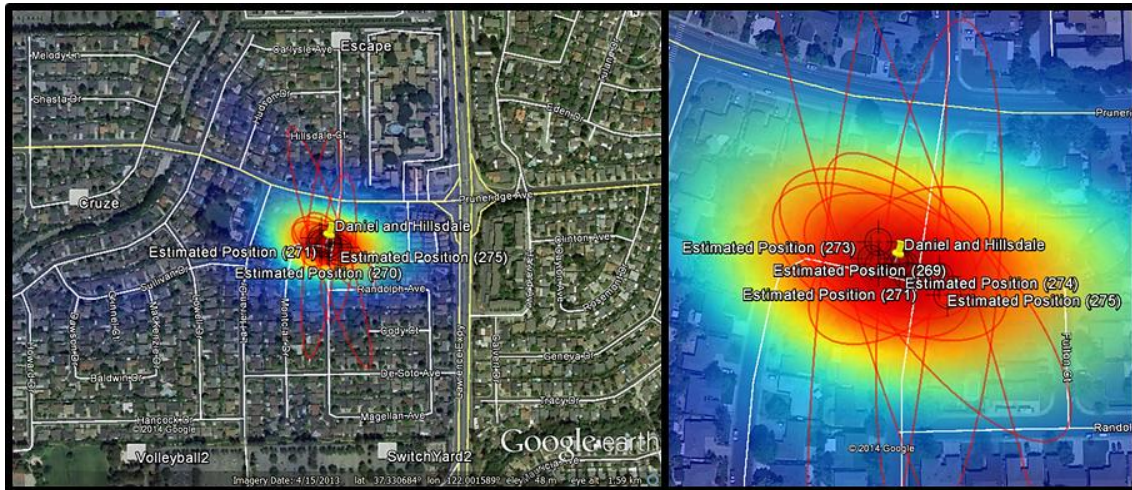
FIGURE 15
Estimation de la configuration de la zone de couverture et mesure réelle de la position de l'émetteur



La Figure 16 montre plusieurs résultats de géolocalisation superposés sur une vue Google Earth®, des couleurs étant utilisées pour la vraisemblance, la probabilité d'erreur elliptique (EEP) et l'estimation de la position de l'émetteur (EP). L'épingle jaune indique la position réelle de l'émetteur.

FIGURE 16

Résultats de géolocalisation superposés sur une vue Google Earth. Un agrandissement est présenté à droite

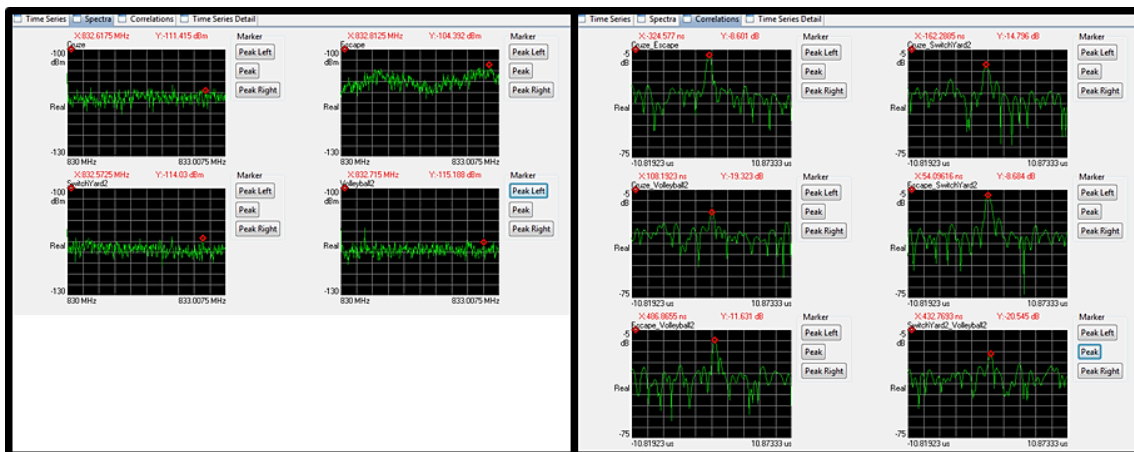


Dans ce cas, les simulations et les mesures concordent.

La Figure 17 (partie de gauche) montre que le signal de l'émetteur atteint une seule station de contrôle avec un rapport SNR positif (escape). Toutefois, la capacité à géolocaliser l'émetteur au moyen de la méthode TDOA était très forte comme en témoignent les bonnes corrélations croisées entre les paires de capteurs représentées sur la Fig. 17 (partie de droite).

FIGURE 17

Diagrammes types de spectre et de corrélation pour le dispositif UMTS mesurés lors d'une expérience sur le terrain en 2013



Ces simulations et mesures ont pour objet d'illustrer la différence entre distance de détection RF et zone de couverture de la géolocalisation et les conditions qui ont une incidence sur elles. La distance de détection RF est fonction de nombreux facteurs différents et dépend des choix de conception et des contraintes liées aux sites. La zone de couverture de la géolocalisation dépend de limitations imposées par la distance de détection RF mais varie en fonction de la méthode de géolocalisation (à savoir AOA, TDOA, POA, etc.). Toutes ces considérations sont importantes lorsqu'il s'agit de choisir la méthode de géolocalisation et le site d'une station de contrôle.

6 Conclusions

Les réseaux TDOA seront peut-être plus efficaces dans les grandes villes et les grands centres industriels, où il est possible d'installer un grand nombre de capteurs et d'automatiser le processus de contrôle, y compris la fonction de géolocalisation des émetteurs.

A l'inverse, dans les villes relativement petites et leurs environs de même que dans les centres industriels isolés, un petit nombre de stations de radiogoniométrie ou de stations hybrides AOA/TDOA, séparées par des distances relativement grandes, seront peut-être plus efficaces. Dans ce cas, l'utilisation de deux stations seulement pourra permettre de géolocaliser les émetteurs.

Il est impossible de détecter l'activité de tous les signaux sur la totalité d'une zone métropolitaine quelle que soit la technique fixe de géolocalisation ou de contrôle. En règle générale, des priorités sont fixées pour contrôler des parties du spectre dans des zones déterminées et pendant des durées spécifiques ou des événements particuliers qui sont importants. Compte tenu de l'environnement spectral actuel, il est essentiel de déployer un système répondant à la plupart des besoins et suffisamment souple pour permettre un repositionnement et une reconfiguration si nécessaire.

Déployer le type correct de station de contrôle sur la base des conditions applicables à la zone considérée permettra de minimaliser le nombre de stations tout en maximalisant la couverture et l'efficacité. Par exemple, dans des zones rurales dégagées sans réflecteurs de grandes dimensions, des stations AOA ou (hybrides) AOA/TDOA seront très efficaces. En revanche, dans des zones urbaines denses ou dans des environnements mixtes très peuplés avec une forte densité de réflecteurs rapprochés dans les quartiers, un réseau TDOA capable d'utiliser aussi la méthode POA et des algorithmes de géolocalisation hybrides pourra être plus efficace.

Annexe 2

Etude de simulation de la précision et de la zone de couverture de la géolocalisation pour des stations de contrôle hybrides AOA/TDOA

1 Introduction

La présente Annexe compare la précision de la géolocalisation obtenue à l'aide de stations hybrides AOA/TDOA de contrôle radioélectrique et à l'aide de systèmes AOA et TDOA autonomes, sur la base des résultats obtenus à partir d'une simulation informatique réaliste.

L'étude utilise des simulations informatiques pour modéliser la précision et la zone de couverture obtenues avec des stations de contrôle radioélectrique capables de mettre en oeuvre des techniques hybrides AOA/TDOA. Par rapport au cas de stations basées uniquement sur des techniques AOA ou uniquement sur des techniques TDOA, ces simulations font apparaître qu'un système hybride AOA/TDOA peut couvrir une zone plus grande à l'aide d'un plus petit nombre de stations, et donner lieu à une meilleure précision de la géolocalisation, à l'intérieur et à l'extérieur de la zone délimitée par les stations de contrôle.

2 Méthodes de géolocalisation

En règle générale, la géolocalisation consiste à combiner des mesures effectuées sur plusieurs sites pour produire une estimation de la position des émetteurs. La qualité de cette estimation est spécifiée en termes d'écart en distance (donné en mètres). Plus la valeur de l'écart en distance est faible, meilleure est l'estimation de la position.

Lorsque la densité des émetteurs augmente, la capacité d'un système de radiogoniométrie/contrôle du spectre à géolocaliser *avec précision* les émetteurs devient une caractéristique importante, en particulier en cas de problèmes de brouillages.

Il existe de nombreuses méthodes différentes de géolocalisation. Trois sont examinées ici. 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'angle d'arrivée. La deuxième méthode consiste à combiner des mesures TDOA effectuées sur au moins trois sites (trois paires de mesures TDOA sont nécessaires pour la géolocalisation). La troisième méthode consiste à combiner à la fois des mesures AOA et des mesures TDOA (au moins deux sites sont nécessaires: l'un capable d'effectuer des mesures AOA et TDOA, et un autre capable d'effectuer des mesures TDOA). Dans un souci de simplicité, ces trois méthodes sont appelées AOA, TDOA et hybride AOA/TDOA.

Il est à noter qu'un site de contrôle capable d'effectuer des mesures AOA est appelé site AOA; un site de contrôle capable d'effectuer des mesures TDOA est appelé site TDOA et un site de contrôle capable d'effectuer à la fois des mesures AOA et TDOA est appelé site hybride AOA/TDOA.

Les principales caractéristiques des trois méthodes de géolocalisation sont indiquées dans le Tableau 1 ci-après.

(Voir le Rapport [UIT-R SM.2211](#) pour un examen plus détaillé des avantages et des limitations des systèmes TDOA.)

TABLEAU 1

Caractéristiques du système de géolocalisation	AOA uniquement	TDOA uniquement	Hybride AOA/TDOA
Nombre minimal de sites nécessaires pour la géolocalisation	2 stations	3 stations	2 stations, hybrides AOA/TDOA. L'une des stations peut être uniquement TDOA
Précision de la géolocalisation	La précision décroît linéairement à mesure que la distance par rapport à la station de contrôle augmente	Approximativement constante entre les sites TDOA Se dégrade rapidement dans la zone située à l'extérieur des sites TDOA	Equivalente à celle de la méthode TDOA dans la zone comprise entre les sites hybrides Analogue à celle de la méthode AOA dans la zone située à l'extérieur des sites
La précision diminue lorsque la distance par rapport à l'émetteur augmente	Oui	Uniquement pour les émetteurs se trouvant dans la zone située à l'extérieur des sites TDOA	Uniquement pour les émetteurs situés très loin des sites hybrides.

TABLEAU 1 (*fin*)

Méthode indépendante de la modulation du signal	Oui	La méthode TDOA ne fonctionne pas avec des signaux non modulés Difficile avec des signaux à bande étroite	Oui, s'il y a au moins deux sites hybrides
Débit de données requis	Faible, 10-30 kbit/s	Moyen à élevé, 120 kbit/s – 2 Mbit/s	Peut être aussi faible que celui de la méthode AOA, si seule la méthode AOA est utilisée, ou légèrement supérieur à celui de la méthode TDOA, si les méthodes AOA et TDOA sont utilisées simultanément
Contraintes liées aux sites (voir le § 3)	Une antenne de plus grandes dimensions sera peut-être plus difficile à installer, et pourra limiter la disponibilité des sites	Antenne équidirective simple, plus facile à installer	Comme pour la méthode AOA pour les sites hybrides
Complexité de l'antenne	Antenne à plusieurs éléments	Antenne unique	Antenne à plusieurs éléments ou à un seul élément
Nécessité d'un étalonnage	Parfois (dépend du système AOA) ⁶	Non	Parfois (dépend du système AOA)

Comme le montre le Tableau, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Dans une application donnée (en zone urbaine/suburbaine, pour une utilisation permanente/temporaire, en terrain plat/montagneux, etc.), les impératifs liés au déploiement détermineront la configuration optimale.

3 Simulation de la précision de la géolocalisation à l'aide d'un exemple spécifique

Une simulation informatique détaillée de la précision de la géolocalisation a été menée à Belo Horizonte (Brésil) et dans ses environs. Différentes configurations de système de contrôle du spectre (SMS) – AOA, TDOA et hybride AOA/TDOA – ont été envisagées et une comparaison est faite entre les différents résultats obtenus en termes de précision de la géolocalisation attendue.

La simulation a été réalisée à l'aide d'un outil logiciel basé à la fois sur un calcul de géolocalisation et sur 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. Pour la simulation, des hypothèses particulières ont été prises au sujet du nombre de sites, de la hauteur de l'antenne de réception, de la hauteur de l'antenne de l'émetteur, et d'autres paramètres comme indiqué dans le Tableau 2.

⁶ Certains systèmes AOA s'auto-étalonnent et aucun autre réglage de l'étalonnage n'est nécessaire tant qu'aucune modification n'est apportée.

TABLEAU 2

Paramètres utilisés dans la simulation informatique dont les résultats sont présentés

Fréquence centrale:	450 MHz
Largeur de bande du signal:	25 kHz
Puissance de sortie de l'émetteur:	10 W ou 1 W (p.a.r.) (voir le texte)
Hauteur de l'antenne d'émission:	10 m (au-dessus du niveau moyen du terrain)
Hauteur de l'antenne de réception:	30 m (au-dessus du niveau moyen du terrain)
Gain de l'antenne de réception:	0 dB
Facteur de bruit du récepteur:	12 dB
Rapport SNR reçu au niveau du récepteur:	+10 dB
Nombre minimal de stations pour lesquelles le rapport SNR reçu correspond à celui spécifié	2 stations pour la méthode AOA et la méthode hybride, 3 stations pour la méthode TDOA

NOTE – Sauf indication contraire dans le Tableau, les mêmes paramètres ont été utilisés pour toutes les techniques de géolocalisation: AOA, TDOA et hybride.

La précision de la géolocalisation a été évaluée sur la base de l'écart en distance.

4 Outil d'analyse logiciel spécialisé

Pour cet exemple, l'outil logiciel complet effectue les simulations suivantes:

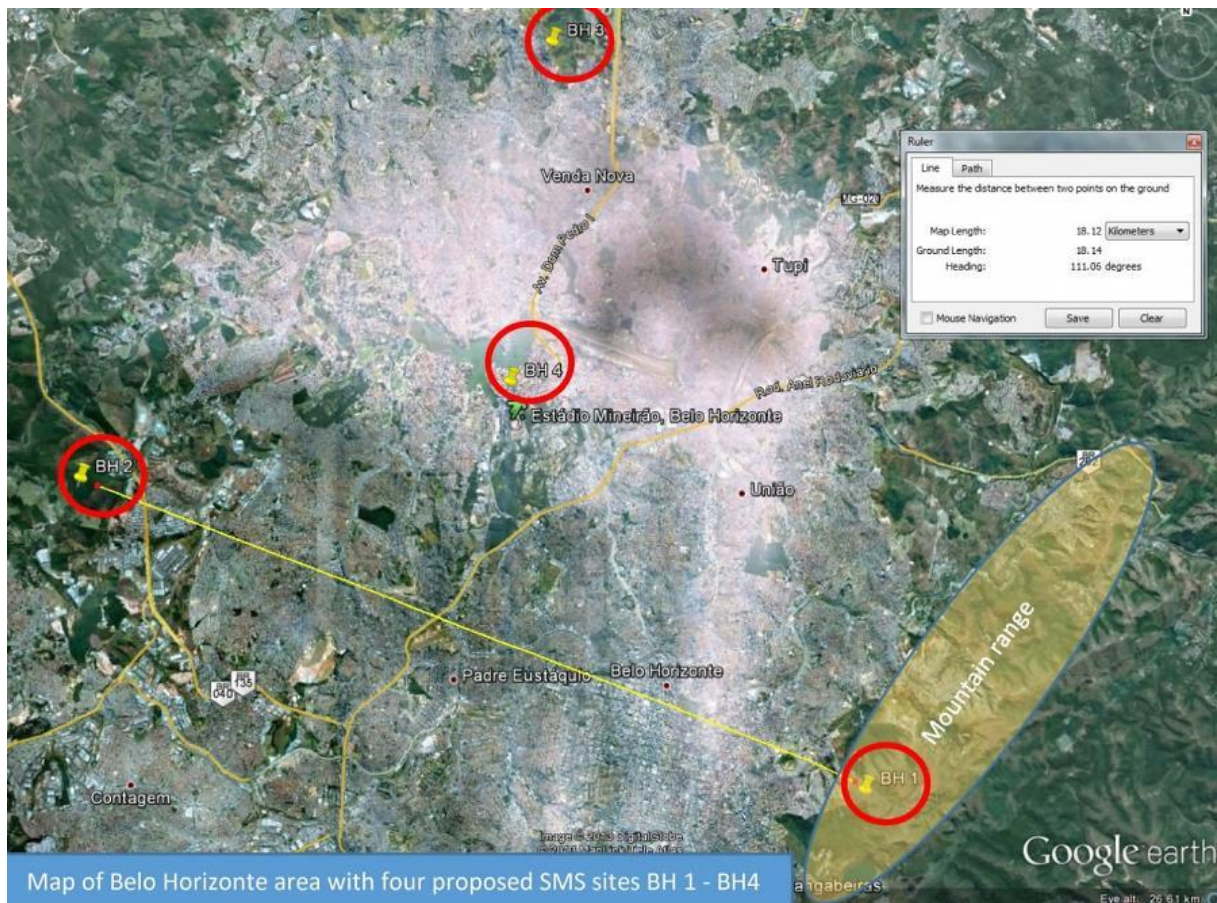
Couverture – L'analyse de la couverture montre le nombre de sites qui peuvent détecter un émetteur émettant depuis un emplacement donné à différents niveaux de puissance.

Précision de la géolocalisation – L'analyse de la précision de la géolocalisation AOA, TDOA et hybride AOA/TDOA montre la performance des différentes méthodes de géolocalisation.

Optimisation de la configuration du système – Cette analyse montre le nombre de sites nécessaires pour les différentes méthodes de géolocalisation pour obtenir une précision de la géolocalisation comparable.

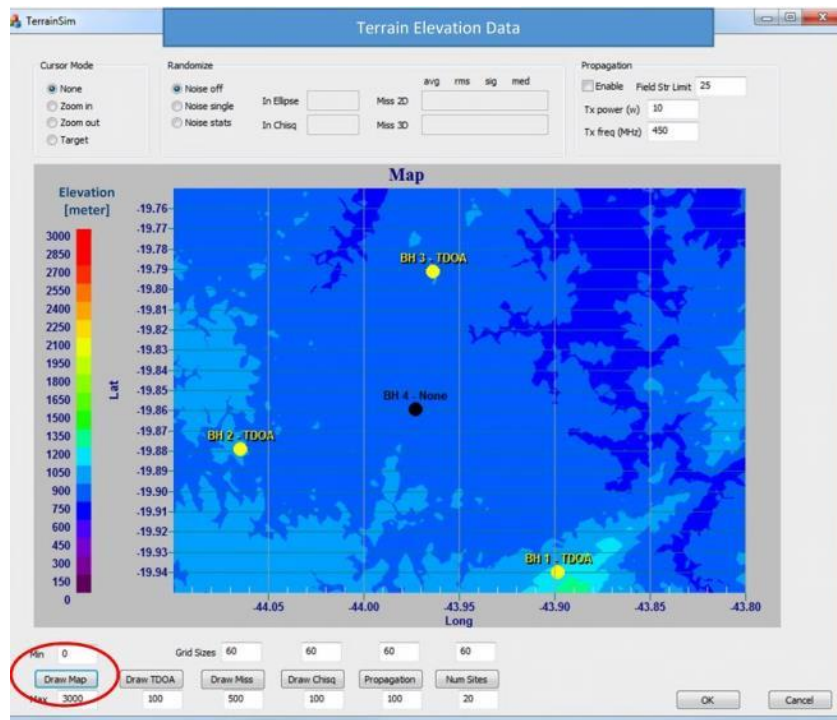
4(a) Exemple d'emplacement géographique

La figure ci-après montre sur une carte Google Maps les emplacements des quatre sites choisis pour l'analyse – désignés par BH1, BH2, BH3 et BH4 – à Belo Horizonte et dans ses environs. Les sites sont distants d'environ 18 km et le terrain est relativement plat, à l'exception de la crête montagneuse près du site BH1.



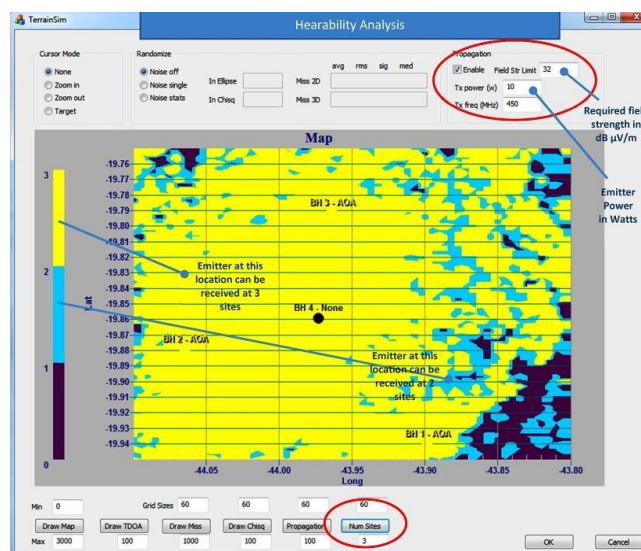
4(b) Exemple de données relatives à la hauteur du terrain

L'écran ci-après affiche les données relatives à la hauteur du terrain, ainsi que les emplacements des quatre sites avec leur nom et leur capacité de géolocalisation. Dans cet exemple, la capacité TDOA est choisie pour tous les sites. Les données relatives au terrain sont utilisées à la fois pour les calculs de propagation et de géolocalisation.



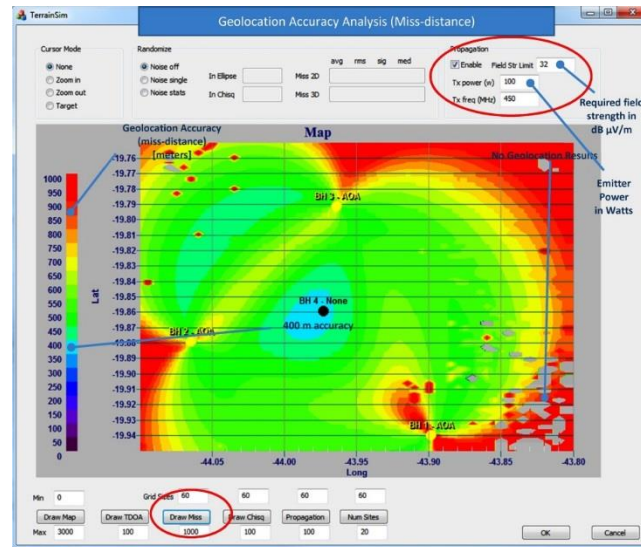
4(c) Exemple d'analyse de la détectabilité

L'écran qui suit montre les contours de la détectabilité, chaque couleur correspondant à un nombre de stations qui peuvent recevoir les signaux de l'émetteur avec l'intensité requise. Sont pris en compte les effets liés à la fois aux variations de la hauteur du terrain et au niveau de puissance de l'émetteur. Dans cet exemple, la capacité AOA est choisie pour tous les sites.



4(d) Exemple de représentation de l'écart en distance

L'écran qui suit montre les contours de la précision de la géolocalisation en termes d'écart en distance (donné en mètres). A nouveau, l'écart en distance est calculé pour l'intensité requise spécifique. Dans cet exemple, la capacité AOA est choisie pour tous les sites.

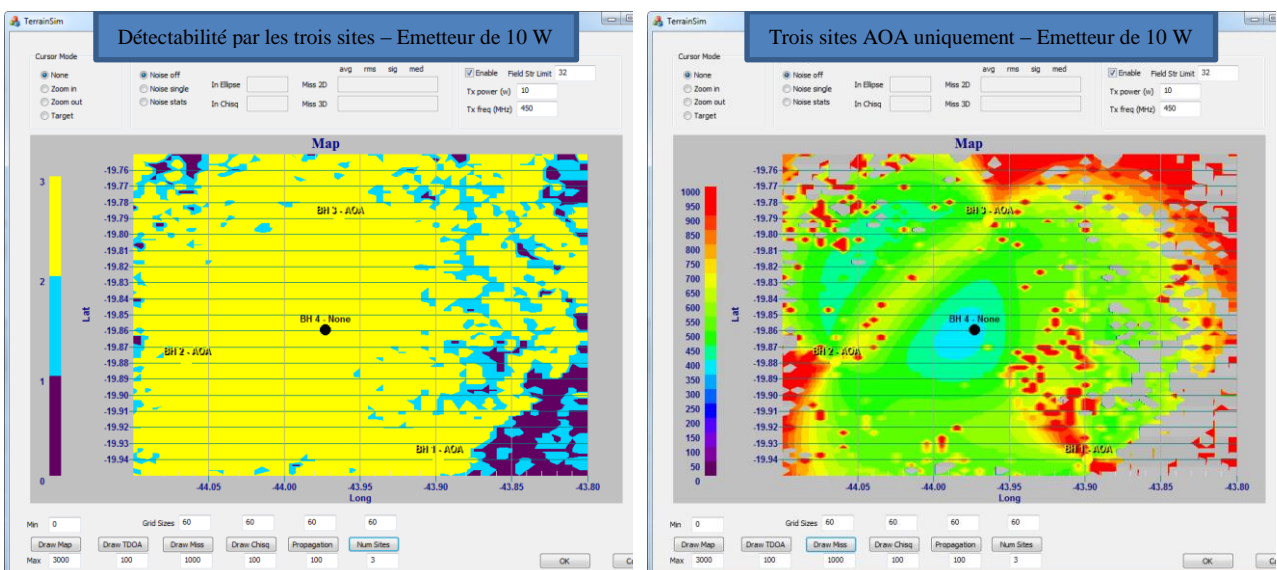


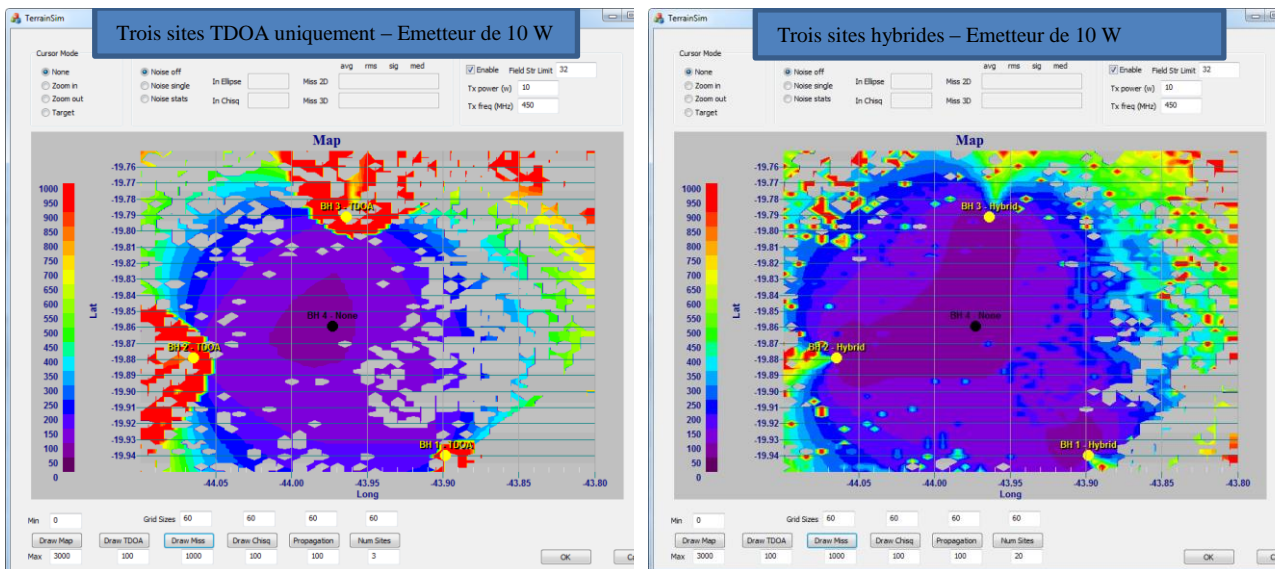
5 Résultats des simulations

Cette étude de cas a été menée dans diverses conditions, avec par exemple un nombre variable de stations utilisées dans le réseau de contrôle du spectre, une puissance de l'émetteur comprise entre 1 W et 100 W avec différentes conditions de propagation et différentes techniques de géolocalisation. Les paragraphes qui suivent récapitulent les principaux résultats de cette étude dans des scénarios à 10 W et à 1 W.

5(a) Réseau de trois stations de contrôle

Les figures ci-après présentent une comparaison des systèmes de géolocalisation AOA, TDOA et hybride AOA/TDOA dans le cas d'un émetteur de 10 W. La première figure montre la détectabilité par chacune des trois stations d'un émetteur de 10 W situé n'importe où dans la zone considérée.





5(b) Résumé des résultats des simulations (3 stations)

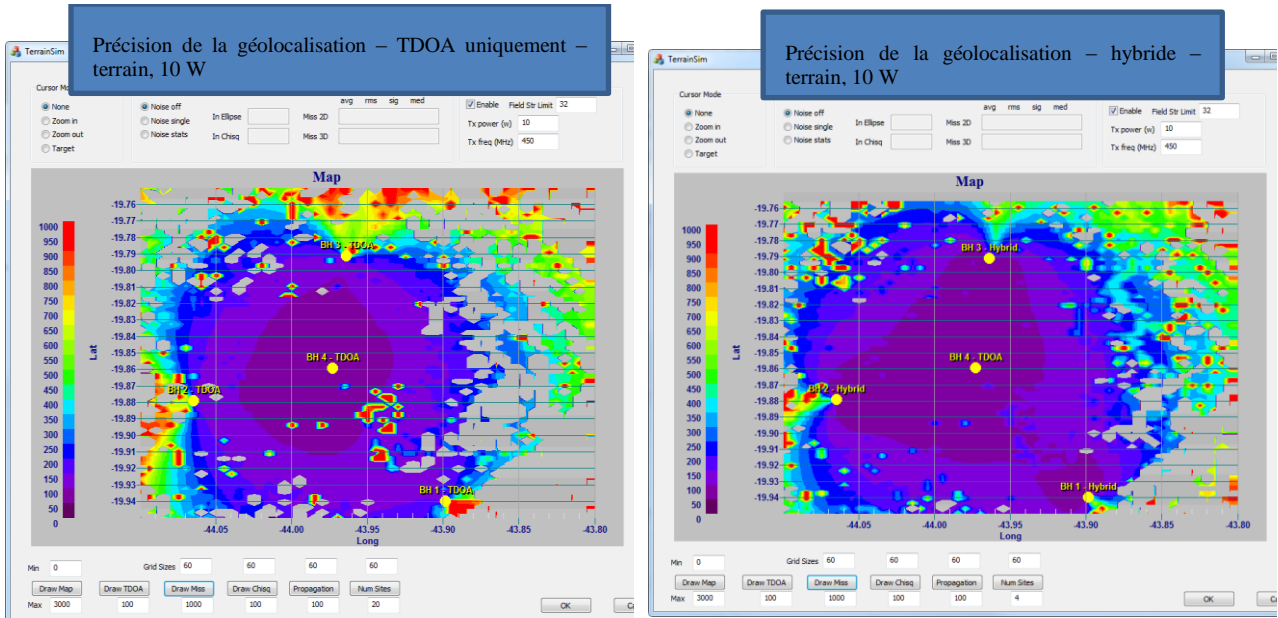
Un système constitué de trois stations AOA couvre toute la zone considérée, mais la précision de la géolocalisation est médiocre pour les émetteurs distants. Toutefois, les stations AOA sont à même de fournir une ligne de relèvement même si une seule station intercepte l'émetteur.

Un système constitué de trois stations TDOA donne une bonne précision dans la zone délimitée par les stations. Toutefois, comme attendu, la précision de la géolocalisation se dégrade à l'extérieur de cette zone. Dans cette simulation, on observe de grandes zones (en gris) dans lesquelles aucun résultat de géolocalisation n'est attendu, car la couverture de la géolocalisation TDOA dépend en partie de la configuration des sites ainsi que de la distance de séparation. La couverture avec des émetteurs de 1 W ou moins diminue comme attendu si seules trois stations TDOA sont utilisées avec cette distance de séparation (18 km) ou si l'émetteur n'est pas suffisamment proche d'au moins une station. Dans cette simulation, on suppose qu'au moins trois sites avec un rapport SNR positif sont nécessaires. Il n'est pas tenu compte de la possibilité de corrélation liée au bruit de fond (les méthodes AOA et TDOA permettent toutes deux de générer un résultat lorsqu'une seule des stations a un rapport SNR positif grâce aux techniques de corrélation).

Dans cet exemple, un système hybride utilisant les deux techniques AOA et TDOA devrait donner lieu à une géolocalisation de meilleure précision sur une zone de couverture plus grande.

5(c) Réseau de quatre stations de contrôle

Les figures ci-après présentent une comparaison des résultats de géolocalisation pour un système utilisant des stations TDOA et un système utilisant des stations hybrides AOA/TDOA, dans le cas d'un émetteur de 10 W.



5(d) Résumé des résultats des simulations (4 stations)

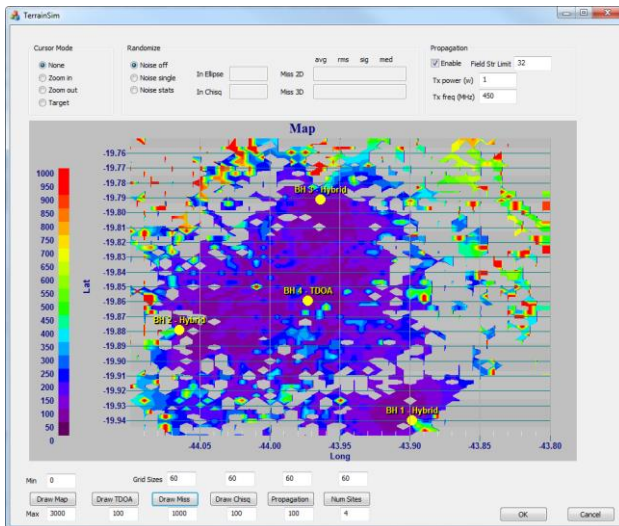
Les résultats avec un réseau de quatre stations sont cohérents avec les résultats obtenus avec trois stations, mais la couverture est meilleure. L'utilisation de stations TDOA uniquement donne une bonne précision dans la zone délimitée par les quatre stations, mais la précision de la géolocalisation se dégrade à l'extérieur de cette zone. Il existe aussi des zones (en gris) dans lesquelles aucun résultat de géolocalisation n'est disponible. Dans le cas de quatre stations TDOA, la couverture est moins bonne avec des émetteurs de 1 W ou moins (pour les mêmes raisons que dans le cas de 3 stations).

Comme dans l'exemple de trois stations, cette simulation montre qu'un système hybride utilisant à la fois les techniques AOA et TDOA peut donner lieu à une géolocalisation de meilleure précision sur une zone de couverture plus grande.

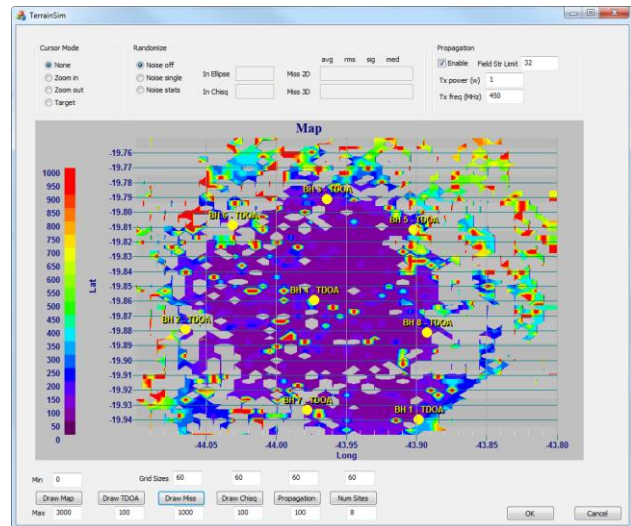
5(e) Comparaison du nombre de stations utilisées dans les réseaux

Il ressort des paragraphes précédents que la zone couverte par un système hybride utilisant à la fois les techniques AOA et TDOA peut être plus grande que la zone couverte par le même nombre de stations TDOA uniquement. Afin de quantifier les avantages liés à la mise en oeuvre d'un système hybride AOA/TDOA, une modélisation a été faite pour déterminer le nombre de stations uniquement TDOA nécessaires pour assurer une couverture équivalente à celle d'un réseau de trois stations hybrides AOA/TDOA plus une station TDOA, dans le cas d'un émetteur de 1 W.

Les figures qui suivent montrent les résultats de simulations pour quatre stations hybrides (figure de gauche) et huit stations TDOA uniquement (figure de droite).



Quatre sites: 3 hybrides + 1 TDOA



Huit sites TDOA uniquement

D'après cette simulation informatique, une solution de géolocalisation hybride AOA/TDOA devrait nécessiter un moins grand nombre de stations qu'une solution de géolocalisation uniquement TDOA pour obtenir une couverture et une précision identiques voire meilleures. Compte tenu des hypothèses prises dans cette simulation, les coûts d'installation et les coûts récurrents pourront être moins élevés pour un système hybride utilisant à la fois les techniques AOA et TDOA. Comme chaque situation est différente, il convient d'examiner avec soin la couverture requise, le terrain, les contraintes liées aux sites et les autres facteurs indiqués dans le Tableau 1, afin de déterminer la disposition optimale pour une application donnée.

6 Conclusion

Les simulations informatiques font apparaître qu'une solution de géolocalisation hybride AOA/TDOA peut offrir un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes TDOA et AOA. Dans l'exemple présenté, la solution AOA/TDOA offre une meilleure couverture avec un moins grand nombre de sites de contrôle.

Annexe 3

Etude expérimentale de l'utilisation d'un système TDOA avec un système AOA existant

1 Introduction

Un réseau en grille de contrôle des émissions⁷ reposant sur la méthode TDOA assure une couverture d'environnements complexes à un coût abordable tout en offrant des capacités sophistiquées pour le contrôle des émissions et la localisation des émetteurs. Toutefois, la méthode TDOA comporte certains inconvénients par rapport aux systèmes AOA et inversement. L'utilisation d'un système AOA existant avec un système TDOA représente une solution complémentaire utile pour pallier aux inconvénients que présentent ces deux types de systèmes.

Le programme expérimental de contrôle simple au moyen à la fois de capteurs TDOA et AOA a été lancé à Tokyo (Japon) en 2016 pour étudier l'efficacité de ce système de contrôle complémentaire.

2 Objectifs et scénarios de test

L'objectif de ce programme était de déterminer la meilleure façon de configurer le système TDOA avec un système AOA existant compte tenu des points forts et des points faibles des deux systèmes.

2.1 Utilisation de capteurs TDOA et AOA placés au même endroit

Des capteurs TDOA ont été placés au même endroit que les capteurs AOA existants autour de la baie de Tokyo et ont été utilisés pour déterminer la position de l'émetteur de test. Les deux systèmes ont été utilisés pour effectuer les mesures.

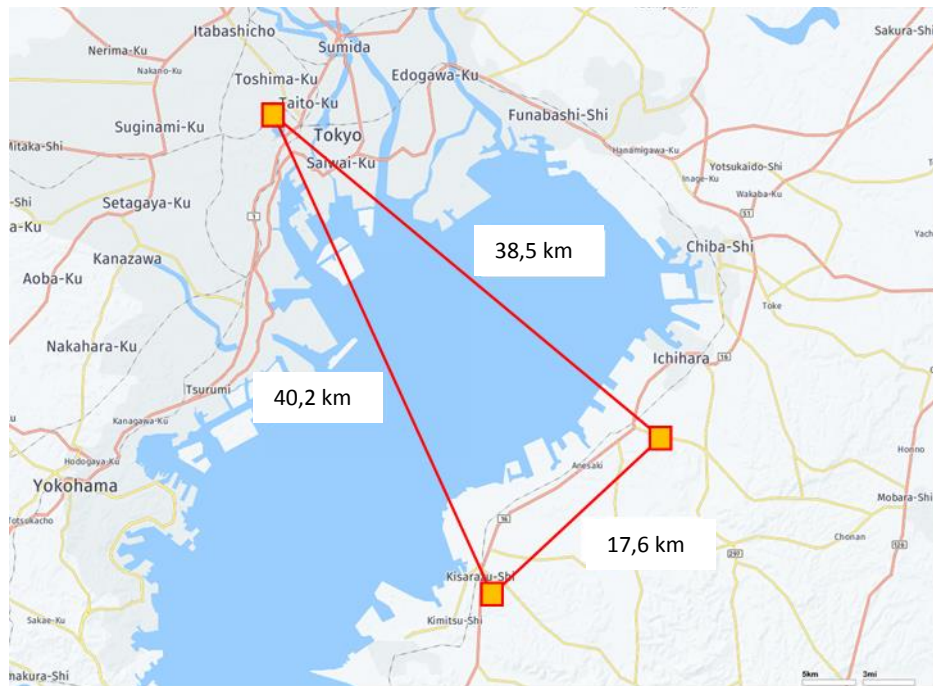
Les capteurs TDOA ont été connectés à une antenne équidirective et ont utilisé un réseau local filaire.

Un signal d'émetteur de test provenant d'un emplacement connu a été utilisé lors de l'expérience.

Les emplacements des capteurs AOA et TDOA sont visibles sur la Fig. 18 (trois capteurs AOA et trois capteurs TDOA).

⁷ Un réseau en grille de contrôle des émissions est constitué de capteurs de contrôle, d'antennes et d'accessoires supplémentaires, et est destiné à contrôler les émissions sur un grand territoire divisé en plusieurs petites zones de contrôle (grilles).

FIGURE 18

Emplacement des capteurs AOA et TDOA**2.2 Utilisation conjointe de capteurs AOA fixes et de capteurs TDOA mobiles**

Au moins deux lignes de relèvement sont nécessaires pour que le système AOA puisse estimer la position de l'émetteur. Dans le cas où une seule ligne de relèvement est obtenue, la position de l'émetteur peut être estimée en utilisant des capteurs TDOA mobiles.

Pour cela, dans le cadre de l'expérience, des capteurs TDOA ont été installés un par un au même endroit que les capteurs AOA. En outre, un capteur TDOA mobile a été utilisé.

Le principe de ce système de contrôle est que la station TDOA mobile se déplacerait le long de la ligne de relèvement mesurée par le capteur AOA.

3 Résultats**3.1 Utilisation de capteurs TDOA et AOA placés au même endroit**

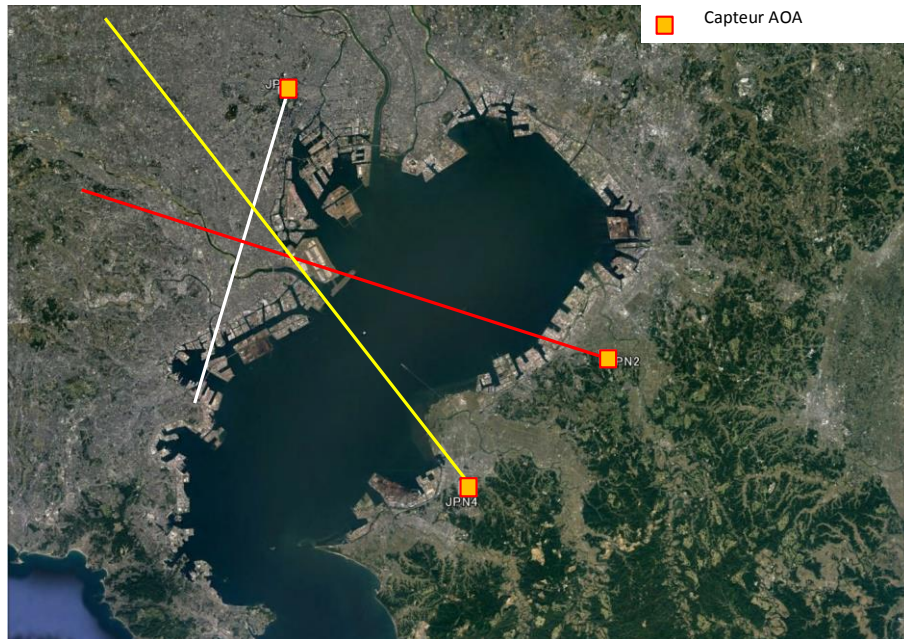
Le signal provenant d'une position connue de l'émetteur a été reçu et la position de l'émetteur a été estimée en utilisant le système AOA. Les lignes colorées (blanche, jaune et rouge comme indiqué sur les figures) correspondent aux lignes de relèvement calculées avec la méthode AOA. Ces lignes ne se coupaient pas en un point lors de certaines mesures, comme le montre la Fig. 19.

Aucune explication n'a été trouvée, mais un réflecteur rapproché ou une distorsion du front d'onde a pu en être la cause.

Le profil connu du signal de l'émetteur dans cette situation est le suivant:

Fréquence	1 020,0 MHz
Largeur de bande occupée	500 kHz

FIGURE 19
 Résultat obtenu avec la méthode AOA

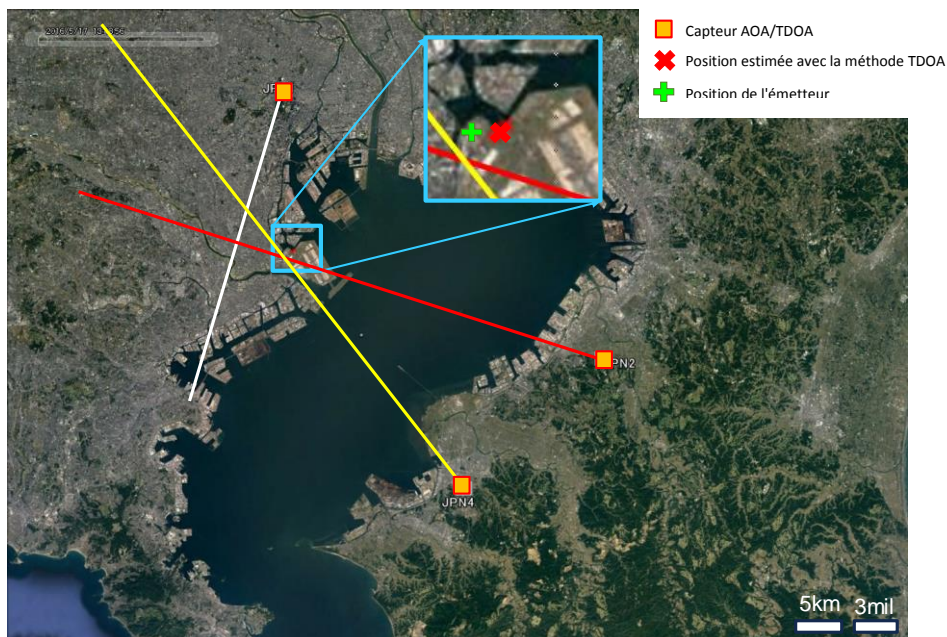


Le même signal a été reçu par les capteurs TDOA et la position estimée a été calculée.

Pour localiser plus précisément l'émetteur et minimiser l'ambiguïté, les résultats des deux méthodes TDOA et AOA ont été affichés.

La Figure 20 indique la position estimée avec les méthodes AOA et TDOA en superposant les résultats obtenus.

FIGURE 20
 Position estimée avec les méthodes TDOA et AOA



Ces résultats montrent que les mesures simultanées avec les méthodes AOA et TDOA peuvent réduire l'ambiguïté et/ou améliorer la précision des mesures sur la position de l'émetteur.

Dans certains cas, il a été observé que l'utilisation conjointe d'un capteur AOA et de deux capteurs TDOA fonctionne bien pour localiser l'émetteur.

Afin d'estimer la position de l'émetteur avec succès, au moins deux capteurs AOA ou trois capteurs TDOA sont nécessaires si l'une des deux méthodes est utilisée de façon indépendante (AOA ou TDOA). Toutefois, en raison des trajets multiples, des obstacles, d'un signal faible, etc., il se pourrait qu'il soit impossible de détecter le signal de l'émetteur sur un nombre suffisant de capteurs.

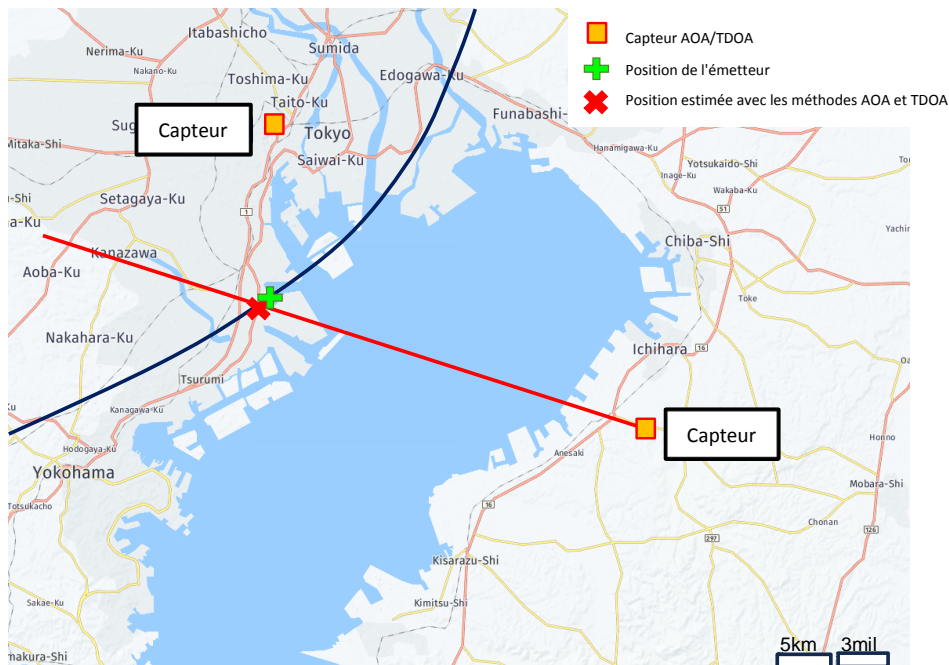
Pour remédier à cette situation, il a été observé que la combinaison des méthodes AOA et TDOA pouvait conduire à une estimation réussie de la position de l'émetteur, même lorsque les capteurs, en nombre suffisant, n'ont pas pu recevoir un niveau de signal adéquat.

La Figure 21 montre les résultats effectifs des mesures obtenus avec une station AOA et deux capteurs TDOA. La ligne rouge est la ligne de relèvement et la ligne bleue est l'hyperbole formée par les deux capteurs TDOA.

Cela montre qu'une ligne de relèvement et une hyperbole peuvent permettre de localiser l'émetteur. La position estimée de l'émetteur (x rouge) peut être établie sur la base de l'intersection des deux lignes.

FIGURE 21

Résultat découlant de l'association entre un capteur AOA et deux capteurs TDOA



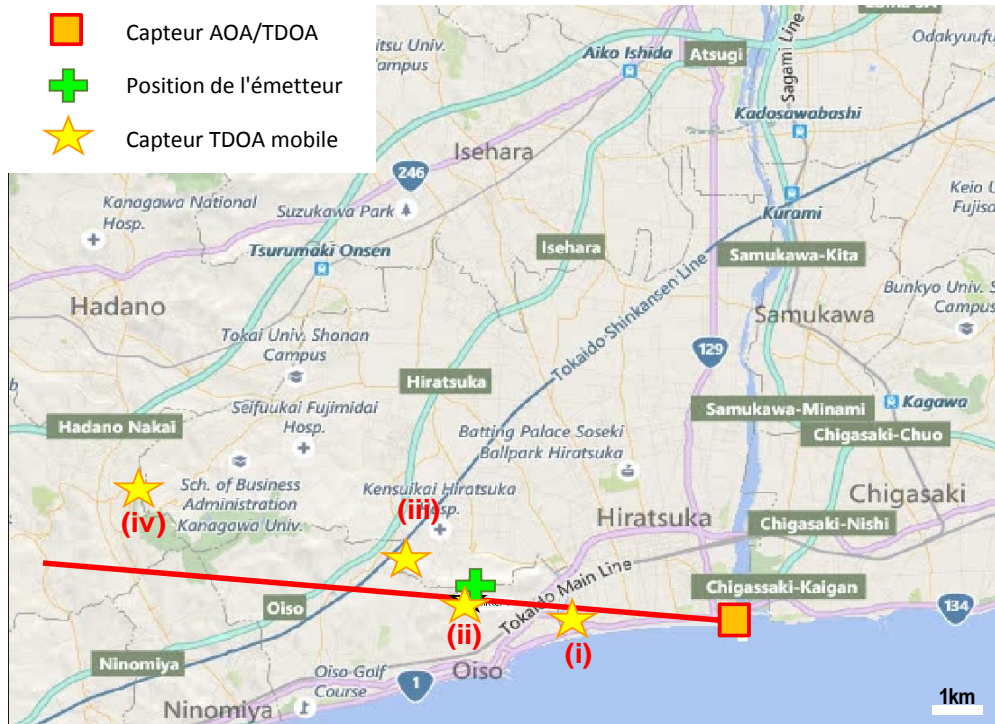
3.2 Utilisation de capteurs TDOA mobiles avec un capteur AOA fixe

Si une ligne de relèvement est obtenue à partir d'un capteur AOA, on peut supposer que l'émetteur est situé le long de la ligne de relèvement. Dans ce cas, on déplace un capteur TDOA mobile sur cette ligne depuis un point proche du capteur AOA, et les hyperboles formées au moyen d'un autre capteur TDOA fixe situé au même endroit que le capteur AOA permettent d'estimer la position de l'émetteur.

Ce principe est illustré dans la Fig. 22.

FIGURE 22

Principe de l'utilisation d'un capteur AOA avec un capteur TDOA mobile



La ligne de relèvement obtenue à partir du capteur AOA est la ligne rouge représentée dans la Fig. 22.

Le capteur TDOA mobile a été déplacé sur la ligne de relèvement depuis un point proche de la position du capteur AOA dans le but d'estimer la position de l'émetteur (de la position (i) à la position (iv), comme indiqué dans les Fig. 23 à 26), et les hyperboles ont été calculées à chaque position.

Les résultats des estimations de la position de l'émetteur avec un capteur AOA et deux capteurs TDOA sont présentés dans les Fig. 23, 24, 25 et 26.

FIGURE 23

Position estimée à l'emplacement (i)

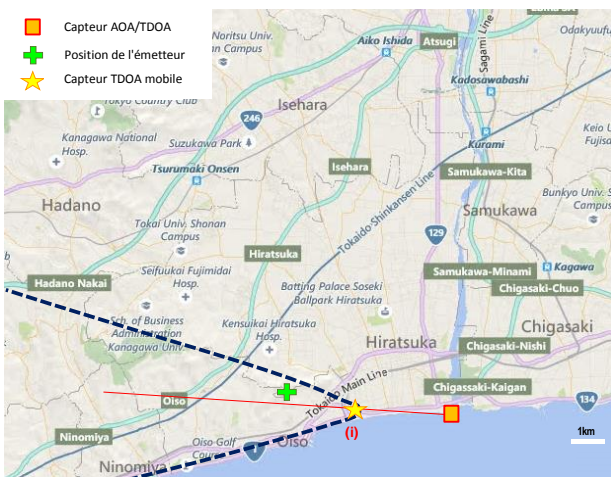


FIGURE 24

Position estimée à l'emplacement (ii)

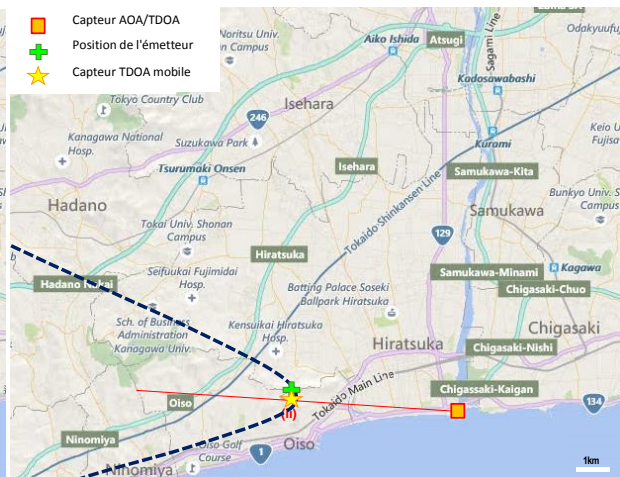


FIGURE 25

Position estimée à l'emplacement (iii)

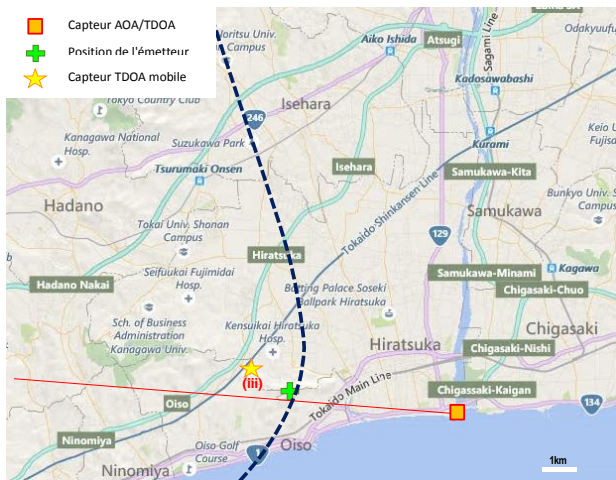
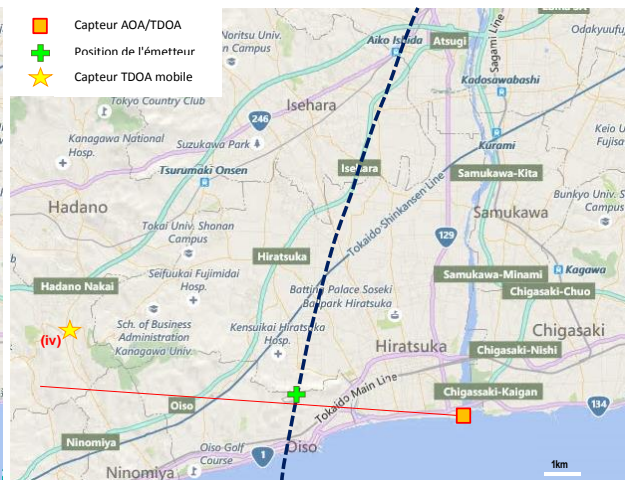


FIGURE 26

Position estimée à l'emplacement (iv)



Le résultat obtenu à l'emplacement (i) ne montre pas une position valide, car le temps de différence calculé était supérieur au temps de transit des ondes radioélectriques entre les capteurs TDOA.

La distance entre les capteurs TDOA sur la Fig. 23 était de 3 kilomètres et le temps de transit des ondes radioélectriques de $10 \mu\text{s}$. Le temps de différence calculé par l'algorithme TDOA était de $9,99 \mu\text{s}$.

Cela signifie que l'émetteur ne pouvait pas être situé entre les deux capteurs, intervalle dans lequel sa position pourrait être déterminée au moyen des capteurs TDOA.

La distance entre les capteurs TDOA sur la Fig. 24 était de 5 kilomètres et le temps de transit des ondes radioélectriques de $16,7 \mu\text{s}$. Le temps de différence calculé par l'algorithme TDOA était de $16,6 \mu\text{s}$.

Les résultats obtenus aux emplacements (iii) et (iv) étaient bons, car la position calculée de l'émetteur se situait systématiquement entre les deux capteurs.

La distance entre les capteurs TDOA sur les Fig. 25 et 26 était respectivement de 6,6 et 12,55 kilomètres, et le temps de transit des ondes radioélectriques de 22 et $41,7 \mu\text{s}$. Le temps de différence calculé par l'algorithme TDOA était de $11,74$ et $8,42 \mu\text{s}$.

4 Conclusion et futurs thèmes d'études

Un système de contrôle TDOA pourrait être complémentaire dans certaines zones où des systèmes AOA ont déjà été déployés.

Dans la présente Annexe, on a montré comment on pouvait utiliser un système de contrôle TDOA conjointement avec un capteur AOA existant. Pour cette utilisation conjointe, plusieurs avantages ont été observés:

- Premier avantage: l'ambiguïté relative à la position estimée d'un émetteur peut être réduite en comparant les résultats obtenus avec les deux systèmes.
- Deuxième avantage: il est possible d'estimer la position de l'émetteur avec un nombre plus faible de capteurs en combinant la ligne de relèvement obtenue avec la méthode AOA et l'hyperbole obtenue avec la méthode TDOA.

- Troisième avantage: même lorsque le réseau physique de capteurs TDOA n'est pas disponible, l'association entre le système AOA et le système TDOA visant à localiser l'émetteur peut être mise en œuvre avec un capteur AOA et deux capteurs TDOA (dont au moins un capteur TDOA mobile).

Les expériences décrites dans la présente Annexe ont été réalisées sans disposer d'une connexion au réseau permanente et sans que des capteurs aient été installés pour le système TDOA.

Le système TDOA mobile ne peut pas recevoir le signal simultanément à chaque position de mesure, mais il fonctionne bien si les hyperboles sont combinées au résultat obtenu avec la technologie AOA et sous réserve qu'elles puissent permettre de localiser l'émetteur.

En outre, des capteurs TDOA supplémentaires permettent d'accroître la robustesse cela peut renforcer la fiabilité des réseaux/stations de contrôle AOA existants.
