

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2270

(06/2013)

**Technologie de visualisation des sources
radioélectriques pour le contrôle du spectre**

Série SM

Gestion du spectre



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Rapports UIT-R

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

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	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, 2014

© UIT 2014

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.2270

**Technologie de visualisation des sources radioélectriques
pour le contrôle du spectre**

(2013)

1 Introduction**1.1 Généralités**

En raison des progrès accomplis au cours des dernières années dans le domaine des technologies de communication hertziennes, les utilisateurs de systèmes de communication hertziens sont de plus en plus nombreux. De plus, les ondes radioélectriques s'utilisent dans une gamme de plus en plus large de produits électroniques généraux. Par conséquent, le nombre de cas de brouillages augmente, en raison de cette utilisation accrue du spectre radioélectrique et de la pénurie de fréquences qui en résulte.

En particulier, les cas de brouillages signalés dans les gammes de fréquences supérieures sont plus nombreux depuis quelques années. De plus, du fait que les dispositifs de communication sont de plus en plus évolués sur le plan de la sensibilité, même une source de brouillage émettant à faible puissance peut considérablement perturber les dispositifs situés alentour.

Le procédé classique d'estimation de l'emplacement d'une source radioélectrique par la méthode de l'angle d'arrivée (AOA, *angle of arrival*), permet de repérer l'emplacement de la source radioélectrique sur une carte en deux dimensions, mais pas d'en déterminer l'altitude.

Par conséquent, cette méthode requiert l'utilisation d'un système de radiogoniométrie portatif dans la zone où se situe, selon les estimations, la source radioélectrique, afin de localiser cette dernière.

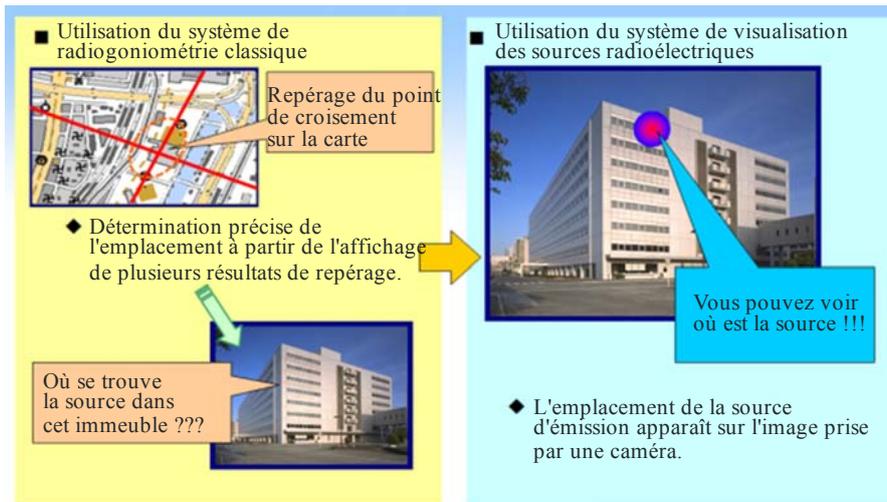
La technologie de visualisation des sources radioélectriques (RAVIT, *radio source visualizing technology*) permet de visualiser à courte distance l'emplacement précis de la source d'émission, et se révèle par conséquent très utile lors de l'étape finale du repérage, qui consiste à déterminer l'emplacement exact de la source radioélectrique, après que la zone où elle se situe a été estimée à l'aide du système de radiogoniométrie classique.

Le présent Rapport décrit l'application de la technologie RAVIT aux activités pratiques de contrôle des émissions radioélectriques, tout en exposant les caractéristiques générales, le principe et le fonctionnement de base de cette technologie. L'exemple d'application proposé s'inscrit dans la perspective des futures activités de contrôle des émissions.

La Fig. 1 présente le contexte d'utilisation de la technologie RAVIT.

FIGURE 1

Contexte d'utilisation de la technologie RAVIT



Rapport SM.2270-01

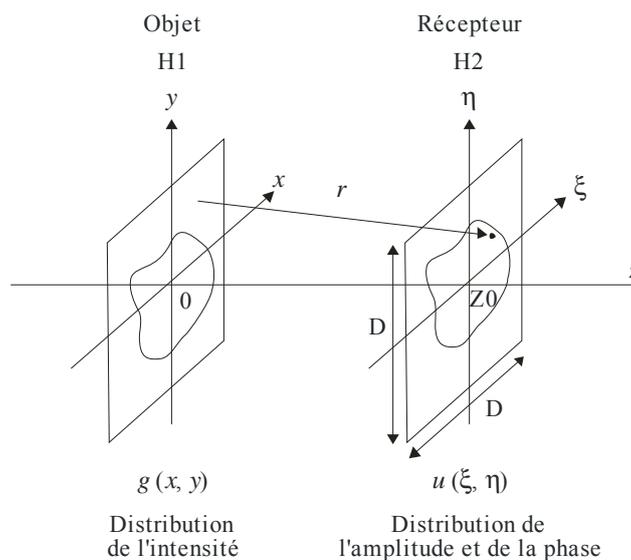
1.2 Principe de visualisation

Le principe et l'équation fondamentale de la méthode d'holographie radioélectrique utilisée dans le cadre de la technologie RAVIT sont donnés dans la Fig. 2.

Dans la Fig. 2, $g(x, y)$ désigne la distribution de l'intensité d'émission dans le plan vertical H1, du côté de l'objet. Si l'onde radioélectrique à deux dimensions (longueur d'onde: λ) est émise selon la verticale, alors la distribution $u(\xi, \eta)$ de la diffraction dans le plan vertical H2, du côté du récepteur, à une distance Z_0 de H1, s'obtient au moyen de la forme (1) de l'intégrale de diffraction de Fresnel-Kirchhoff.

FIGURE 2

Principe de la méthode d'holographie radioélectrique



Rapport SM.2270-02

$$u(\xi, \eta) = \frac{j}{\lambda} \iint g(x, y) \frac{\exp(-jkr)}{r} dx dy \quad (1)$$

Equation fondamentale de l'intégrale de diffraction de Fresnel-Kirchhoff

$$r = \sqrt{z_0^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \quad (2)$$

Lorsque la distance entre le plan de l'objet H1 et le plan du récepteur H2 satisfait aux conditions de champ lointain et aux conditions de Fraunhofer, l'équation (1) peut être transformée comme suit.

Dans l'équation (3), la distribution $u(\xi, \eta)$ de l'amplitude et de la phase du côté du récepteur est donnée par la transformée de Fourier inverse à deux dimensions de la distribution de l'intensité du côté de la source radioélectrique.

$$\begin{aligned} u(\xi, \eta) &= \frac{j}{\lambda \cdot z_0} \exp(-jkz_0) \exp\left(-jk \frac{\xi^2 + \eta^2}{2z_0}\right) \iint g(x, y) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda \cdot z_0} (\xi \cdot x + \eta \cdot y)\right\} dx dy \\ &= \text{const} \cdot \text{Fourier} 2^{-1}[g(x, y)] \end{aligned} \quad (3)$$

où:

- *const* est une constante; et
- *Fourier2*[...] désigne la transformée de Fourier à deux dimensions.

La distribution $g(x, y)$ de l'intensité du signal du côté de l'objet, qu'il est nécessaire de connaître afin d'utiliser la technologie RAVIT, s'obtient en appliquant la transformée de Fourier à l'équation (4).

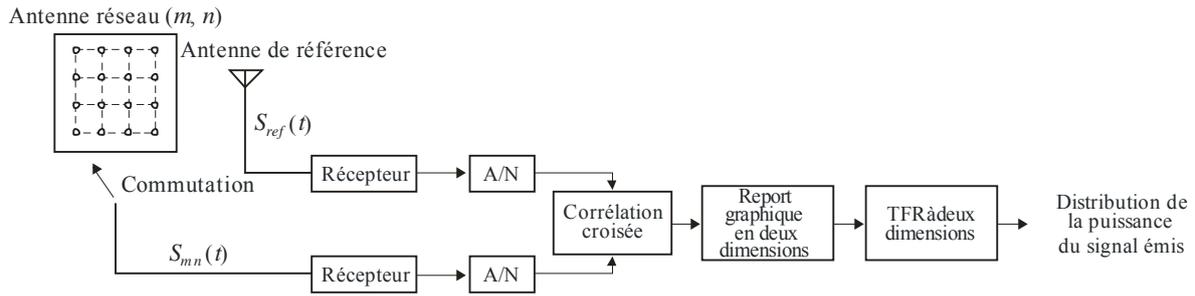
$$g(x, y) = \text{const} \cdot \text{Fourier} 2[u(\xi, \eta)] \quad (4)$$

Dans le système utilisé en pratique, la distribution de l'amplitude et de la phase du côté du récepteur s'obtiennent par la corrélation croisée des données provenant d'une antenne de référence et des divers éléments d'une antenne réseau.

La distribution $u(\xi, \eta)$ de l'amplitude et de la phase du côté du récepteur s'obtient au moyen d'un report graphique en deux dimensions. La distribution de l'intensité de l'onde radioélectrique émise peut alors être visualisée en appliquant au résultat obtenu une transformée de Fourier rapide (TFR). L'algorithme utilisé pour traiter numériquement le signal et calculer la distribution de son intensité est représenté dans la Fig. 3.

FIGURE 3

Algorithme de traitement du signal



$S_{ref}(t)$ Signal reçu par l'antenne de référence

$S_{mn}(t)$ Signal reçu par chaque élément (m, n)

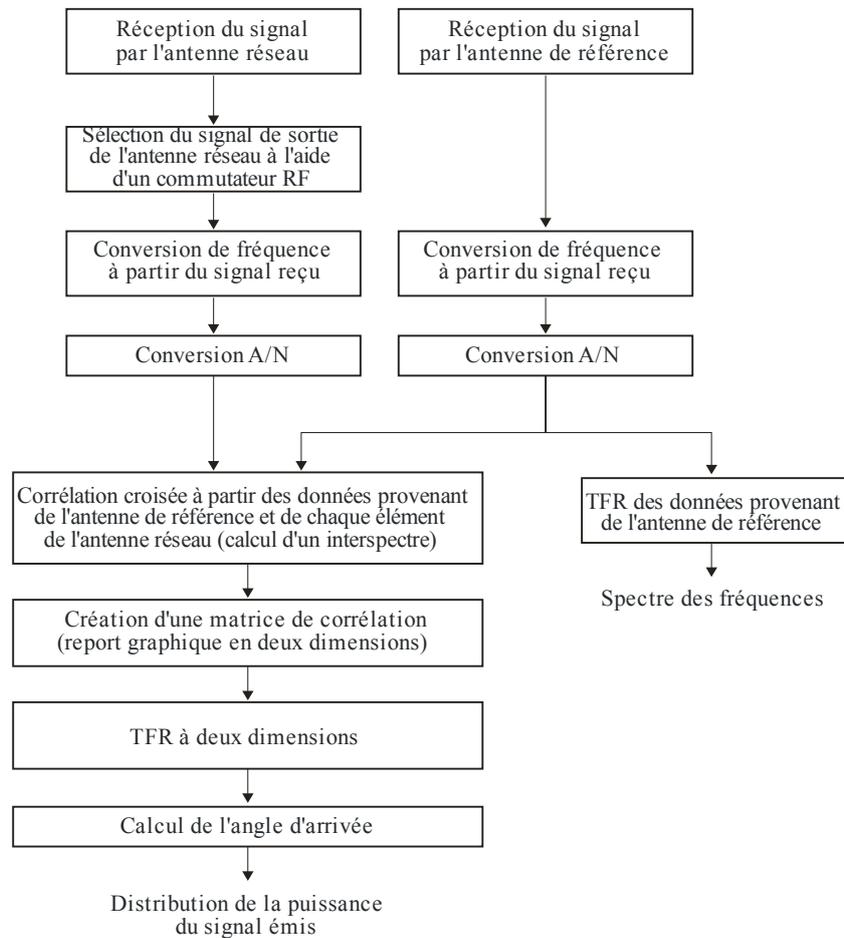
$m = 1, \dots, M \quad n = 1, \dots, N$

Rapport SM.2270-03

La Fig. 4 représente le flux de traitement du signal.

FIGURE 4

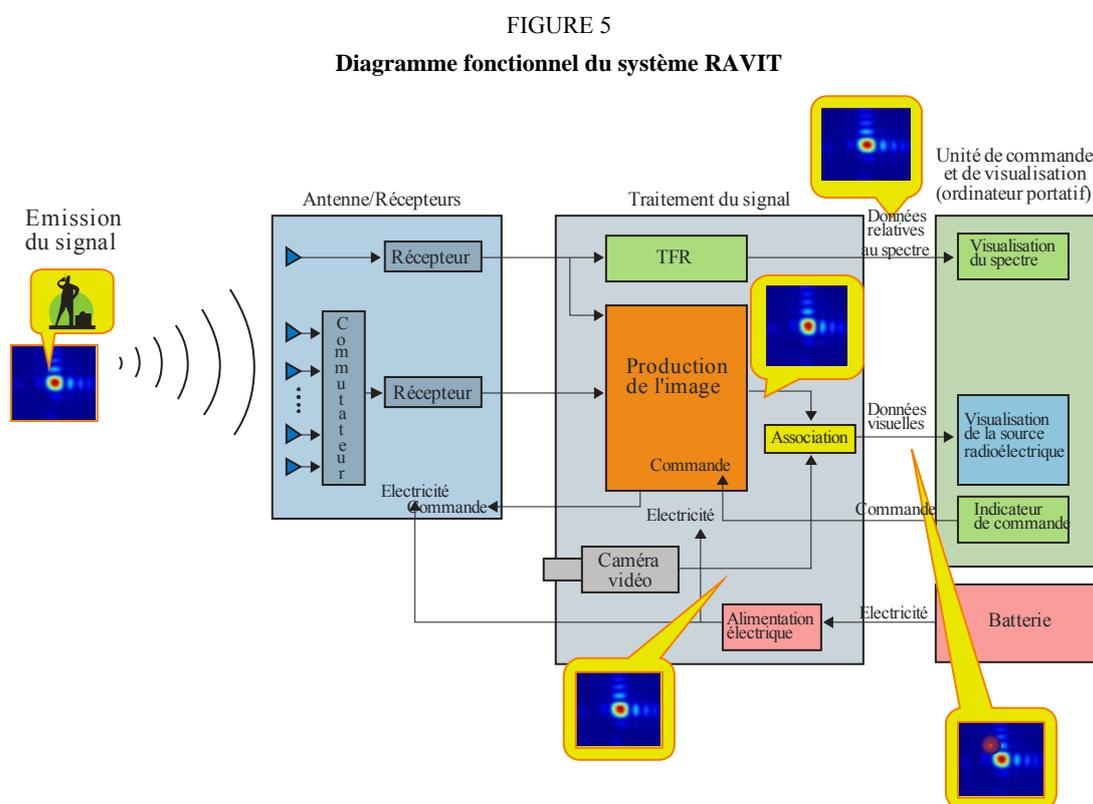
Flux de traitement du signal



Rapport SM.2270-04

1.3 Diagramme fonctionnel du système RAVIT

La Fig. 5 représente le diagramme fonctionnel de l'utilisation pratique de la technologie RAVIT.



Rapport SM.2270-05

Dans le diagramme ci-dessus, le signal émis par la source radioélectrique est reçu au moyen d'une antenne de référence et des divers éléments d'une antenne réseau. Chacun des signaux reçus par cette antenne de référence et ces éléments d'antenne réseau est converti en signal à fréquence intermédiaire (IF) dans le module «antenne/récepteurs», et numérisé à l'aide de convertisseurs A/N.

La gamme de fréquences du récepteur s'étend de la bande d'ondes décimétriques à la bande C, et elle est couverte au moyen de trois modules «antenne/récepteurs».

Dans le module «traitement du signal», des signaux numériques correspondant au spectre de fréquences du signal d'entrée, ainsi qu'à l'image de la distribution de l'intensité de ce signal, sont produits conformément au flux de traitement représenté dans la Fig. 4. L'association de cette image de la distribution de l'intensité du signal à l'image prise par une caméra permet de visualiser la source radioélectrique, qui apparaît à l'écran, de même que le spectre de fréquences.

2 Evaluation basique de la qualité de fonctionnement en chambre anéchoïque

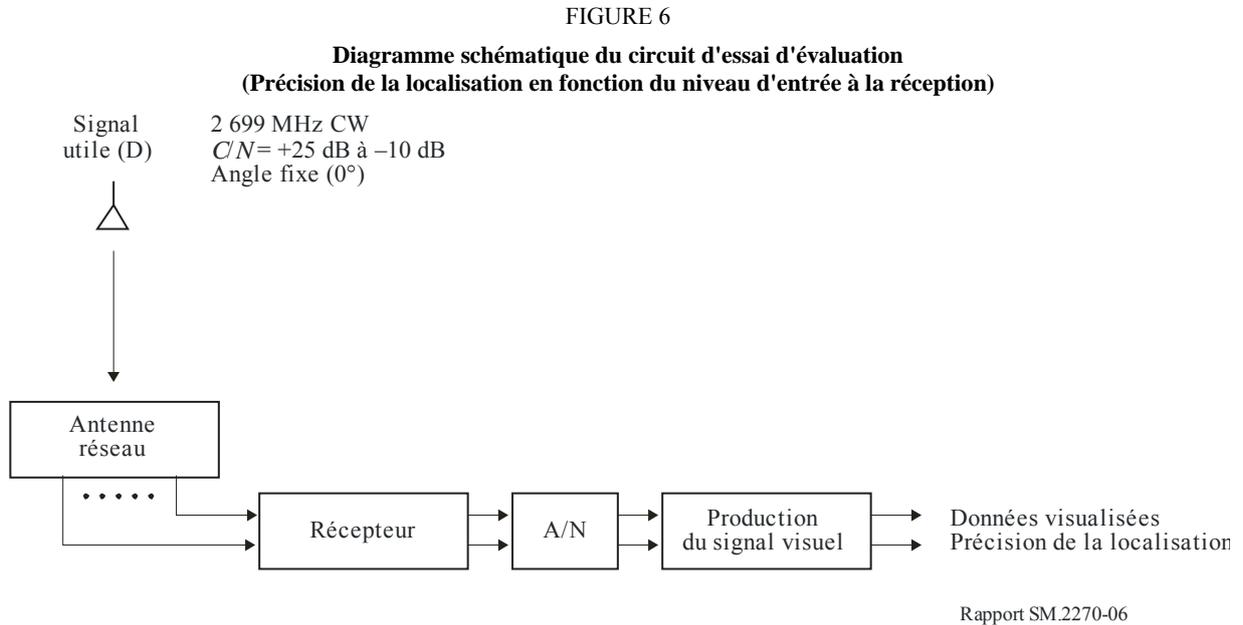
2.1 Principe de l'examen

Pour évaluer les performances de base du système utilisant la technologie RAVIT, la précision de la localisation en fonction du niveau du signal reçu, ainsi que la séparation spatiale à la réception de deux signaux, sont évaluées dans une chambre anéchoïque.

L'évaluation de la précision de la localisation en fonction du niveau du signal reçu a lieu comme suit.

Les données visualisées et la précision de la localisation sont calculées pour différentes valeurs du rapport C/N comprises entre +25 dB et -10 dB.

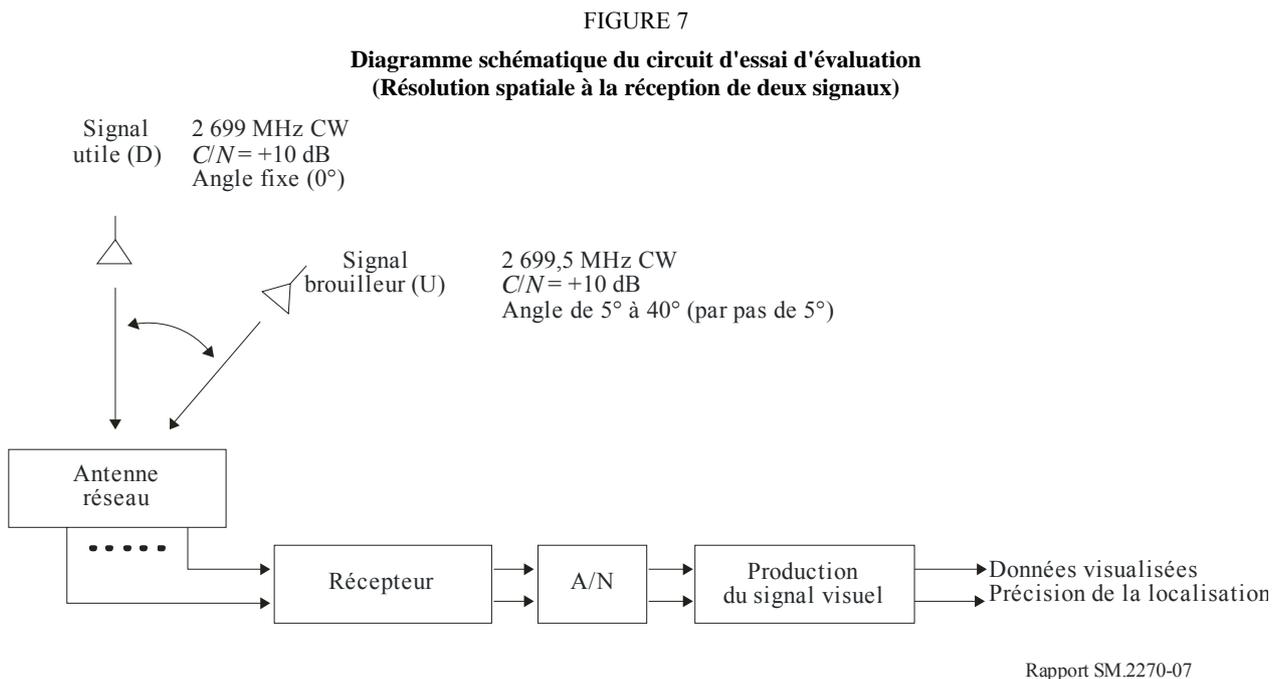
La Fig. 6 représente le diagramme schématique du circuit d'essai d'évaluation.



L'évaluation de la résolution spatiale à la réception de signaux multiples a lieu comme suit.

Deux signaux émis par des sources distinctes sont reçus à l'entrée de l'équipement d'essai, l'angle d'arrivée d'un des deux signaux prenant différentes valeurs entre 5° et 40° . Les emplacements des sources radioélectriques sont calculés et visualisés pour chaque angle d'arrivée considéré.

La Fig. 7 représente le diagramme schématique du circuit d'essai d'évaluation.



2.2 Résultat des essais en chambre anéchoïque

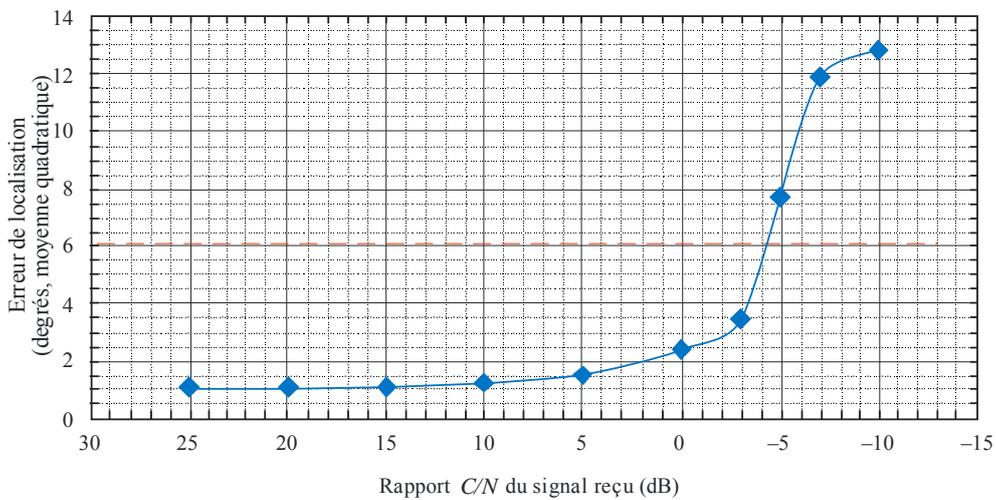
La Fig. 8 représente les résultats du calcul de la précision de localisation du système RAVIT en fonction du niveau d'intensité du signal reçu. Lorsque ce niveau est faible, le bruit thermique du récepteur nuit à la précision de la localisation.

La précision de localisation spécifiée pour le système est de 6° (erreur quadratique moyenne). Elle est atteinte pour un niveau de rapport C/N du signal reçu de -4 dB.

La Fig. 9 représente les résultats obtenus pour chaque niveau de puissance du signal reçu. Les points rouges correspondent aux résultats de la localisation, les points jaunes à l'emplacement effectif de l'antenne émettrice.

FIGURE 8

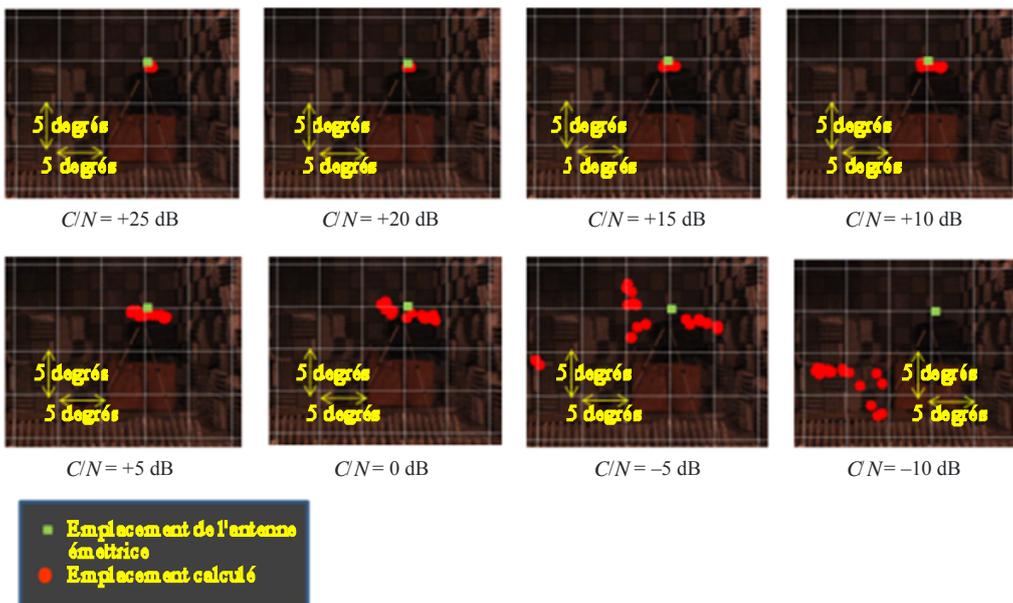
Précision de la localisation en fonction du niveau du signal



Rapport SM.2270-08

FIGURE 9

Précision de localisation du système RAVIT



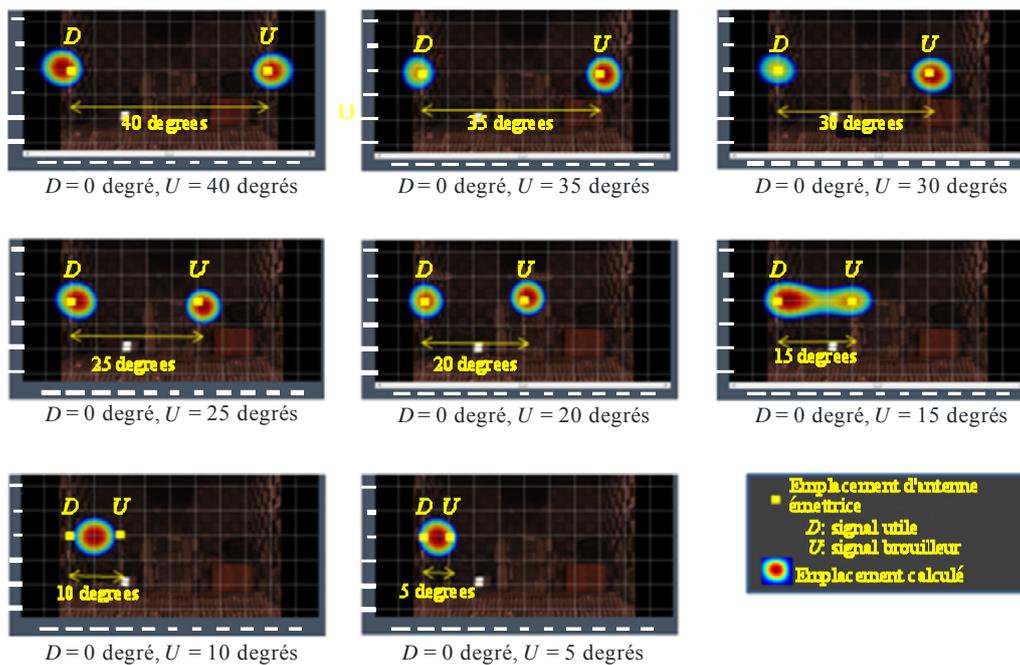
Rapport SM.2270-09

La Fig. 10 représente les résultats des calculs de séparation spatiale effectués à la réception de deux signaux. Les points rouges correspondent aux résultats de la localisation au moyen du système RAVIT, les points jaunes aux emplacements effectifs des deux antennes émettrices.

Lorsque l'angle entre les deux signaux incidents est compris entre 40° et 15° , le système RAVIT est capable de séparer ces deux signaux. Toutefois, lorsque l'angle entre les deux signaux est compris entre 10° et 5° , le système n'est pas en mesure de les séparer, si bien que sur l'écran de visualisation n'apparaît qu'une seule source radioélectrique, située à égale distance des deux antennes émettrices.

FIGURE 10

Résultats des calculs de séparation spatiale à la réception de signaux multiples (deux)



Rapport SM.2270-10

3 Evaluation sur le terrain

3.1 Détection d'un système hertzien (talkie-walkie)

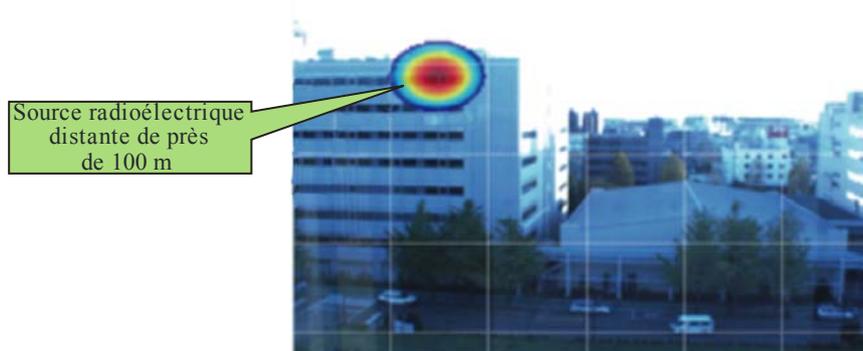
La Fig. 11 permet d'observer comment un système hertzien à usage individuel (talkie-walkie) a pu être détecté depuis une distance de près de 100 mètres. La fréquence d'émission de ce système hertzien était de 900 MHz.

Cette figure illustre le fait que la technologie RAVIT permet d'identifier non seulement le bâtiment d'où proviennent les émissions, mais aussi l'étage auquel se trouve la source radioélectrique.

FIGURE 11

Exemple de visualisation: talkie-walkie

Visualisation d'un système hertzien (talkie-walkie)
émettant dans la bande des 900 MHz



Rapport SM.2270-11

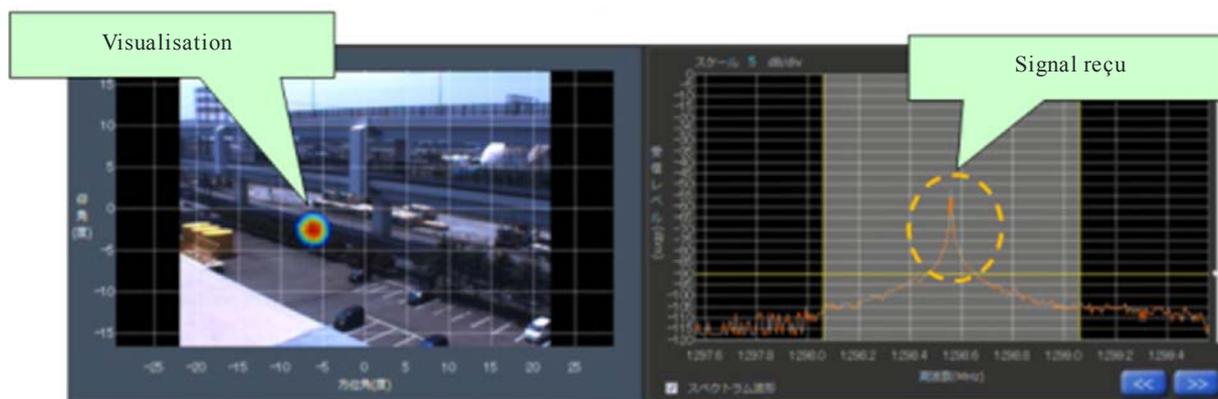
3.2 Détection d'un système hertzien (émetteur radioamateur)

La Fig. 12 montre comment les émissions provenant d'un émetteur radio amateur embarqué à bord d'une voiture a pu être visualisé. Dans ce cas, la source d'émission était relativement proche du point de contrôle, ce qui a permis de repérer clairement l'onde radioélectrique provenant de l'émetteur radioamateur.

FIGURE 12

Exemple de visualisation: système hertzien embarqué à bord d'une voiture

Visualisation d'un système hertzien (émetteur radio amateur)
émettant dans la bande des 1 200 MHz

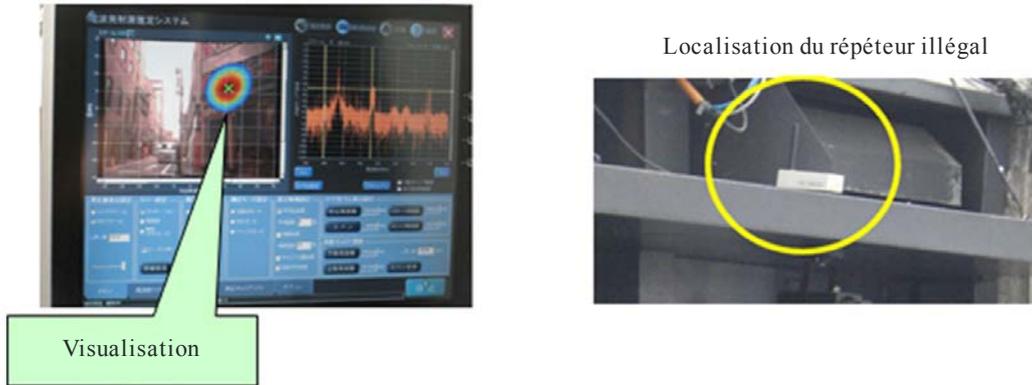


Rapport SM.2270-12

3.3 Détection d'un répéteur illégal d'un système de téléphonie cellulaire

La Fig. 13 montre comment un répéteur illégal se trouvant en centre-ville a pu être détecté. Ce répéteur (entouré en jaune) est installé illégalement et risque de causer des brouillages aux stations de téléphonie cellulaire de base environnantes.

FIGURE 13
Détection d'un répéteur illégal se trouvant en centre-ville
 Détection d'un répéteur illégal
 d'un système de téléphonie cellulaire



Rapport SM.2270-13

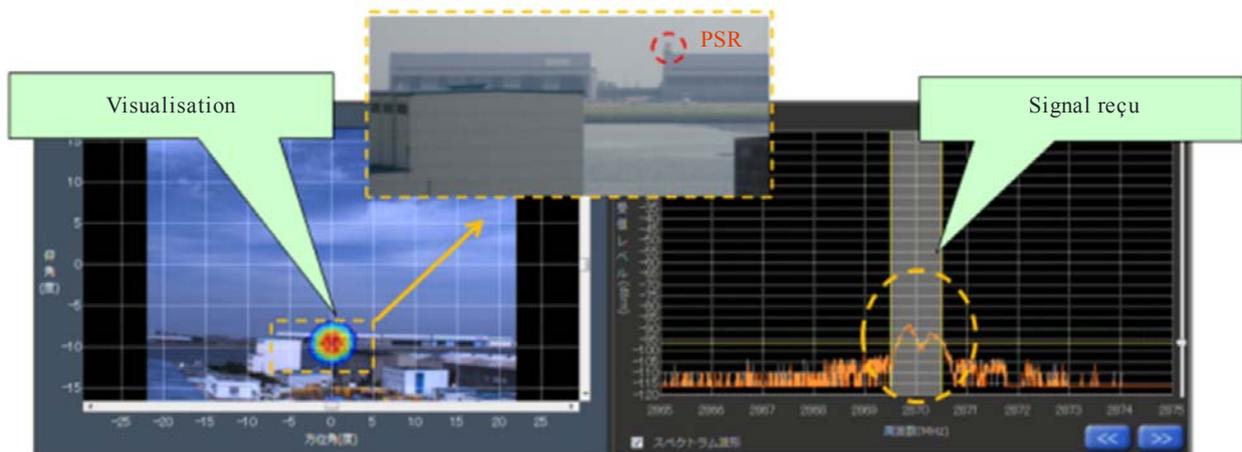
4 Applications futures

4.1 Détection des signaux à impulsions (ondes radar)

La technologie RAVIT permet également de détecter les ondes radioélectriques à impulsions, et devrait donc pouvoir servir à repérer les brouillages causés à des systèmes de communication fonctionnant dans les gammes de hautes fréquences au-dessus de 3 GHz.

L'exemple représenté dans la Fig. 14 est celui de la visualisation des ondes émises par le système de surveillance radar primaire (PSR) de l'aéroport de Tokyo-Haneda. Dans ce cas, l'équipement utilisé pour faire fonctionner la technologie RAVIT est installé sur le toit d'un bâtiment se trouvant à deux kilomètres de l'aéroport, afin de surveiller les ondes émises par ce système PSR.

FIGURE 14
Exemple de visualisation (radar de surveillance primaire)
 Visualisation d'un système radar (PSR)
 émettant dans la bande des 2,7 GHz



Rapport SM.2270-14

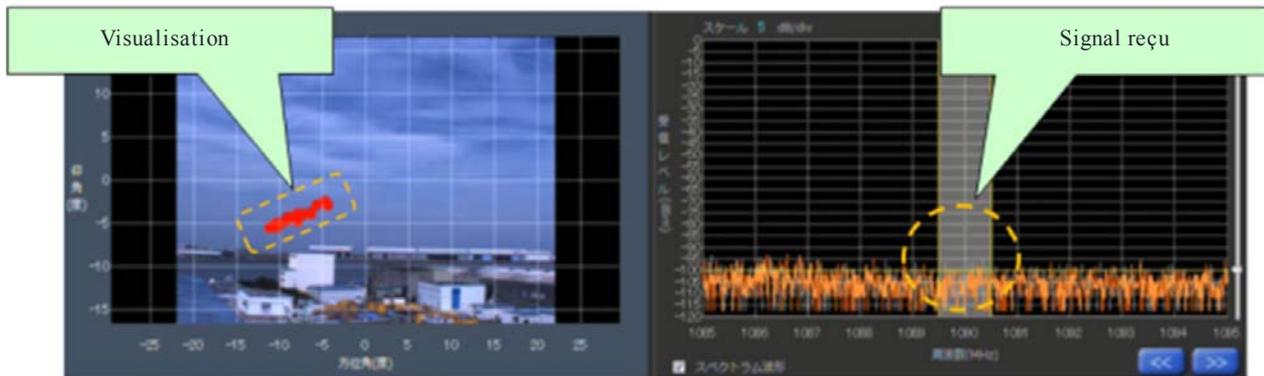
La Fig. 15 représente la visualisation des ondes émises par le transpondeur d'un avion.

Dans cet exemple, le transpondeur d'un avion en cours de décollage envoie des ondes au système de surveillance radar secondaire (SSR) de l'aéroport.

FIGURE 15

Exemple de visualisation (ondes envoyées par le transpondeur d'un avion à un système SSR)

Visualisation d'un système radar (SSR)
émettant à 1 090 MHz



Rapport SM.2270-15

4.2 Application future aux opérations de recherche et de sauvetage

La technologie RAVIT permet de visualiser des signaux radioélectriques provenant d'émetteurs de faible puissance, comme les téléphones cellulaires, et devrait donc pouvoir servir dans l'avenir aux opérations de recherche et de sauvetage.

La Fig. 16 représente des applications futures de cette technologie à des opérations de recherche et de sauvetage.

FIGURE 16

Exemples d'application future à des opérations de recherche et de sauvetage



Détection de l'onde radioélectrique émise par un téléphone cellulaire envoyant un appel à l'aide

Rapport SM.2270-16

5 Conclusion

Au cours des dernières années, le nombre de cas de brouillages a augmenté en raison de l'utilisation accrue de sources radioélectriques et de la pénurie de fréquences qui en résulte.

La technologie RAVIT permet de calculer et de visualiser avec précision l'emplacement des sources d'émission, et constitue donc un moyen efficace de repérer rapidement les sources de brouillages.

En outre, elle pourra servir dans l'avenir à des opérations de recherche et de sauvetage.