

RECOMMANDATION UIT-R M.1177*

**TECHNIQUES À UTILISER POUR LA MESURE DES RAYONNEMENTS
NON ESSENTIELS DES SYSTÈMES RADAR MARITIMES**

(Question UIT-R 202/8)

(1995)

Résumé

L'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications (RR) spécifie les valeurs maximales des rayonnements non essentiels des émetteurs radioélectriques exprimées aussi bien en puissance moyenne relative qu'en puissance moyenne absolue, mais ces limites ne s'appliqueront au service de radiorepérage que lorsque des méthodes de mesure acceptables existeront.

Cette Recommandation fournit des techniques pour la mesure des rayonnements non essentiels des radars maritimes.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les stations aussi bien fixes que mobiles du service de radiorepérage font une large utilisation de bandes adjacentes à d'autres services ou en relation harmonique avec eux;
- b) que des stations dans d'autres services sont sensibles aux brouillages de stations radar ayant des rayonnements non essentiels avec des niveaux élevés de puissance de crête;
- c) que de nombreux services ont adopté ou projettent d'adopter des systèmes à modulation numérique qui sont plus sensibles aux brouillages par les rayonnements non essentiels des radars;
- d) que suivant les conditions figurant des § a) à c), une station radar dont les rayonnements non essentiels ont des niveaux élevés de puissance de crête peut causer des brouillages à des stations d'autres services;
- e) que l'Appendice 8 du RR spécifie les valeurs maximales des rayonnements non essentiels des émetteurs radioélectriques exprimées aussi bien en puissance moyenne relative qu'en puissance moyenne absolue, mais ces limites ne s'appliqueront au service de radiorepérage que lorsque des méthodes de mesure acceptables existeront;
- f) que les techniques de mesure des rayonnements non essentiels des radars pour assurer la compatibilité avec d'autres services requièrent la capacité de mesurer des niveaux de l'ordre de 130 dB au-dessous de l'émission fondamentale du radar;
- g) qu'il est souhaitable de posséder la capacité de mesurer les rayonnements non essentiels s'élevant jusqu'à 18 GHz,

recommande

- 1** d'utiliser les techniques de mesure décrites dans l'Annexe 1 pour quantifier les niveaux des rayonnements non essentiels des stations radars maritimes.

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de l'Organisation maritime internationale (OMI), de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), du Comité international radiomaritime (CIRM) et de l'Organisation mondiale de météorologie (OMM) et des Commissions d'études 1, 4 et 9 des radiocommunications.

ANNEXE 1

1 Introduction

Des techniques ont été élaborées pour répondre au § 1 de la Question UIT-R 202/8. Deux techniques, connues comme les méthodes directe et indirecte, sont recommandées.

La méthode de mesure directe permet de mesurer avec précision les rayonnements non essentiels des radars de façon à éviter les mesures en des points intermédiaires des systèmes radar. De tels radars comprennent, par exemple, ceux qui utilisent des réseaux à répartition d'émetteurs construits dans la structure d'antenne (ou qui la comprennent effectivement).

La méthode indirecte est celle où les composants du système radar sont mesurés séparément et ensuite les résultats sont combinés. La division recommandée du radar sépare le système après le point rotatif (Ro-Jo) et permet ainsi de mesurer le spectre de sortie de l'émetteur au terminal de sortie du Ro-Jo et de la combiner avec les caractéristiques mesurées du gain d'antenne.

L'expérience en ce qui concerne ces techniques a mis en évidence une répétabilité de ± 2 dB à une fréquence donnée quelconque lorsque la mesure d'un radar particulier quelconque est réeffectuée dans des conditions agréées fixées des paramètres de la mesure.

2 Largeur de bande du système de mesure et paramètres du détecteur

Largeur de bande à fréquence intermédiaire	$\leq$	$(1/T)$ pour les radars à fréquence fixe, à impulsions non codées, où T est la durée de l'impulsion. (Par exemple, si la durée de l'impulsion radar est 1 μ s, la largeur de bande mesure FI doit être $\leq 1/(1 \mu\text{s}) = 1$ MHz.)
	$\leq$	$(1/t)$ pour les radars à fréquence fixe à impulsions codées en phase, où t est la durée de l'élément de phase. (Par exemple, si le radar émet des impulsions de 26 μ s, chaque impulsion étant constituée de 13 éléments codés en phase d'une durée de 2 μ s, la largeur de bande de mesure FI doit être $\leq 1/(2 \mu\text{s}) = 500$ kHz.)
	$\leq$	$(B/T)^{1/2}$, pour les radars à balayage de fréquence (MF ou à compression d'impulsion), où B est la gamme du balayage de fréquence pendant chaque impulsion et T est la durée de l'impulsion. (Par exemple, si les balayages du radar (fluctuations) sont dans la gamme de fréquences de 1 250 à 1 280 MHz (= 30 MHz de spectre) pendant chaque impulsion et si la durée de l'impulsion est 10 μ s, la largeur de bande de mesure FI doit être $\leq ((30 \text{ MHz})/(10 \mu\text{s}))^{1/2} = \sqrt{3} \approx 1,73$ MHz.)
Largeur de bande vidéo	$\geq$	largeur de bande FI du système de mesure.
Détecteur:		crête positive.

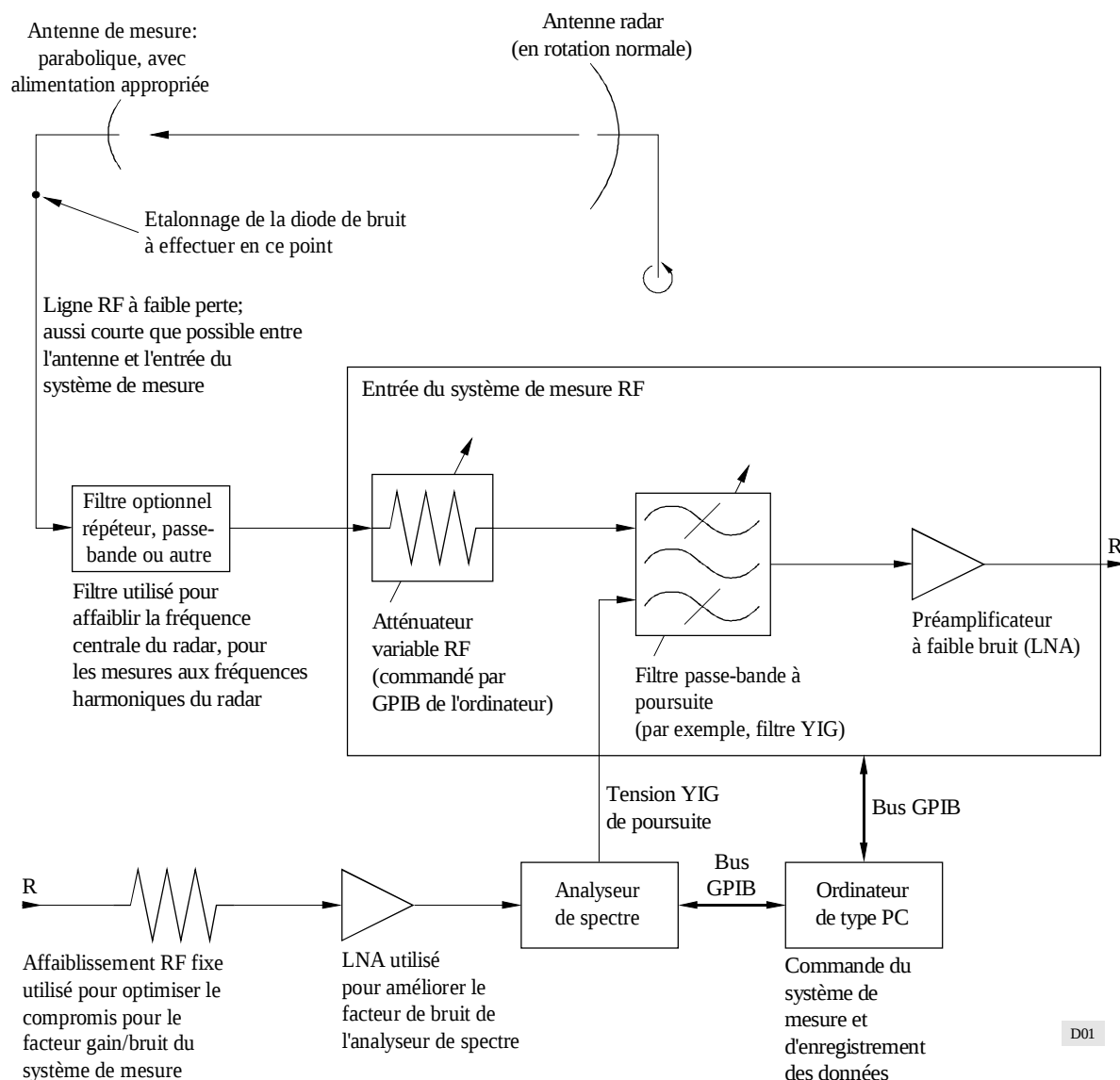
3 Méthode directe

3.1 Matériel et logiciel de mesure

Un diagramme par blocs du type de système de mesure nécessaire pour cette méthode apparaît dans la Fig. 1. Le premier élément du système est l'antenne de réception. Cette antenne doit habituellement avoir une réponse en fréquence à large bande, au moins aussi large que la gamme de fréquences à mesurer. Une réponse à grand gain (comme celle fournie par un réflecteur parabolique) est aussi habituellement souhaitable. La valeur élevée du gain autorise une plus grande gamme dynamique dans les mesures résultantes et l'étroitesse de la largeur du faisceau permet une discrimination par rapport à d'autres signaux dans la zone. La polarisation de l'alimentation de l'antenne est choisie pour maximiser la réponse au signal radar. La polarisation circulaire de l'alimentation est un bon choix pour les cas où la polarisation du radar n'est pas connue *a priori*. Une longueur de câble RF à faibles pertes (qui varieront suivant les conditions géométriques sur chaque site de mesure) relie l'antenne à l'entrée RF du système de mesure. Comme les pertes dans cette portion de ligne atténuent le signal radar reçu, il est souhaitable de rendre cette longueur de ligne aussi courte que possible.

FIGURE 1

**Diagramme par blocs pour la mesure des rayonnements non essentiels
rayonnés des radars en utilisant la méthode directe**



D01

L'entrée RF est constituée de trois éléments: un atténuateur variable RF, un filtre passe-bande accordable en fréquence (mentionné ici comme un présélecteur) et un amplificateur à faible bruit (LNA). Chacun de ces trois éléments doit avoir une réponse en fréquence au moins aussi large que la gamme de fréquences à mesurer. L'atténuateur RF produit un affaiblissement variable (par exemple, 0-70 dB) par pas fixes (par exemple, 10 dB/pas de l'atténuateur). L'utilisation de cet atténuateur pendant la mesure étend la gamme dynamique instantanée du système de mesure jusqu'au montant maximal de l'affaiblissement disponible (par exemple, 70 dB pour un atténuateur 0-70 dB). En principe, cet atténuateur pourrait être commandé manuellement, mais en pratique, sa commande par un ordinateur est bien plus commode (voir ci-après).

Le présélecteur protège le système de mesure d'un comportement non linéaire résultant de la puissance élevée sur la fréquence fondamentale du signal radar, le système de mesure étant accordé sur des signaux à puissance relativement faible sur des fréquences lointaines du spectre des rayonnements non essentiels (par exemple, lorsque la fréquence centrale du radar est 3 050 MHz et que le système de mesure est accordé sur 4 800 MHz). Ce filtre pourrait, en principe, être accordé manuellement. Toutefois, de même que pour l'atténuateur, la commande automatique est beaucoup plus commode, soit par un ordinateur soit par une tension analogique dépendant de la fréquence d'accord de l'analyseur de spectre.

L'élément final dans l'entrée RF est un LNA. Un LNA figurant comme l'élément suivant dans le chemin du signal après le présélecteur améliore le facteur de bruit du restant du système de mesure (par exemple: une longueur de ligne de transmission et un analyseur de spectre). Des valeurs types du facteur de bruit de l'analyseur de spectre sont 25-45 dB et les pertes en ligne de transmission peuvent être typiquement 5-10 dB, selon la qualité et la longueur de la ligne. L'utilisation d'un LNA après le présélecteur (et si nécessaire un LNA en cascade à l'entrée de l'analyseur de spectre) peut réduire le facteur de bruit global de tout le système de mesure à environ 10-15 dB.

On peut utiliser n'importe quel analyseur de spectre pouvant recevoir des signaux dans la gamme de fréquences intéressée et pouvant être commandé par ordinateur pour mettre en œuvre l'algorithme de variation pas à pas de la fréquence. Ainsi que noté plus haut, le facteur de bruit élevé des analyseurs de spectre couramment disponibles doit être amélioré par une préamplification à faible bruit s'il est nécessaire que la mesure dispose de la sensibilité nécessaire à l'observation de la plupart des rayonnements non essentiels.

Le système de mesure peut être commandé par tout ordinateur disposant d'interface bus (GPIB) compatible avec l'équipement utilisé. En matière de mémoire et de rapidité, les ordinateurs de type PC (80386 ou UCT plus élevée) sont tout à fait adéquats. L'algorithme de mesure (qui pilote le pas de variation en fréquence de l'analyseur de spectre et le présélecteur et commande l'atténuateur variable d'entrée) doit être mis en œuvre par le logiciel. Il se peut que certains logiciels disponibles dans le commerce combleront presque complètement les besoins dans ce domaine mais il est probable que l'organisation qui procède aux mesures aura à écrire au moins en partie son logiciel de mesure propre.

Les données peuvent être enregistrées sur le disque dur de l'ordinateur ou sur un disque amovible. Idéalement un enregistrement de données est fait tous les 100-200 pas de mesure, de façon à conserver une taille des fichiers de données permettant leur traitement et à prévenir la perte d'une quantité excessive de données si l'ordinateur du système de mesure devenait défaillant pendant la mesure.

3.2 Etalonnage du système de mesure

Le système de mesure est étalonné en déconnectant l'antenne du reste du système et en plaçant une diode de bruit en ce point. Une diode à rapport de bruit en excès (ENR) de 25 dB devrait être plus que suffisante pour effectuer un étalonnage satisfaisant en admettant que le facteur de bruit global du système est inférieur à 20 dB. La technique est la méthode standard en Y avec des mesures comparatives de puissance effectuées dans tout le spectre une fois avec la diode de bruit en service et une fois avec la diode de bruit hors service.

L'étalonnage par diode de bruit permet d'établir un tableau des facteurs de bruit et des corrections du gain dans toute la gamme du spectre à mesurer. Les corrections du gain peuvent être stockées dans une table de recherche et on les applique aux données de mesure au moment où elles sont collectées.

L'antenne de mesure n'est pas normalement étalonnée sur le terrain. Des facteurs de correction pour l'antenne (s'il y en a) sont appliqués dans l'analyse succédant aux mesures.

3.3 Conduite des mesures

En plus des paramètres figurant au § 2, l'analyseur de spectre doit être réglé comme suit:

Fréquence centrale de l'analyseur de spectre:	fréquence la plus basse à mesurer. (Par exemple, si la fréquence centrale du radar est 3 050 MHz mais que le spectre doit être mesuré sur 2-6 GHz, la fréquence centrale initiale de l'analyseur de spectre serait 2 GHz.)
Excursion de fréquence de l'analyseur de spectre	= 0 Hz. (L'analyseur est utilisé comme instrument à variation dans le domaine temps.)
Temps de balayage de l'analyseur de spectre	> l'intervalle de rotation du faisceau radar. (Par exemple, si le radar tourne à 40 tours par minute, ou 1,5 s/tour, le temps de balayage doit être > 1,5 s. Deux secondes serait un choix raisonnable.)

L'antenne du radar étant en balayage normal et le système de mesure étant réglé comme il est décrit ci-dessus, le premier point de données est noté. Un point de données consiste en une paire de nombres: le niveau de puissance mesuré et la fréquence à laquelle le niveau de puissance a été mesurée. Par exemple, le premier point de données dans la mesure qui précède pourrait être -93 dBm à 2 000 MHz. Le point de données est noté en pilotant l'émission radar à la fréquence désirée, avec une excursion de fréquence de 0 Hz, pendant un intervalle légèrement plus long que la rotation du radar.

Cette représentation dans le temps de la rotation du faisceau radar figurera sur l'écran de l'analyseur de spectre. Le point le plus élevé de la trace représentera normalement la puissance reçue alors que le faisceau radar était dirigé dans la direction du système de mesure. Cette valeur maximale de la puissance reçue est recueillie (habituellement par l'ordinateur de commande, bien qu'elle puisse être notée manuellement), elle est corrigée en ce qui concerne le gain du système de mesure à cette fréquence et enregistrée (habituellement dans un fichier de données ou un disque magnétique).

Le deuxième point de mesure est pris en effectuant l'accord du système de mesure sur la fréquence suivante à mesurer. Cette fréquence est de façon optimale égale à la première fréquence mesurée, augmentée de la largeur de bande de mesure (par exemple, si la première mesure était à 2 000 MHz et la largeur de bande de mesure de 1 MHz, la seconde fréquence mesurée serait 2 001 MHz). A cette seconde fréquence, la procédure est répétée: mesurer la puissance maximale reçue pendant l'intervalle de rotation du faisceau radar, corriger la valeur en fonction du ou des facteurs de gain et noter le point de données correspondant.

Cette procédure qui consiste à parcourir le spectre pas à pas (plutôt que balayer) est poursuivie jusqu'à ce que le spectre d'émission désiré soit parcouru entièrement.

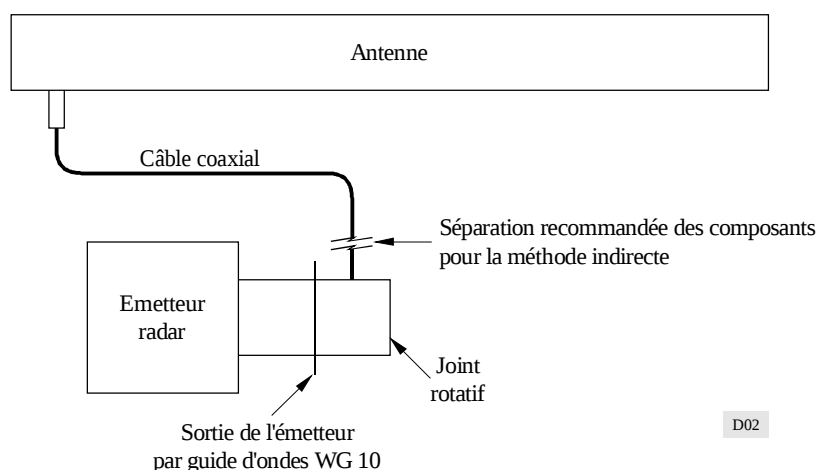
La technique pas à pas permet aussi l'insertion d'affaiblissement RF à l'entrée du système de mesure lorsque les fréquences approchent la fréquence centrale (ou toute autre crête) du spectre radar. Cette possibilité d'ajouter de l'affaiblissement en fonction d'un critère de sélection de fréquence permet d'étendre la gamme dynamique disponible pour la mesure jusqu'à environ 130 dB si un atténuateur RF 0-70 dB est utilisé avec un système de mesure possédant 60 dB de gamme dynamique instantanée. Ceci est un grand avantage pour identifier des rayonnements non essentiels de puissance relativement faible. Pour obtenir le même résultat dans une mesure à balayage de fréquence, il serait possible d'introduire un filtre réjecteur à la fréquence centrale du radar, mais il n'y aurait pas de moyen pratique d'insérer un filtre réjecteur sur toutes les autres crêtes de grande amplitude qui pourraient se présenter dans le spectre.

Il est **extrêmement important** d'effectuer un filtrage de bande adéquat à l'entrée du système de mesure de sorte que les fortes composantes du signal de fréquences lointaines ne perturbent pas la mesure des composantes non essentielles de faible puissance.

4 Méthode indirecte

La Fig. 2 illustre une séparation des composants recommandée pour la méthode indirecte.

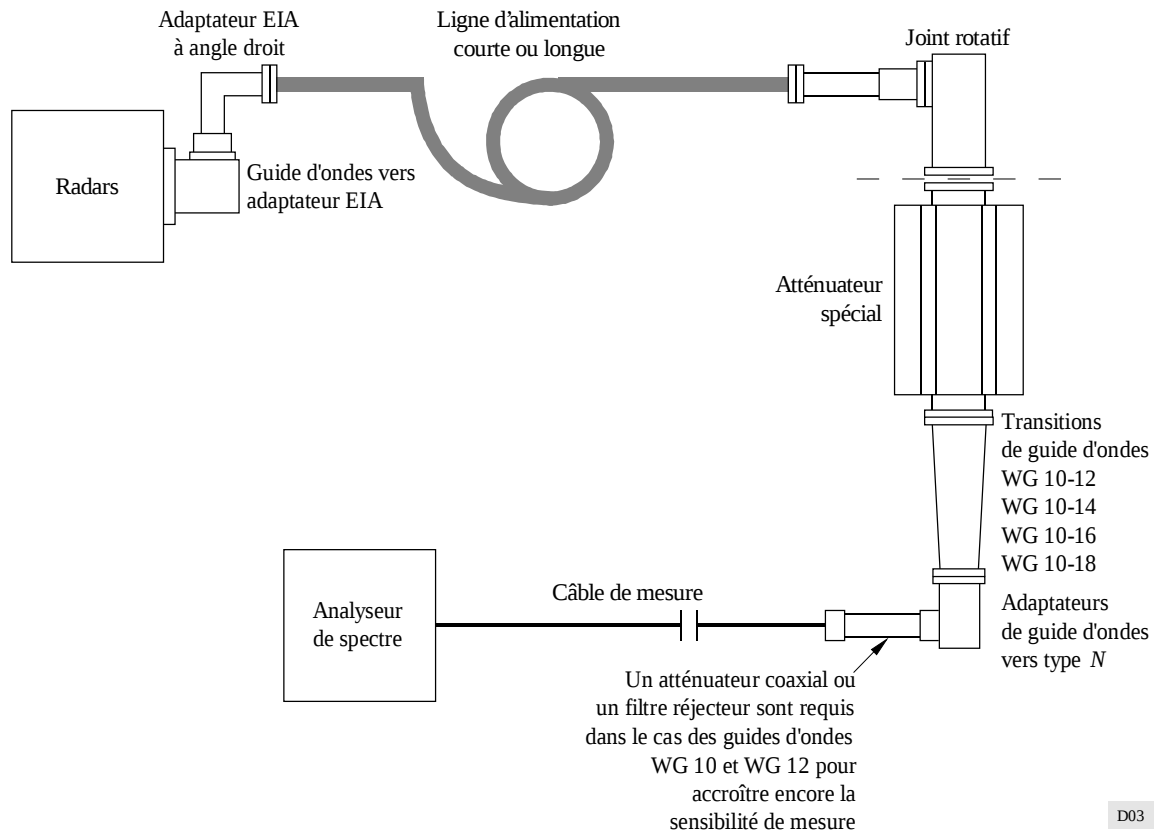
FIGURE 2
Système type de radar



4.1 Mesure de la puissance de l'émetteur

La disposition recommandée type pour mesurer le spectre de puissance de l'émetteur est dans la Fig. 3.

FIGURE 3
Mesure à l'accès du joint rotatif



D03

Pour mesurer des niveaux d'émission faible en présence de l'impulsion principale transmise, de l'ordre peut-être de 60 kW de puissance de crête, cette méthode utilise un filtre réjecteur fixe. Celui-ci comprend un guide d'ondes rectiligne WG 10 avec des éléments absorbants qui affaiblissent le signal fondamental ($\sim 3,05$ GHz) de 17 dB environ avec un affaiblissement minimal sur les autres fréquences. Cet atténuateur est aussi conçu spécialement pour fonctionner en mode TE_{10} de l'ordre le plus bas. Pour obtenir l'affaiblissement complémentaire requis pour la protection de l'équipement de mesure et pour mesurer les fréquences plus élevées, des répartiteurs linéaires progressifs pour guide d'ondes sont utilisés à la sortie du filtre réjecteur.

Le répartiteur progressif pour guide d'ondes est un filtre passe haut de sorte qu'il rejette en les réfléchissant vers l'arrière, les signaux au-dessous de la fréquence de coupure. Si un répartiteur progressif avait été utilisé directement au terminal de sortie d'un émetteur radar, la fondamentale aurait été réfléchi vers l'arrière dans l'émetteur, mais en raison des répartiteurs progressifs les signaux réfléchis auraient été absorbés une seconde fois. De cette façon, la perte sur le retour à la fréquence fondamentale est 34 dB, ce qui est suffisamment faible pour éviter un décalage en fréquence du magnétron. Les fréquences au-dessus de la coupure sont transmises à travers les transitions jusque dans l'équipement de mesure.

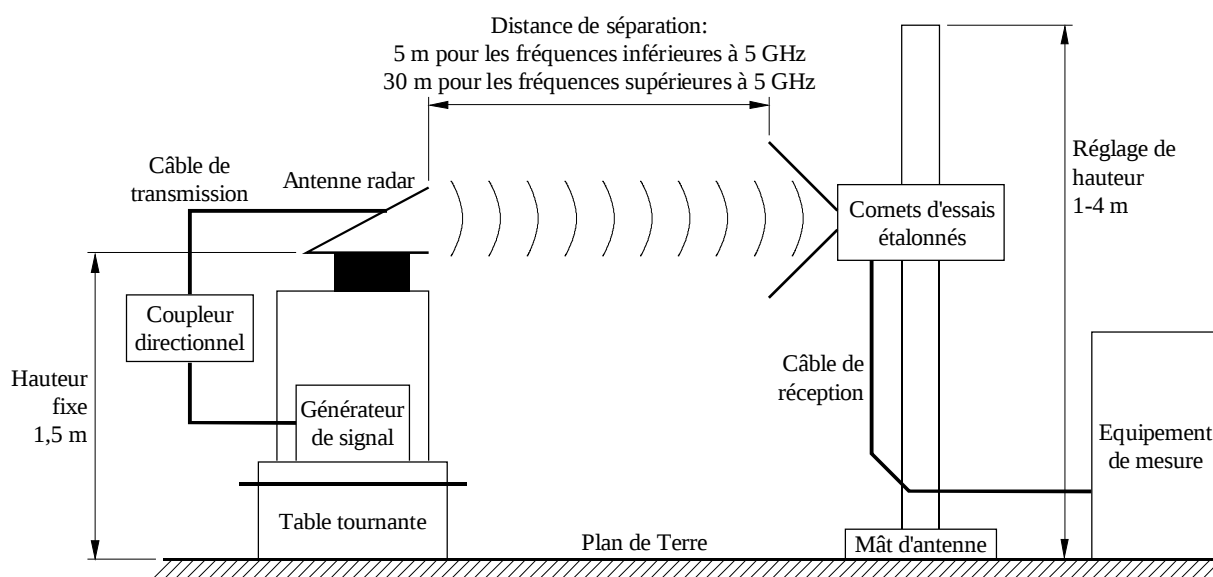
La technique de mesure comprend une recherche exploratoire de la bande de fréquences intéressée pour localiser et marquer selon leur fréquence les sorties de composantes non essentielles significative, suivie par un retour à chacune d'elles pour des mesures d'amplitude détaillées dans une largeur de bande de 1 MHz et des mesures de fréquence. De sorte que le spectre mesuré n'est pas continu mais comprend un groupe de raies d'émission à des fréquences discrètes.

4.2 Mesure du gain d'antenne

La méthode indirecte recommande que les mesures de champ proche soient effectuées sur l'antenne en un «site d'essai en terrain dégagé» à des distances de 5 et 30 m. Des «facteurs de correction» sont ensuite utilisés pour que les mesures s'appliquent au gain d'un champ éloigné équivalent. Une disposition type apparaît dans la Fig. 4.

FIGURE 4

Dispositif pour mesure de gain en champ proche à des distances de 5 m et 30 m



D04

Les mesures sont effectuées par pas types de 0,2 GHz dans la gamme de fréquences 2-18 GHz avec des mesures sur des fréquences particulières pour saisir des harmoniques spécifiques et des modes connus. Sur chaque fréquence, le gain maximal mesuré de l'antenne en essais est trouvé en faisant tourner l'antenne en azimut et en faisant mouvoir en haut et en bas le cornet d'essai.

Pour obtenir une corrélation acceptable entre le gain de champ éloigné et de champ proche, une distance de 5 m doit être utilisée à des fréquences au-dessous de 5 GHz et 30 m pour les fréquences au-dessus de 5 GHz.

Les calculs pour obtenir le gain de champ éloigné équivalent (G_a) de l'antenne en essais à partir d'un niveau mesuré S sont donnés par:

$$G_a = M - P_i + G_c - G_0$$

avec:

$$M = S - G_r + K$$

où:

G_a : gain en champ éloigné de l'antenne en essais (dBi)

M : p.i.r.e (dBm)

P_i : puissance à l'entrée de l'antenne en essais (dBm)

G_c : facteur de correction (dB) du gain pour corriger le front d'onde sphérique du champ propre par rapport à un front d'onde plan. Ceci est fonction de la fréquence et de la taille d'antenne. Des valeurs types pour une antenne de 3,6 m sont 15 dB à une distance de 5 m à des fréquences au-dessous de 5 GHz et 12 dB à une distance de 30 m et des fréquences au-dessus de 5 GHz

G_0 : facteur de correction (dB) en fonction de l'onde réfléchie sur le sol du site d'essai en terrain dégagé (6 dB)

S : niveau mesuré (dBm)

G_r : gain du cornet d'essai de l'antenne de réception (dBi)

$K = 20 \log (4\pi d/\lambda)$ dB

où:

d : distance de mesure (m)

λ : longueur d'onde de sondage (m).