

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R M.1177-3
(06/2003)

Techniques à utiliser pour la mesure des rayonnements non désirés des systèmes radar

Série M

**Services mobile, de radiorepérage et d'amateur
y compris les services par satellite associés**



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 Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/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
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

***Note:** Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique
Genève, 2010

© UIT 2010

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.

RECOMMANDATION UIT-R M.1177-3^{*,**}**Techniques à utiliser pour la mesure des rayonnements non désirés des systèmes radar**

(Question UIT-R 202/5)

(1995-1997-2000-2003)

Champ d'application

La présente Recommandation propose deux techniques de mesure des rayonnements non désirés émis par les radars, à utiliser pour mesurer soit les limites des rayonnements non essentiels fixés dans l'Appendice 3 (Section II) du Règlement des radiocommunications (RR), soit le niveau des rayonnements non désirés relevant du domaine hors bande.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les stations fixes ou mobiles du service de radiopérage sont largement exploitées dans des bandes adjacentes à celles d'autres services ou en relation harmonique avec elles;
- b) que des stations d'autres services sont sensibles aux brouillages de stations radar ayant des rayonnements non désirés de forte 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 désirés des radars;
- d) que suivant les conditions des points 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 la Recommandation UIT-R SM.329 spécifie les valeurs maximales des rayonnements non désirés dans le domaine des rayonnements non essentiels des émetteurs radioélectriques;
- f) que la Recommandation UIT-R SM.1541 spécifie les limites générales des rayonnements non désirés dans le domaine hors bande,

recommande

- 1 d'utiliser les techniques de mesure décrites dans l'Annexe 1 pour donner des directives concernant la quantification des niveaux des rayonnements non désirés des stations radar fonctionnant au-dessus de 400 MHz;
- 2 d'utiliser les techniques de mesure décrites soit dans l'Annexe 1, soit dans l'Annexe 2, selon la nature du radar, pour donner des directives concernant la mesure des niveaux des rayonnements non désirés des stations radar fonctionnant entre 50 MHz et 400 MHz;

* La présente 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), de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et des Commissions d'études 1, 4 et 9 des radiocommunications.

** La Commission d'études 5 des Radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2009 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

3 d'utiliser les techniques de mesure décrites dans l'Annexe 2 pour donner des directives concernant la quantification des niveaux des rayonnements non désirés des stations radar fonctionnant au-dessous de 50 MHz;

4 de communiquer à l'UIT-R les résultats de l'utilisation de la présente Recommandation, afin de déterminer d'éventuelles limites des techniques, par exemple tolérances des mesures et reproductibilité sur les gammes de fréquences requises, de façon à avoir confiance dans les méthodes de mesure.

Annexe 1

Mesure des rayonnements non désirés des systèmes radar suivant les dispositions des alinéas 1 et 2 du *recommande*

1 Introduction

Deux techniques ont été élaborées pour mesurer les rayonnements non désirés. Ces techniques, connues comme les méthodes directe et indirecte, sont décrites.

La méthode de mesure directe est recommandée, car elle mesure les rayonnements non désirés de tous les radars y compris ceux qui évitent les mesures en des points intermédiaires dans le rayon des émetteurs radar. On mentionnera à titre d'exemple ceux qui utilisent des réseaux à répartition d'émetteurs construits dans la structure d'antenne (ou la comprenant).

La méthode indirecte permet de mesurer séparément les composants du radar et ensuite d'en combiner les résultats. La division recommandée du radar sépare le système après le joint rotatif et permet ainsi de mesurer le spectre de sortie de l'émetteur au terminal de sortie du joint rotatif et de le combiner avec les caractéristiques mesurées du gain d'antenne.

2 Largeur de bande de référence

Pour les systèmes radar, la largeur de bande de référence, B_{ref} , servant à définir les limites des rayonnements non désirés (Recommandations UIT-R SM.329 et UIT-R SM.1541, et Appendice 3 du RR) doit être calculée pour chaque système radar particulier. Pour les quatre types généraux de modulation par impulsion radar utilisés pour la radionavigation, la radiolocalisation, l'acquisition, la poursuite et autres fonctions de radiorepérage, on déterminera les valeurs de la largeur de bande de référence à l'aide des formules suivantes:

- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions non codées, un divisé par la durée de l'impulsion radar (s) (par exemple, si la durée de l'impulsion est égale à 1 μ s, la largeur de bande de référence est alors de $1/1 \mu\text{s} = 1 \text{ MHz}$);
- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions codées en phase, un divisé par la durée de l'élément de phase (s) (par exemple, si l'élément codé en phase est égal à 2 μ s, la largeur de bande de référence est alors de $1/2 \mu\text{s} = 500 \text{ kHz}$);
- pour les radars à MF ou à compression d'impulsions, racine carrée de la quantité obtenue en divisant la largeur de bande de l'impulsion comprimée (MHz), par la durée de l'impulsion (μ s) (par exemple, si la MF est comprise entre 1 250 et 1 280 MHz, soit 30 MHz

pendant l'impulsion de 10 μs , la largeur de bande de référence est alors de $(30 \text{ MHz}/10 \mu\text{s})^{1/2} = 1,73 \text{ MHz}$);

- pour les radars à forme d'ondes multiples, on détermine la largeur de bande de référence de façon empirique à partir d'observations des émissions. On procède comme suit: on cale le récepteur du système de mesure sur une des fréquences fondamentales du radar, ou sur la fréquence centrale à l'intérieur de la gamme des impulsions comprimées du radar. On prend pour largeur de bande du système de mesure la valeur la plus large possible, et on enregistre le niveau de puissance reçu en provenance du radar dans cette largeur de bande. On réduit ensuite progressivement la largeur de bande de mesure, puis on enregistre le niveau de puissance reçu en fonction de la largeur de bande. Le résultat obtenu est un graphique, ou un tableau, indiquant la puissance mesurée en fonction de la largeur de bande du système de mesure. La largeur de bande nécessaire est la plus petite dans laquelle on continue d'observer un niveau de pleine puissance; on peut alors calculer la largeur de bande de référence à partir de la réaction du récepteur du système de mesure à l'aide du facteur de la largeur de bande de mesure du rapport (MBR, *measurement bandwidth ratio*) décrit ci-dessous. Si on observe immédiatement une réduction du niveau de puissance, on doit alors utiliser la plus grande largeur de bande disponible.

Dans tous les cas, lorsque les largeurs de bandes évoquées ci-dessus sont supérieures à 1 MHz, il convient d'utiliser une largeur de bande de référence, B_{ref} , de 1 MHz.

3 Largeur de bande de mesure et paramètres du détecteur

La largeur de bande de mesure, B_m , est définie comme étant la largeur de bande en impulsion du récepteur et est supérieure à la largeur de bande à FI, B_{fi} , (parfois dénommée largeur de bande de résolution pour les analyseurs de spectre). La largeur de bande de mesure, B_m , peut être calculée à partir de la formule suivante:

$$B_m = B_{fi} \times MBR$$

Le rapport MBR doit être déterminé pour le récepteur de mesure utilisé. Le MBR est approximativement de 3/2 pour un filtre gaussien d'une largeur de bande FI de -3 dB , utilisé dans de nombreux récepteurs d'analyseur de spectre du commerce. (Dans certains instruments, la largeur de bande FI est définie au point de -6 dB .)

Pour obtenir une des largeurs de bande de mesure recommandées ci-après, on doit choisir une largeur de bande FI appropriée pour le récepteur.

- | | |
|--|---|
| Largeur de bande de mesure, B_m ¹ | $\leq (1/T)$ 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 de 1 μs , la largeur de bande de mesure doit être $\leq 1/(1 \mu\text{s}) = 1 \text{ MHz}$). |
| | $\leq (1/t)$ 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 μs , chaque impulsion étant constituée de 13 éléments codés en phase d'une durée de 2 μs , la largeur de bande de mesure doit être $\leq 1/(2 \mu\text{s}) = 500 \text{ kHz}$). |

¹ Dans tous les cas, si la largeur de bande de mesure mentionnée ci-dessus est supérieure à 1 MHz, on doit alors utiliser une largeur de bande de mesure, B_m , proche de 1 MHz.

- ≤ $(B_c/T)^{1/2}$, pour les radars à balayage de fréquence (MF, ou à compression d'impulsion), où B_c 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 de 10 µs, la largeur de bande de mesure doit être alors $\leq ((30 \text{ MHz})/(10 \text{ µs}))^{1/2} = \sqrt{3} \text{ MHz} \approx 1,73 \text{ MHz}$. Conformément à la note de bas de page¹, on doit utiliser dans cet exemple une largeur de bande de mesure proche de, mais inférieure ou égale à 1 MHz.
- ≤ on effectue une mesure en procédant comme suit: pour les radars à forme d'ondes multiples, on détermine la largeur de bande de référence de façon empirique à partir d'observations des émissions. On procède comme suit: on cale le récepteur du système de mesure sur une des fréquences fondamentales du radar, ou sur la fréquence centrale à l'intérieur de la gamme des impulsions comprimées du radar. On prend pour largeur de bande du système de mesure la valeur la plus large possible, et on enregistre le niveau de puissance reçu en provenance du radar dans cette largeur de bande. On réduit ensuite progressivement la largeur de bande de mesure, puis on enregistre le niveau de puissance reçu en fonction de la largeur de bande. Le résultat obtenu est un graphique, ou un tableau, indiquant la puissance mesurée en fonction de la largeur de bande du système de mesure. La largeur de bande de mesure appropriée est la largeur de bande où est observée la première réduction du niveau de pleine puissance. Si on observe immédiatement une réduction du niveau de puissance, on doit alors utiliser la plus grande largeur de bande de mesure disponible.

Largeur de bande vidéo ≥ largeur de bande du système de mesure.

Détecteur crête positive.

3.1 Mesures à l'intérieur du domaine hors bande

A l'intérieur du domaine hors bande, les limites visées dans la Recommandation UIT-R SM.1541 sont exprimées en dBpp, mesure de la puissance relative, et on doit utiliser une largeur de bande FI telle que la largeur de bande de mesure soit inférieure à la largeur de bande de référence. Dans ce cas, on ne doit procéder à aucune correction, étant donné que la crête du spectre ainsi que les points de données à l'intérieur du domaine hors bande sont mesurés à l'aide de la même largeur de bande de mesure, B_m .

On doit généralement procéder aux mesures en utilisant une largeur de bande qui soit proche de, mais inférieure à la largeur de bande de référence spécifiée; cette façon de faire permet de réduire le temps de mesure, mais a pour effet également d'élargir quelque peu le spectre mesuré. Ainsi, dans les situations marginales, où il peut être important de mesurer la véritable forme du spectre dans la «région de proximité», il est recommandé de remesurer cette région à l'intérieur du domaine hors bande en utilisant, selon le cas, une largeur de bande maximale de $0,2/T$ ou de $0,2/t$.

3.2 Mesures à l'intérieur du domaine des rayonnements non essentiels

3.2.1 Correction des mesures à l'intérieur du domaine des rayonnements non essentiels

Lorsque la largeur de bande de mesure, B_m est inférieure à la largeur de bande de référence B_{ref} , on doit appliquer un facteur de correction aux mesures effectuées à l'intérieur du domaine des

rayonnements non essentiels pour exprimer les résultats dans la largeur de bande de référence; ce facteur de correction s'établit comme suit:

Niveau des rayonnements non essentiels, B_{ref} = Niveau des rayonnements non essentiels (mesuré en B_m) + $10 \times \log(B_{ref}/B_m)$

NOTE 1 – On doit utiliser ce facteur de correction sauf lorsqu'on sait que le rayonnement non essentiel n'est pas un rayonnement à caractère de bruit, auquel cas on peut appliquer un facteur compris entre 0 et $20 \log(B_{ref}/B_m)$, qui peut s'obtenir par des mesures effectuées dans plusieurs largeurs de bande.

3.2.2 Correction des données de mesure par rapport à la puissance de crête

A l'intérieur du domaine des rayonnements non essentiels, les limites visées à l'Appendice 3 du RR sont définies en une largeur de bande de référence, B_{ref} par rapport à la puissance de crête. Les données enregistrées en dBpp à l'intérieur de ce domaine doivent être rapportées à la puissance de crête (et non à la crête du spectre relevée en dBpp).

On obtient la puissance de crête par approximation en utilisant la formule de correction suivante:

Pour les radars à ondes entretenues ou à impulsions codées en phase:

$$PEP = P_{mes} + 20 \times \log(B_{pep} / B_m) \quad \text{pour } B_{pep} > B_m$$

Pour les radars à balayage de fréquence (MF ou impulsions comprimées):

$$PEP = P_{mes} + 10 \times \log(B_c / (B_m^2 \times T)) \quad \text{pour } (B_m^2 T) / B_c < 1$$

où:

PEP : puissance en crête

P_{mes} : puissance de crête du spectre (B_m)

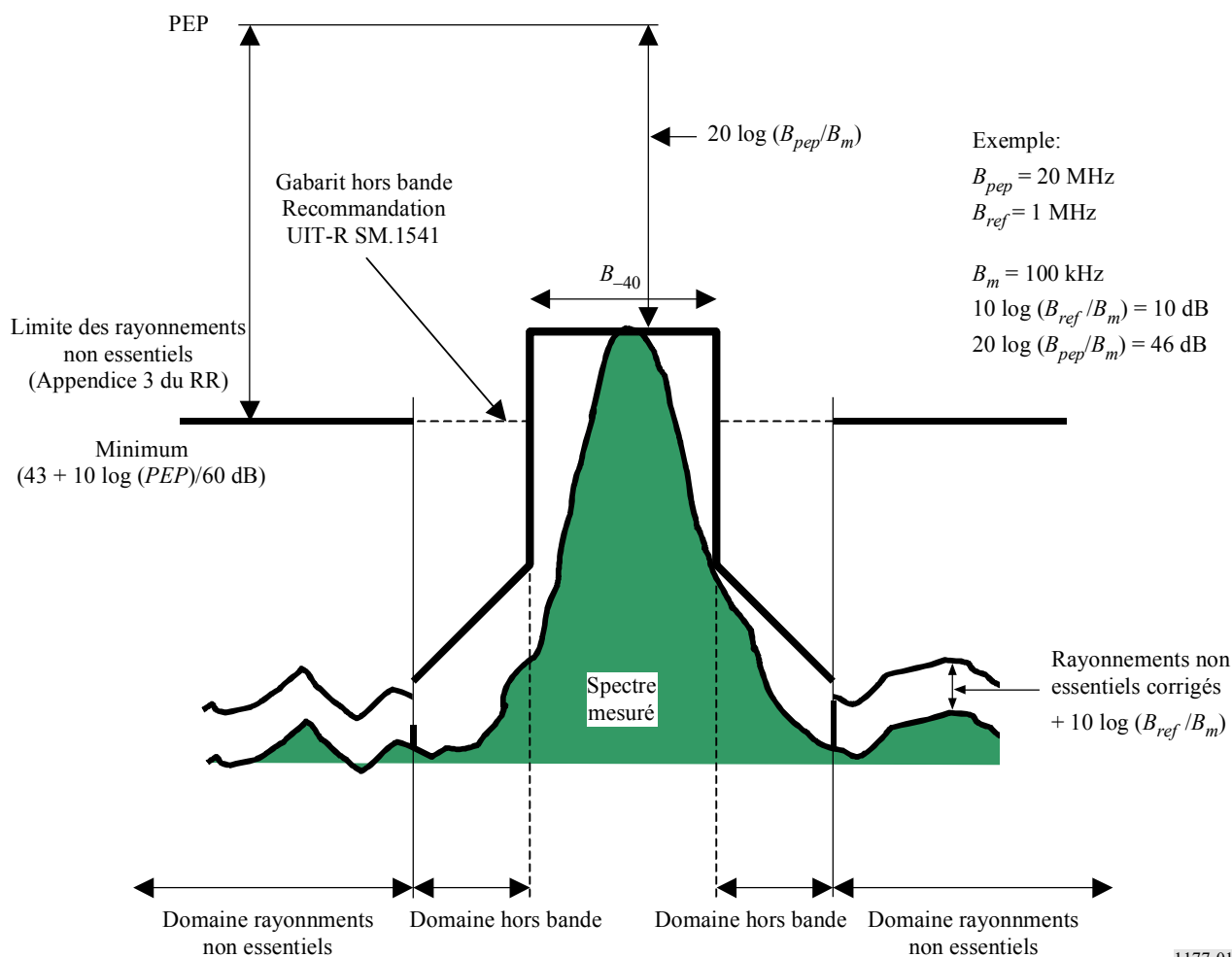
B_{pep} : largeur de bande calculée ainsi:

- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions non codées, un divisé par la durée de l'impulsion radar (s) (par exemple, si la durée de l'impulsion est égale à 1 μ s, B_{pep} est alors de 1/1 μ s = 1 MHz);
- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions codées en phase, un divisé par la durée de l'élément de phase (s) (par exemple, si l'élément codé en phase est égal à 2 μ s, la B_{pep} est alors de 1/2 μ s = 500 kHz);
- pour les radars MF ou à compression d'impulsions, racine carrée de la quantité obtenue en divisant la largeur de bande de l'impulsion comprimée (MHz) par la durée de l'impulsion (μ s) (par exemple, si la MF est comprise entre 1250 et 1280 MHz, soit 30 MHz pendant l'impulsion de 10 μ s, la B_{pep} est alors de $(30 \text{ MHz}/10 \mu\text{s})^{1/2} = 1,73 \text{ MHz}$);
- pour les radars à forme d'ondes multiples, on détermine la B_{pep} de façon empirique à partir d'observations des émissions. On procède comme suit: on cale le récepteur du système de mesure sur une des fréquences fondamentales du radar, ou sur la fréquence centrale à l'intérieur de la gamme des impulsions comprimées du radar. On prend pour largeur de bande du système de mesure la valeur la plus large possible, et on enregistre le niveau de puissance reçu en provenance du radar dans cette largeur de bande. On réduit ensuite progressivement la largeur de bande de mesure, puis on enregistre le niveau de puissance reçu en fonction de la largeur de bande. Le résultat obtenu est un graphique, ou un tableau, indiquant la puissance mesurée en fonction de la largeur de bande du système de mesure. La largeur de bande nécessaire est la plus petite dans

laquelle on continue d'observer un niveau de pleine puissance; on peut alors calculer la B_{pep} à partir de la réaction du récepteur du système de mesure à l'aide des critères mentionnés ci-dessous. Si on observe immédiatement une réduction du niveau de puissance, on doit alors utiliser la plus grande largeur de bande disponible. Les corrections décrites dans le § 3.2 sont illustrées graphiquement dans la Fig. 1.

FIGURE 1

Illustration graphique de la correction mentionnée dans le § 3.2



1177-01

Comme il ressort de la Fig. 1, le gabarit hors bande et le spectre mesuré ont été rapportés au niveau de la puissance de crête équivalente, au moyen du facteur $20 \log(B_{pep}/B_m)$. La Fig. 1 montre que le rayonnement non essentiel mesuré se décale vers le haut d'un montant égal au facteur de correction décrit dans le § 3.2.1 (égal ici à $10 \log(B_{ref}/B_m)$). Dans cet exemple, on a choisi à titre d'illustration uniquement une largeur de bande de mesure de 100 kHz, bien que dans ce cas la largeur de bande recommandée soit proche de 1 MHz; c'est également aux fins d'illustration que le gabarit est décalé en fréquence, suivant la possibilité offerte par la Recommandation UIT-R SM.1541.

4 Mesures pour les radars à impulsions multiples ou multimodaux

Pour les radars à forme d'ondes multiples, on doit calculer la largeur de bande B_{-40} dB pour chaque type d'impulsion et on doit utiliser la largeur de bande B_{-40} dB maximale pour établir la forme du gabarit à l'émission (voir la Recommandation UIT-R SM.1541, Annexe 8).

Pour les radars auxquels correspondent plusieurs configurations de largeur d'impulsion, qu'on peut choisir individuellement, on doit utiliser la configuration qui donne la largeur de bande calculée B_{-40} dB la plus large possible (voir la Recommandation UIT-R SM.1541, Annexe 8). Les mesures des émissions doivent alors être effectuées seulement pour cette configuration.

En ce qui concerne les radars à balayage en élévation, les mesures ne doivent normalement être effectuées que dans le plan de l'azimut.

5 Gamme dynamique du système de mesure

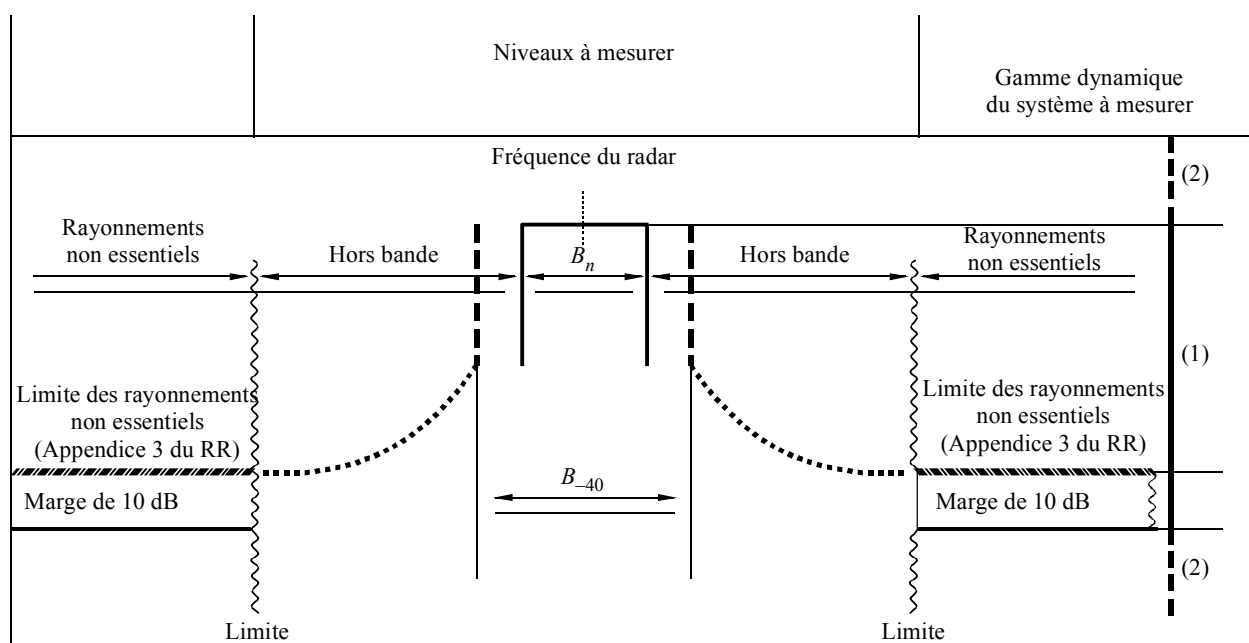
Le système de mesure doit pouvoir mesurer les niveaux des rayonnements non désirés selon les dispositions de l'Appendice 3 du RR. Pour obtenir une représentation complète du spectre, notamment dans le domaine des rayonnements non désirés, il est recommandé de pouvoir mesurer les niveaux des émissions 10 dB en dessous des niveaux indiqués à l'Appendice 3 du RR.

Pour que le niveau de confiance dans les résultats soit élevé, il faut que la gamme dynamique de mesure du système soit nettement plus importante que la gamme de mesure qui est demandée (marge (2) dans la Fig. 2).

La relation entre la gamme de mesure nécessaire et la gamme dynamique recommandée du système de mesure est indiquée dans la Fig. 2.

FIGURE 2

Relation entre la gamme de mesure nécessaire et la gamme dynamique recommandée du système de mesure



(1): Gamme de mesure recommandée

(2): Marge

NOTE 1 – Il convient d'observer que la Recommandation UIT-R SM.329 recommande, en ce qui concerne les limites applicables à la catégorie B, des limites plus strictes que celles qui sont fixées à l'Appendice 3 du RR dans certains cas; il convient d'en tenir compte lors de l'estimation de la gamme de mesure nécessaire et de la gamme dynamique recommandée du système de mesure.

6 Méthodes directes

Deux méthodes directes décrites ci-après peuvent servir à mesurer les rayonnements non désirés (hors bande et non essentiels) provenant des systèmes radar; la première est manuelle et la deuxième est automatique. Ces deux méthodes ont été utilisées pour mesurer les caractéristiques des rayonnements des systèmes radar fonctionnant à des fréquences allant jusqu'à 24 GHz, avec des puissances en sortie de l'émetteur de plusieurs mégawatts, et des niveaux de p.i.r.e. dans la gamme des gigawatts. Compte tenu de considérations de sécurité, ces méthodes peuvent par ailleurs être appliquées dans une salle anéchoïque.

6.1 Conditions applicables à l'environnement de mesure

En ce qui concerne la distance de mesure, on peut procéder à des mesures dans le champ soit proche, soit lointain. Les variations du signal de crête reçu doivent être maintenues inférieures à 3 dB à l'aide de l'absorbeur lorsque l'antenne de réception est déplacée de $\lambda \times D/2H$ horizontalement ou verticalement par rapport au point où est reçu le signal maximum (H : hauteur du point d'émission, D : distance de mesure, λ : longueur d'onde d'émission).

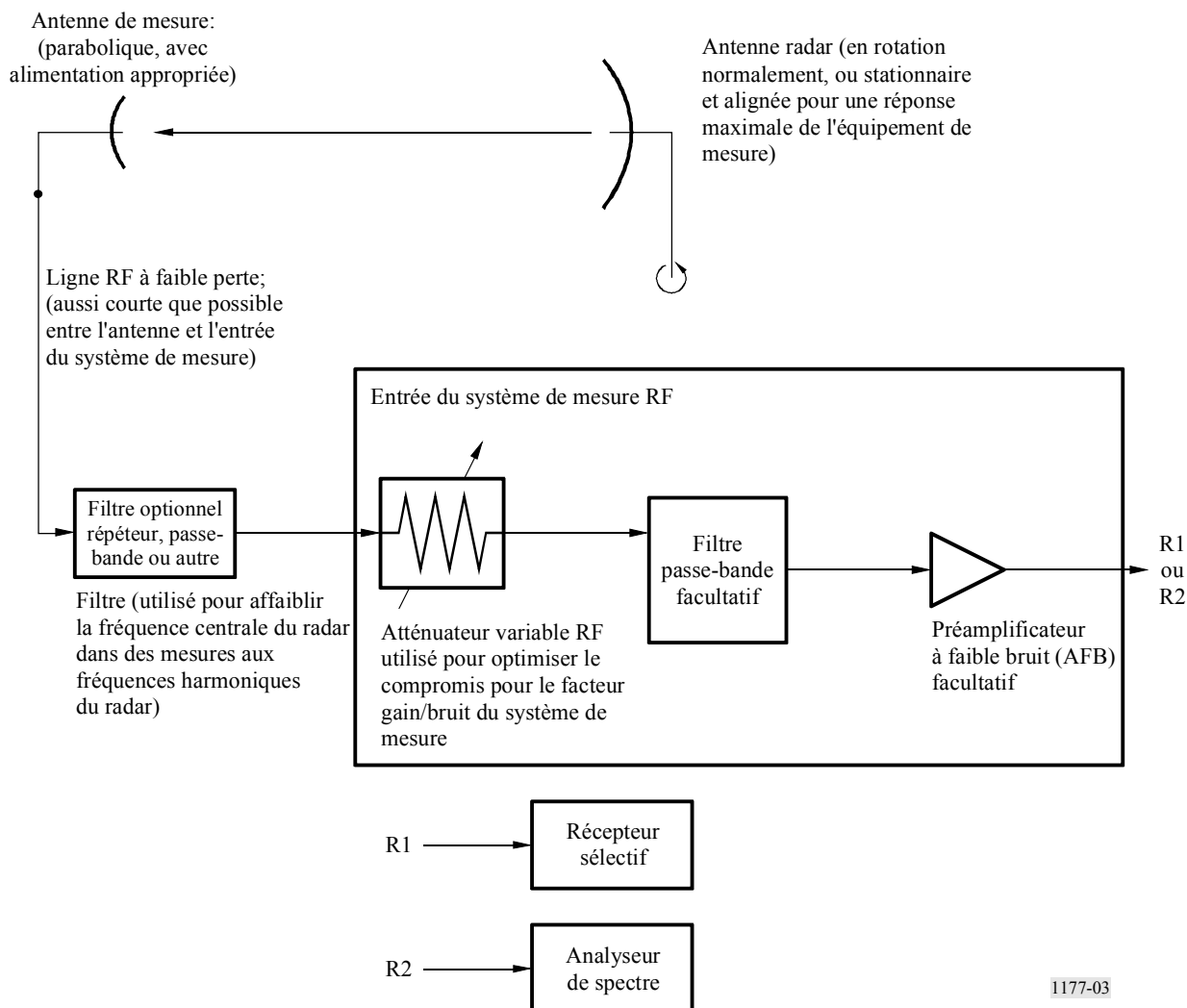
En ce qui concerne le site de mesure, il est préférable de situer les antennes d'émission et de réception en un point relativement élevé, par exemple en haut d'une tour. On notera que la hauteur doit être déterminée en fonction de l'ouverture du faisceau vertical du radar et des antennes de mesure, et qu'aucun objet réfléchissant ne devrait se trouver entre les antennes.

6.2 Matériel et logiciel de mesure

Des diagrammes par blocs du type de système de mesure nécessaire pour les deux méthodes directes sont proposés à la Fig. 3 (méthode manuelle) et à la Fig. 4 (méthode automatique). Le premier élément à prendre en considération dans le système est l'antenne de réception. L'antenne de réception doit 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, et l'étroitesse de la largeur du faisceau permet une discrimination par rapport à d'autres signaux dans la zone. Cette étroitesse contribue à la réduction des problèmes que pose la propagation par trajets multiples des signaux émis par le radar faisant l'objet des mesures; par ailleurs, les données de spectre récoltées avec une antenne parabolique n'exigent qu'un minimum de corrections postérieures aux mesures, comme il est indiqué dans le paragraphe suivant. 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. On peut tester la polarisation en faisant tourner l'alimentation (dans le cas d'une polarisation linéaire), ou dans le cas d'une polarisation circulaire, en échangeant les alimentations dextrogyre et lévogyre.

FIGURE 3

**Diagramme par blocs pour la mesure des rayonnements non désirés
des radars en utilisant la méthode directe manuelle**



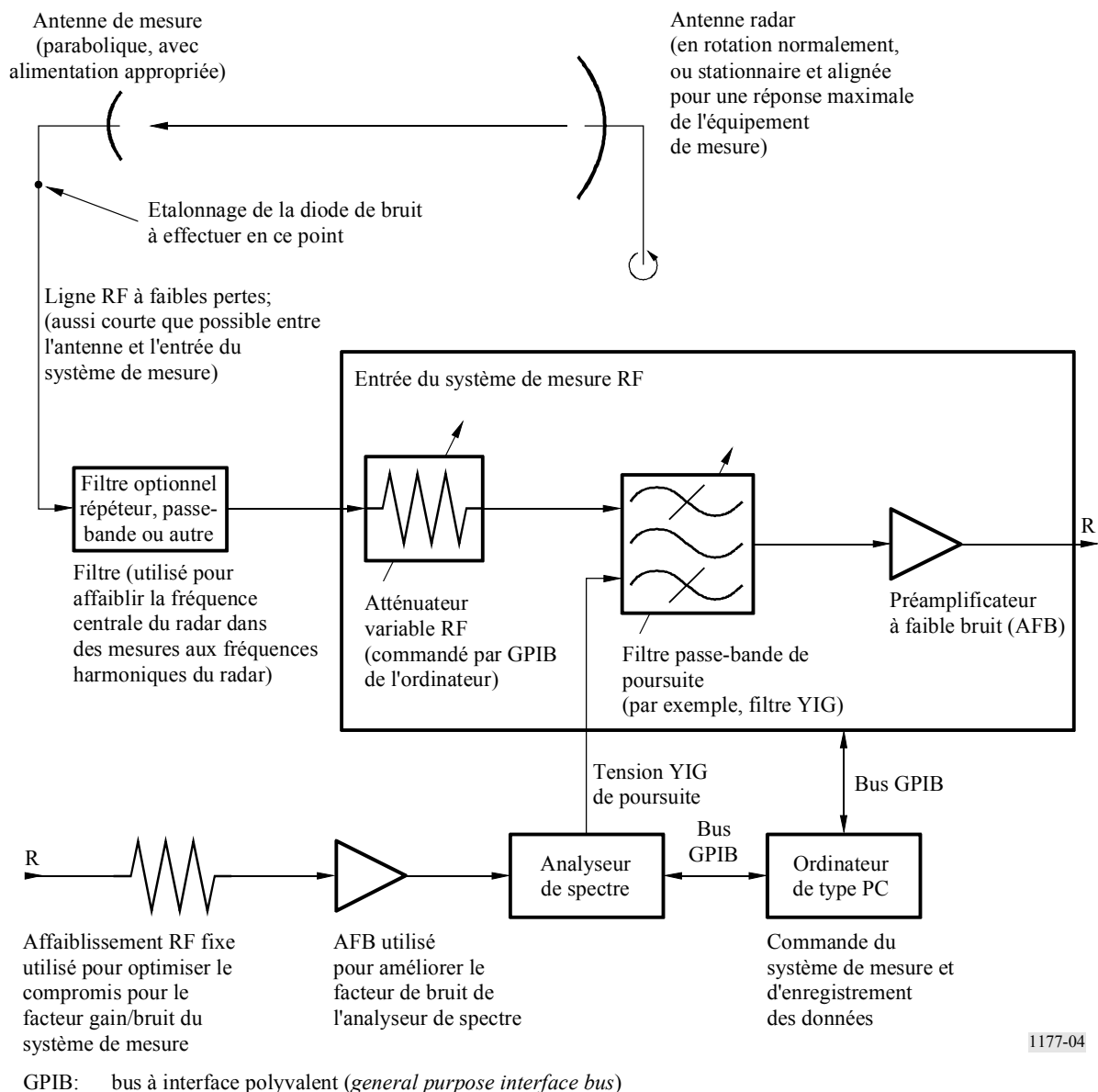
Il faut envisager d'avoir à apporter des corrections pour un gain d'antenne variable, fonction de la fréquence. Les niveaux de gain sont normalement spécifiés (dBi) en fonction d'une antenne isotropique théoriquement parfaite. L'ouverture efficace d'une antenne isotropique décroît de $20 \log(f)$, où f est la fréquence mesurée. C'est-à-dire que, si l'antenne de mesure a une ouverture efficace constante (donc un gain isotropique qui s'accroît de $20 \log(f)$), aucune correction ne doit être effectuée dans le cas d'un gain d'antenne variable. Cette condition correspond à un réflecteur parabolique théoriquement parfait, et c'est une des raisons pour lesquelles on préfère utiliser ce type d'antenne pour la mesure du spectre d'un radar à large bande.

Inversement, comme le gain de l'antenne de mesure varie suivant une courbe de $20 \log(f)$ (cas d'une antenne parabolique qui n'est pas idéale), il convient d'en tenir compte dans les mesures qui doivent être corrigées en conséquence.

Il convient de prendre également en considération le câble raccordant l'antenne de mesure au système de mesure. Une longueur de câble RF à faibles pertes (qui varieront suivant les conditions de la géométrie du système de mesure propre à chaque site radar) 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, et d'en réduire les pertes.

FIGURE 4

**Diagramme par blocs pour la mesure des rayonnements non désirés
des radars en utilisant la méthode directe manuelle**



1177-04

L'entrée RF est une des parties les plus critiques de tout le système de mesure. Elle exécute en effet trois fonctions essentielles: la première consiste à surveiller et à allonger la gamme dynamique du système de mesure à l'aide d'un affaiblissement RF variable; la deuxième est une fonction de filtrage (présélection) de la bande passante pour éviter que les amplificateurs soient surchargés par des signaux de forte amplitude qui ne soient pas à la fréquence accordée du système de mesure; la troisième correspond à la préamplification à faible bruit en vue d'obtenir la sensibilité maximale à des émissions qui peuvent être inférieures de 130 dB au niveau de crête mesuré sur le site même du radar.

Chacune des trois composantes de l'entrée RF est examinée ci-après.

L'atténuateur RF est le premier élément de l'entrée RF. Il 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 du système de mesure jusqu'au montant maximal de l'affaiblissement disponible (par exemple, 70 dB pour un atténuateur 0-70 dB).

6.2.1 Système de mesure manuel

La mesure manuelle consiste à balayer le spectre par pas fixes (d'une valeur égale à celle de l'excursion). A chaque balayage, on ajuste l'atténuateur pour maintenir la puissance de crête du radar dans la gamme dynamique des autres éléments du système de mesure (la limite est souvent imposée par l'amplificateur d'entrée et par l'amplificateur logarithmique de l'analyseur de spectre). Une fois que l'atténuateur RF d'entrée a été adapté à chaque balayage, on procède à la mesure de la puissance du radar à la fréquence en question.

En lieu et place, on peut utiliser un filtre passe-bande manuel pour éviter de surcharger le préamplificateur (et donc de comprimer le gain), dans le cas où il faut mesurer des rayonnements non essentiels de très faible puissance (soit niveau des émissions fondamentales – niveau des rayonnements non essentiels > gamme dynamique de mesure instantanée).

L'élément final dans l'entrée RF est un amplificateur à faible bruit (AFB), élément suivant dans le chemin du signal après le présélecteur. Grâce à son faible bruit en entrée, le AFB est très sensible aux rayonnements non essentiels, de faible amplitude, émis par les radars et son gain compense le bilan de bruit du reste du système de mesure (par exemple certaine longueur de la ligne de transmission plus analyseur de spectre).

On optimise la sensibilité et la gamme dynamique du système de mesure en choisissant avec soin les caractéristiques de gain et de bruit du AFB. Il est en effet souhaitable d'en réduire le bruit tout en ayant un gain suffisant pour optimiser le fonctionnement des dispositifs de mesure après le AFB (afin de réduire pour l'essentiel les pertes sur la ligne RF après l'entrée ainsi que le bruit de l'analyseur de spectre). Dans l'idéal, la somme des valeurs de gain et de bruit du AFB (soit l'excès de bruit produit par le AFB doté à son entrée d'une borne de 50 Ω) devrait être approximativement égale à la valeur de bruit de tout le système de mesure restant.

Des valeurs types du facteur de bruit de l'analyseur de spectre sont 25-45 dB (en fonction de la fréquence) et les pertes sur la ligne de transmission peuvent être typiquement de 5 à 10 dB, selon la qualité et la longueur de la ligne. Etant donné la variation en fonction de la fréquence du facteur de bruit du système de mesure, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs AFB par octave de fréquences (par exemple 1-2 GHz, 2-4 GHz, 4-8 GHz, 8-18 GHz, 18-26 GHz et 26-40 GHz), chaque AFB pouvant être optimisé en gain et en bruit à l'intérieur de chaque octave. Ce dispositif aide par ailleurs à adapter les AFB aux intervalles d'octaves entre les différents filtres YIG (par exemple 0,5-2 GHz, 2-18 GHz, etc.). L'utilisation d'un AFB après le présélecteur (et au besoin d'un AFB en cascade à l'entrée de l'analyseur de spectre) peut permettre d'abaisser le facteur de bruit global de tout le système de mesure à environ 10-15 dB. On a constaté que ces valeurs de bruit se prêtent bien à la mesure du spectre des rayonnements émis par les radars à large bande dans une largeur de bande pouvant atteindre 130 dB.

Le dernier dispositif du système de mesure RF est, pour l'essentiel, un analyseur de spectre qui peut être un dispositif du commerce, ou qui peut être pourvu d'un présélecteur ou d'un récepteur sélectif; il est possible d'utiliser n'importe quel équipement pouvant recevoir des signaux sur la gamme de fréquences en question.

6.2.2 Système de mesure automatique

Pour utiliser efficacement l'atténuateur d'entrée RF dans une mesure radar (voir la Fig. 3) il faut accorder le système de mesure par pas de fréquence fixe (par exemple 1 MHz) plutôt que de balayer l'ensemble du spectre comme on le fait normalement avec un analyseur de spectre manuel. A chaque pas de fréquence fixe, on ajuste l'atténuateur pour maintenir la puissance de crête du radar à l'intérieur de la gamme dynamique des autres éléments du système de mesure (la limite est souvent imposée par l'amplificateur d'entrée et par l'amplificateur logarithmique de l'analyseur de spectre). Une fois que l'atténuateur RF d'entrée a été convenablement adapté à chaque pas, on procède à la

mesure de la puissance du radar à la fréquence en question. Ainsi, une gamme dynamique nominale de 60 dB du système de mesure peut être augmentée de 70 dB, la gamme dynamique totale atteignant alors 130 dB. Pour réduire le temps de mesure, il est possible de commander par ordinateur cet atténuateur ainsi que l'algorithme de mesure par pas de fréquence qui doit l'accompagner.

L'élément suivant, le filtre passe-bande accordable en fréquence, ou présélecteur, sert à mesurer les niveaux des rayonnements non essentiels de faible puissance aux fréquences qui sont adjacentes à celles des émissions fondamentales, lesquelles sont d'un niveau beaucoup plus élevé (par exemple l'écart peut atteindre 130 dB). Ce présélecteur peut être par exemple nécessaire pour mesurer les rayonnements non essentiels émis par un radar de contrôle du trafic aérien à 2900 MHz, rayonnements qui se situent à un niveau de -120 dBm dans le système de mesure alors que le niveau des rayonnements fondamentaux est lui à $+10$ dBm et distant seulement de 150 MHz en fréquence (soit à 2750 MHz). Le système de mesure doit être pourvu d'un AFB qui ne soit pas affaibli pour mesurer les rayonnements non essentiels à 2900 MHz, mais cet amplificateur sera surchargé (et le gain en sera donc réduit) s'il vient à être exposé aux rayonnements fondamentaux non affaiblis à 2750 MHz. C'est pourquoi il faut prévoir avant l'entrée du AFB un dispositif d'affaiblissement qui soit fonction de la fréquence. Dans la pratique, ce filtrage passe-bande accordable est assuré efficacement par la technologie varactor (en dessous de 500 MHz) ou (au-dessus de 500 MHz) par la technologie YIG. On peut se procurer dans le commerce les filtres nécessaires, qui doivent être conçus pour suivre automatiquement la fréquence accordée du système de mesure.

L'élément final dans l'entrée RF est un AFB. Un AFB est installé comme l'élément suivant dans le chemin du signal après le présélecteur. Grâce à son faible bruit en entrée, l'AFB est très sensible aux rayonnements non essentiels, de faible amplitude, émis par les radars et son gain compense le bilan de bruit du reste du système de mesure (par exemple certaine longueur de la ligne de transmission, plus analyseur de spectre).

Les considérations relatives à la sensibilité et à la gamme dynamique du système de mesure ainsi qu'aux valeurs de bruit d'un analyseur de spectre type sont identiques à celles exposées au § 6.2.1.

Une autre possibilité de configuration est l'utilisation de plusieurs AFB disposés en cascade. Le premier est installé entre deux étages à l'intérieur du filtre présélecteur passe-bande (technologie YIG ou varactor); sa valeur de bruit est peu élevée et son gain juste suffisant pour compenser l'affaiblissement d'insertion du deuxième étage du filtre YIG. Un deuxième AFB (éventuellement de moindre performance) est installé immédiatement après le filtre YIG; cette configuration permettra d'obtenir une valeur de bruit légèrement moins élevée pour l'ensemble du système, le deuxième étage du filtre YIG étant renforcé par le premier AFB. Toutefois, pour mettre en œuvre cette configuration, une administration devra utiliser un système d'une conception plus évoluée et apporter au filtre présélecteur des modifications techniques, contraintes qu'elle estimera éventuellement excessives.

Une troisième possibilité en ce qui concerne la configuration des AFB dans le système de mesure, qui n'exige ni nouvelle conception, ni remise à niveau du présélecteur d'entrée, consiste à installer un AFB à faible gain dans l'élément d'entrée et un deuxième AFB à l'entrée des signaux dans l'analyseur de spectre; le premier sera choisi pour son très faible facteur de bruit et aura une valeur de gain juste suffisante pour compenser l'affaiblissement sur la ligne RF et le facteur de bruit du AFB de l'analyseur de spectre; ce dernier sera à son tour choisi pour sa valeur de gain qui devra être juste suffisante pour compenser le facteur de bruit de l'analyseur de spectre dans la gamme de fréquences retenue aux fins des mesures. Il peut être plus facile de se procurer un dispositif de ce type, composé de deux AFB en cascade, qu'un seul AFB très performant; par ailleurs, les deux AFB en cascade devraient normalement être moins sensibles à une possible

surcharge, les points de compression de 1 dB devant en principe être plus élevés dans ce cas que dans celui d'un seul AFB très performant.

Le dernier dispositif du système de mesure RF devrait être, pour l'essentiel, un analyseur de spectre que l'on peut se procurer dans le commerce. Il est possible d'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 compensé 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'une interface bus (GPIB ou équivalente) compatible avec le contrôleur d'ordinateur et la (ou les) carte(s) d'interface utilisés. En matière de mémoire et de rapidité, les ordinateurs modernes de type PC 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 combient 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. Le développement d'un logiciel exige d'importantes ressources, mais l'expérience acquise avec les systèmes en question a montré l'utilité de l'investissement si on veut pouvoir procéder à des mesures fréquentes et reproductibles des rayonnements émis par les radars.

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 ou d'autres éléments devenaient défectueux pendant la mesure.

6.3 Etalonnage du système de mesure

6.3.1 Méthode directe, manuelle

La méthode manuelle exige que soient calibrés soit tous les éléments du système de mesure les uns après les autres, soit l'ensemble du système de mesure à l'aide d'un générateur calibré (méthode par substitution).

6.3.2 Méthode directe, automatique

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 (*excess noise ratio*), où $ENR = (température\ effective\ (K),\ de\ la\ diode\ de\ bruit / température\ ambiante\ (K))$ 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 technique standard de mesure du facteur Y , décrite à l'Appendice 2 à l'Annexe 1, 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 sont appliquées aux données de mesure au moment où elles sont collectées. La procédure d'étalonnage est décrite en détail à l'Appendice 2 à l'Annexe 1.

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.

6.4 Procédure pour les mesures

6.4.1 Méthode manuelle

L'Appendice 1 à l'Annexe 1 décrit en détail la méthode directe, que résume le présent paragraphe.

Avant de procéder aux mesures, on utilise un analyseur de spectre pour détecter la présence de signaux qui ne seraient pas émis par le radar; dans ce cas, on doit utiliser des filtres pour éviter que les mesures soient faussées.

Fonction gel de la valeur Max

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 = 10, 20, 50, 100 ou 500 MHz.

Temps de balayage de l'analyseur de spectre > temps de balayage automatique.

Temps > enregistre le signal pendant une durée minimum égale à 3 intervalles de rotation du faisceau radar (par exemple, si le radar tourne à 40 tours par minute, ou 1,5 s/tour, la durée devrait être $> 3 \times 1,5$ s; 4,5 s serait un choix raisonnable). Enregistre le signal pendant une durée suffisante pour permettre au spectre de se former. L'antenne radar peut être maintenue immobile et alignée pour obtenir la réponse maximale du système de mesure.

NOTE 1 – Il faut valider le temps de balayage de l'analyseur de spectre et la durée d'enregistrement du signal.

On choisit le deuxième point de mesure en calant le système de mesure sur la bande de fréquences qui doit être ensuite mesurée; cette fréquence est dans l'idéal égale à la première bande de fréquences mesurée, plus la valeur de l'excursion mesurée.

Si on utilise un récepteur sélectif, les mesures sont réalisées point par point selon la largeur de bande recommandée.

6.4.2 Méthode automatique

L'Appendice 1 à l'Annexe 1 décrit en détail la méthode directe, que résume le présent paragraphe. 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).

Intervalle de temps de l'analyseur de spectre > l'intervalle de rotation du faisceau radar (par exemple, si l'antenne radar tourne à 40 tours par minute, soit 1,5 s/tour, l'intervalle de temps doit être > 1,5 s. Deux secondes serait un choix raisonnable). Dans le cas des radars agiles en fréquence ou à faisceau d'antenne à balayage vertical, l'intervalle de temps devra éventuellement couvrir plusieurs périodes de rotation de l'antenne; dans le cas de ces systèmes qui sont plus complexes, cet intervalle de temps devrait être déterminé de façon empirique.

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 2000 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 (de temps) légèrement plus long que la période de rotation de l'antenne du radar, ou pendant un intervalle de temps plus long pour les systèmes radar complexes. 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 2000 MHz et la largeur de bande de mesure de 1 MHz, la seconde fréquence mesurée serait 2001 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 de le balayer) se poursuit jusqu'à ce que le spectre d'émission désiré soit parcouru entièrement. Elle comporte toute une série de mesures ponctuelles d'amplitude effectuées à des fréquences prédéterminées (fixes-accordées) à l'intérieur d'une bande de fréquences donnée. Le changement de fréquence entre deux pas est dans l'idéal égal à la largeur de bande FI du système de mesure. Par exemple, sur une largeur de 200 MHz de spectre, on pourrait procéder à 200 mesures à un intervalle de temps de 1 MHz, et une largeur de bande FI de 1 MHz. Cet intervalle de temps peut être plus long dans le domaine des rayonnements non essentiels pour réduire le temps total de mesure. Toutefois, aux fréquences qui sont des multiples entiers (par exemple 2, 3, 4) des rayonnements fondamentaux émis par le radar, l'intervalle de temps maximum doit là aussi être à peu près égal à la largeur de bande FI du système de mesure.

Le système de mesure reste accordé sur chaque fréquence pendant une durée précise, parfois appelée aussi temps de tenue ou intervalle de temps. Cette durée est déterminée pour chaque pas par le spécialiste responsable du système de mesure et elle est normalement un peu plus longue que l'intervalle de balayage du faisceau radar.

Si on veut que cette procédure (détermination du pas, accordage, mesure, correction pour le gain et répétition) soit effectuée avec efficacité et précision, il est souhaitable que le système de mesure soit commandé par ordinateur. Afin de mesurer correctement la crête des rayonnements fondamentaux, il peut être utile d'utiliser un intervalle de temps plus petit de l'ordre de la moitié, voire moins, de la largeur de bande de mesure pour la région en question.

La technique pas à pas (intervalle de temps) doit être utilisée pour permettre 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 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.

Il est possible de procéder à ces mesures sans faire tourner l'antenne radar, à condition de connaître la direction des rayonnements fondamentaux à leur maximum et celle des éventuels rayonnements non désirés.

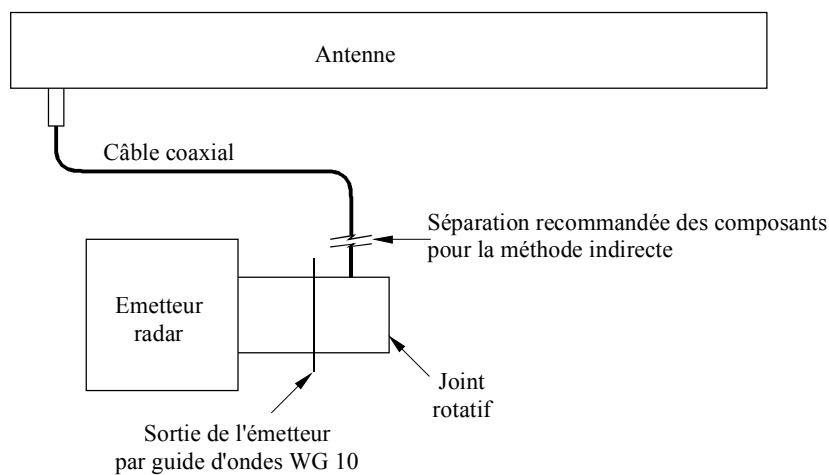
6.4.3 Méthode indirecte

La Fig. 5 illustre une séparation des composants recommandée pour la méthode indirecte. Lorsque des rayonnements non désirés sont mesurés au joint rotatif puis combinés aux caractéristiques de l'antenne mesurées séparément à des distances de 5 m et de 30 m avec une correction de champ éloigné appropriée, la procédure suivante est appliquée:

Etape 1: mesure du rayonnement d'un émetteur radar au joint rotatif au moyen d'une ligne d'alimentation (comme indiqué à la Fig. 6);

Etape 2: réalisation de mesures séparées du gain maximal d'une antenne radar aux fréquences de rayonnement obtenues à l'Etape 1, les mesures étant effectuées à des distances de 5 m pour les fréquences inférieures à 5 GHz et de 30 m pour les fréquences supérieures à 5 GHz (comme indiqué à la Fig. 7);

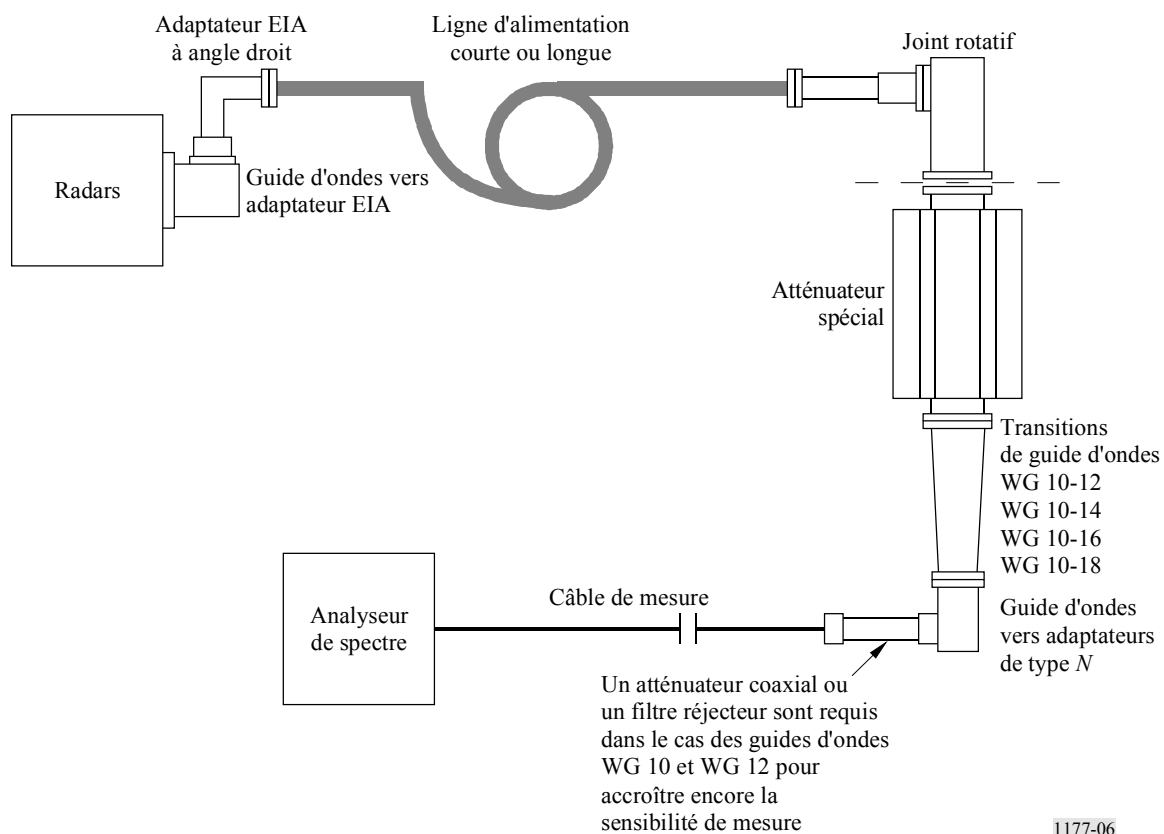
FIGURE 5
Système type de radar



WG: Guide d'onde (waveguide)

1177-05

FIGURE 6
Mesure à l'accès du joint rotatif



EIA: Electronics Industry Association

1177-06

Etape 3: correction des gains mesurés avec un facteur de correction approprié (à l'aide du programme logiciel indiqué à l'Appendice 4 à l'Annexe 1), pour les fréquences auxquelles les rayonnements ont été observés à l'Etape 1;

Etape 4: en dernier lieu, combinaison des Etapes 1 et 3 pour obtenir la p.i.r.e. rayonnée indirectement aux fréquences de rayonnement non désiré observées.

6.4.3.1 Méthodes de mesure et problèmes liés aux guides d'ondes

Mesurer le spectre de puissance de sortie de l'émetteur pose deux problèmes majeurs. Il s'agit, premièrement, de l'accès sans distorsion aux composantes de fréquence plus élevée du spectre émis et, deuxièmement, de la mesure des émissions de très faible niveau en présence de l'impulsion principale transmise, qui peut être de l'ordre de 60 kW de puissance de crête.

Dans tout guide d'ondes, le mode de propagation TE_{10} peut être mesuré au moyen d'un système de mesure étalonné dont les caractéristiques sont telles qu'il affaiblit suffisamment le signal fondamental de forte puissance pour protéger l'équipement de mesure, tout en produisant un affaiblissement minimal sur les autres fréquences, l'énergie étant mesurée dans le mode TE_{10} .

Il faut être conscient du fait que l'émetteur pourrait produire des rayonnements non essentiels dans des modes d'ordre plus élevé et il faudrait en tenir compte lors de la mise sur pied du système de mesure. Dans le cas des radars de simple conception, cette possibilité sera toutefois rarement importante étant donné que les modes d'ordre plus élevé de ce type sont en général piégés dans un guide d'ondes vers un adaptateur coaxial ou vers une ligne d'alimentation et le joint rotatif de l'antenne radar (en d'autres termes, les guides d'ondes vers des adaptateurs coaxiaux ne sont conçus que pour le couplage d'énergie en mode TE_{10}).

6.4.3.2 Système de mesure des rayonnements non désirés dans un guide d'ondes

Ce système permet de mesurer avec précision les faibles niveaux de rayonnement en présence de signaux radar de puissance élevée.

Il est principalement constitué d'un filtre réjecteur et d'une série de répartiteurs progressifs pour guide d'ondes (du WG 10 jusqu'à des dimensions plus petites) couvrant toute la plage de fréquences concernée. Le filtre réjecteur comprend un guide d'ondes rectiligne WG 10 avec des éléments absorbants qui affaiblissent le signal fondamental avec un affaiblissement minimal sur les autres fréquences. Pour obtenir l'affaiblissement complémentaire requis pour la protection de l'équipement de mesure et pour mesurer le rayonnement à des 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 qui 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 réfléchie vers l'arrière dans l'émetteur avec, pour effet, un défaut d'adaptation peu souhaitable, 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. Un élément de guide d'ondes de faible longueur doit être incorporé, si possible, pour éviter le couplage de modes évanescents entre un répartiteur progressif et un guide d'ondes vers une transition coaxiale.

6.4.3.3 Résultats des mesures au terminal du joint rotatif

La technique de mesure comprend une recherche exploratoire de la bande de fréquences concernée pour localiser et marquer, selon leur fréquence, les rayonnements non essentiels significatifs, suivie

par un retour à chaque rayonnement observé pour une mesure précise et détaillée de l'amplitude maximale de ce rayonnement.

6.4.3.4 Incertitude des mesures dans un guide d'ondes

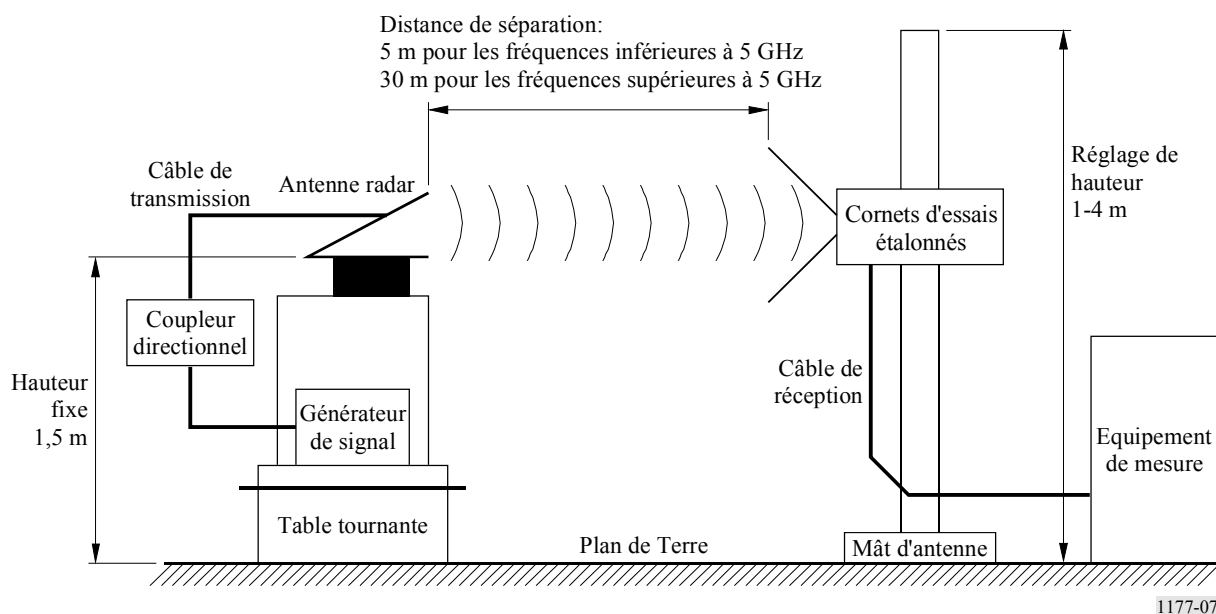
Le système présente une précision de mesure de $\pm 1,3$ dB sur la bande de fréquences comprise entre 2 et 18,4 GHz au terminal du guide d'ondes. Avec un niveau de confiance d'au moins 95%, l'incertitude globale peut être évaluée à $\pm 3,4$ dB pour le terminal du guide d'ondes, l'analyseur de spectre étant inclus.

6.4.3.5 Mesure des caractéristiques du gain d'antenne aux fréquences de rayonnement observées

La méthode indirecte recommande que les mesures de champ proche soient effectuées sur l'antenne en un site d'essai en terrain dégagé à une distance de 5 m pour les fréquences inférieures à 5 GHz et de 30 m pour les fréquences supérieures à 5 GHz. Des facteurs de correction sont ensuite utilisés pour que les mesures s'appliquent au gain d'un champ éloigné équivalent, avec une corrélation acceptable pour le gain de champ éloigné. Un dispositif de mesure type est représenté à la Fig. 7.

FIGURE 7

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



6.4.3.6 Procédure de mesure de gain en champ proche à des distances de 5 et de 30 m

Le gain maximal de l'antenne en essais doit être mesuré aux fréquences de rayonnement non essentiel et hors bande mesurées ou identifiées, selon la méthode indiquée au § 6.4.3. Sur chaque fréquence mesurée ou identifiée, on maximise le gain de l'antenne en essais d'abord en faisant tourner celle-ci sur 360° puis en faisant mouvoir vers le haut et vers le bas le cornet d'essai. On obtient le gain de l'antenne en mesurant, sur chaque fréquence concernée, la p.i.r.e. à chaque distance avec un niveau de puissance connu à l'entrée de l'antenne. Voir les équations (1) et (2) pour des détails sur la manière dont on calcule le gain en champ éloigné équivalent, G_a , de l'antenne en essais à partir du niveau mesuré de l'analyseur de spectre, S .

$$G_a \text{ de l'antenne en essais (dBi)} = \text{p.i.r.e. mesurée (dBm)} - P_{\text{entrée}} \text{ (dBm)} + G_c \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$\text{p.i.r.e. mesurée (dBm)} = S \text{ (dBm)} + 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dB)} - G_r \text{ (dBi)} \quad (2)$$

où:

- G_a : gain en champ éloigné équivalent de l'antenne en essais (dBi)
- $P_{\text{entrée}}$: puissance à l'entrée de l'antenne en essais (dB)
- G_c : facteur de correction du gain à des distances de 5 m et de 30 m pouvant être calculé pour l'antenne en essais à l'aide du programme logiciel indiqué à l'Appendice 4 à l'Annexe 1
- S : niveau mesuré de l'analyseur de spectre (dBm)
- G_r : gain du cornet d'essai de l'antenne de réception (dBi)
- d : distance de mesure (m)
- λ : longueur d'onde de la fréquence concernée (m).

6.4.3.7 Facteurs de correction et de réduction du gain

Le programme logiciel présenté à l'Appendice 4 fournit les facteurs de correction du gain en champ éloigné à partir d'une mesure en champ proche pour un cas très simple. Il calcule le facteur de correction pour chaque distance, à la fréquence concernée, à partir des variations de phase de l'onde reçue sur l'antenne linéaire. (A des distances proches, le front d'onde est sphérique et non linéaire.) Le gain d'antenne maximal à l'infini peut être déterminé à partir de mesures effectuées en champ proche.

Il convient de rappeler que le diagramme de gain de l'antenne n'est pas traité dans le présent contexte. A des fréquences de rayonnement non essentiel, la longueur électrique de l'antenne est différente de la longueur mécanique et peut être bien plus courte que celle-ci. Ceci est dû au fait que le diagramme d'éclairement de l'antenne est différent à des fréquences autres que la fréquence définie. Dans pareils cas, il conviendra donc d'utiliser, pour obtenir des résultats exacts, un modèle logiciel plus complexe ou des données obtenues à l'aide de la méthode directe.

6.4.3.8 Incertitude de la mesure du gain en champ proche avec les facteurs de correction appliqués

L'incertitude des mesures correspondant aux cas les plus défavorables peut être estimée à ± 6 dB, compte tenu de l'analyseur de spectre, du gain du cornet d'essai, des pertes sur le câble et des défauts de la source et du site. Avec un niveau de confiance de 95% au moins, l'incertitude globale peut être évaluée à $\pm 4,2$ dB.

Dans le calcul des facteurs de correction correspondant à ces distances, l'ouverture rayonnante de l'antenne en essais est supposée constante à toutes les fréquences.

6.4.3.9 Production du spectrogramme à l'émission d'un émetteur radar en termes de p.i.r.e. (combinaison des rayonnements mesurés et des caractéristiques du gain d'antenne)

La technique appliquée pour obtenir la valeur maximale de la p.i.r.e. équidirective consiste à ajouter, pour chaque fréquence de rayonnement, la puissance maximale produite par l'émetteur radar (dBm) au gain directionnel maximal (dBi) de l'antenne en essais. Autrement dit, une seule valeur doit caractériser l'antenne aux fréquences auxquelles le rayonnement de l'émetteur radar a été observé.

Considérez que les effets du défaut d'adaptation de l'antenne en essais sont automatiquement pris en compte dans les mesures du gain, étant donné que l'équipement d'essai est adapté à 50Ω

(impédance nominale des connecteurs coaxiaux) et que les rayonnements sont mesurés dans le récepteur de mesure de 50 Ω .

6.4.3.10 Résumé

La méthode indirecte, qui est rentable en matière de temps et d'installations, est suffisamment sensible pour permettre de mesurer les valeurs d'émission de faible niveau avec une précision et une répétabilité raisonnables. Elle peut également être appliquée quelles que soient les conditions climatiques et la plage des fréquences de mesure peut être facilement portée à 40 GHz ou plus. Elle peut en outre être utilement associée à la méthode directe pour évaluer les changements incrémentiels qui ont pu se produire dans un système radar donné ayant déjà fait l'objet de mesures.

Appendice 1 à l'Annexe 1

Description détaillée de la méthode directe: procédures et logiciel

La méthode directe suppose l'observation des conditions ci-après:

- la zone de rayonnement dans le champ lointain d'un radar doit pouvoir être accessible à un système de mesure correspondant à la description qui est donnée dans le corps de la présente Annexe;
- les signaux de traversée (*feed-through*) non désirés du radar directement à l'intérieur de l'équipement du système de mesure (c'est-à-dire ne passant pas par l'antenne) doivent pouvoir être réduits à un niveau suffisamment bas pour que les résultats des mesures puissent être exacts.

La méthode directe n'exige pas de coordonner l'exploitation du radar avec le fonctionnement du système de mesure, bien que dans certains cas un travail en coopération puisse faciliter la réalisation des mesures.

On procèdera à la méthode directe comme suit:

Etape 1: Choisir un emplacement pour les mesures

L'emplacement doit être à l'intérieur ou le plus près possible du faisceau principal du radar. Le choix peut en être relativement facile dans le cas des radars de recherche de surface et de certains autres types, étant donné que leur faisceau balayera la surface en question et que le système de mesure devra uniquement se situer à l'intérieur de la zone. Toutefois, dans le cas de nombreux radars de recherche aériens, le faisceau principal n'illumine pas directement le sol, de sorte que le système de mesure doit se situer à l'intérieur de la zone de couplage maximum à la surface, zone qu'on peut déterminer en calant le système de mesure sur la fréquence fondamentale du radar, puis en transportant le système de mesure à une certaine distance (de l'ordre de quelques kilomètres) du radar. Le système de mesure servant à contrôler le niveau du signal reçu en fonction de la position, on peut utiliser un analyseur de spectre avec une excursion de fréquence nulle et un temps de balayage de 500 s et enregistrer le niveau maximum toutes les quelques secondes lorsque le faisceau du radar balaie le système de mesure. On obtient ainsi une indication temporelle des emplacements de couplage maximum.

En principe, n'importe quel endroit à l'intérieur de la zone de couplage maximum devrait convenir. Dans la pratique, on a constaté que cette zone commence seulement à 0,75 km des radars de

recherche aériens et ne s'étend pas au-delà de 2 km environ de ces mêmes radars. A l'intérieur de ces limites, il n'existe pas normalement de point précis auquel correspondrait le couplage maximum, mais plutôt une zone assez étendue.

Il convient d'examiner la question des trajets multiples. S'il est vrai qu'on l'a très rarement observé, ce phénomène a pu être constaté dans des situations où le radar et le système de mesure étaient séparés par une «mer d'huile». Autrement, le relief et l'emploi d'antennes paraboliques dans le système de mesure rendent négligeable le phénomène, dont on peut vérifier l'existence en procédant à une nouvelle mesure en un deuxième lieu et en comparant les résultats par rapport aux données précédentes. On considère également que pour réduire le phénomène de trajets multiples, il suffit de hisser l'antenne de mesure, le long d'un mât télescopique, à quelque 10 m au-dessus du sol, ce qui donne une meilleure ligne de visée entre le radar et le système de mesure.

Etape 2: Mettre sur pied le système de mesure et vérifier l'existence de signaux de traversée non désirés

Le système de mesure se configure comme suit: installation d'un réflecteur parabolique en haut d'un mât de 10 m de hauteur (facultatif), ou au moins à quelques mètres au-dessus du sol pour éviter l'effet par trajets multiples et obtenir des conditions de propagation en ligne directe raisonnablement bonne. Le système de mesure doit être calé sur la fréquence fondamentale du radar ou sur la fréquence d'émission maximale, si le radar est à compression d'impulsions ou à sauts de fréquences.

Il faut vérifier l'existence de signaux de traversée non désirés (c'est-à-dire réception accidentelle à l'intérieur de l'équipement de mesure d'une partie de l'énergie du radar, qui ne passe pas par l'antenne de mesure). On en vérifie l'existence en déconnectant l'antenne de mesure et en soumettant la ligne d'entrée à une charge de 50 Ω . En cas de présence d'une énergie de traversée, on peut procéder aux opérations suivantes:

- vérifier (le cas échéant) l'étanchéité des boîtiers des équipements de mesure;
- vérifier que les connecteurs sont solidement mis en place;
- déplacer le système de mesure du radar à une autre position, où l'équipement de mesure sera protégé du radar par des bâtiments ou des arbres, et où l'antenne sera hissée en haut du mât télescopique pour surmonter ces obstacles;
- éloigner le système de mesure du radar.

Un système de mesure bien conçu doit réduire au minimum la possibilité de ces signaux de traversée non désirés.

Etape 3: Déterminer les paramètres des émissions radar

Avant d'entreprendre les mesures, il est indispensable de déterminer les paramètres que sont l'intervalle de balayage du faisceau et la largeur de bande efficace des émissions. Comme d'autres caractéristiques, l'intervalle de balayage s'obtient en calant l'analyseur de spectre en mode d'excursion zéro, en déterminant un intervalle de balayage de plusieurs secondes, puis en observant le balayage du faisceau du radar.

On déterminera la largeur de bande d'émission en appliquant la procédure exposée dans le corps de la présente Annexe, l'analyseur de spectre étant calé sur la fréquence fondamentale du radar selon un mode d'excursion zéro, et les largeurs de bande FI et vidéo étant mises au départ à leur plus grande valeur disponible. La largeur de bande FI est ensuite réduite chaque fois que le faisceau du radar balaie le système de mesure, et on prend note de la largeur de bande à laquelle diminue le niveau de puissance reçu. Cette largeur de bande est la largeur de bande de mesure la plus large possible, qui est toutefois inférieure à la largeur de bande d'émission du radar; ce sera la largeur de bande de mesure qu'on utilisera, sauf si dans des circonstances particulières on est amené à observer le radar dans une largeur de bande particulière en réception.

Il convient par ailleurs de prendre note d'autres paramètres d'émission du radar, à savoir: le taux de récurrence des impulsions, la présence éventuelle d'oscillations et de décalage des impulsions ainsi que la largeur de ces dernières. On peut mesurer les trois premiers sur un oscilloscope connecté à la sortie vidéo de l'analyseur de spectre. La largeur des impulsions RF (50% des points de tension) et le temps de montée (10-90% des points de tension) doivent être mesurés à l'aide d'un potentiomètre de crête ou d'une diode appropriée de détecteur RF large bande, qui sera utilisé dans la région quadratique et couplé à un oscilloscope dont la largeur de bande sera suffisante pour obtenir la forme d'onde des impulsions, sans distorsion liée à la largeur de bande limitée du détecteur.

Etape 4: Etalonner le système de mesure

Méthode directe manuelle:

- la méthode manuelle exige que soient étalonnés tous les éléments de mesure, les uns après les autres, ou l'ensemble du dispositif de mesure.

Méthode directe automatique:

- voir l'Appendice 2 à l'Annexe 1. On recommande un étalonnage à l'aide d'une diode de bruit, bien que l'on puisse utiliser d'autres méthodes et en particulier des générateurs de signaux.

Etape 5: Configurer le logiciel du système de mesure (méthode automatique uniquement)

Il faut configurer le logiciel de mesure et notamment la fréquence de début (MHz), la fréquence d'arrêt (MHz), la taille des pas (MHz), l'intervalle entre les pas (MHz), la largeur de bande FI (MHz), la largeur de bande vidéo ($\geq$ largeur de bande FI), le détecteur (crête positive), le niveau de référence de l'analyseur de spectre (normalement -10 dBm), l'affaiblissement initial à la fréquence de début (normalement 0 dB) et d'autres données telles que l'emplacement géographique, le type de radar, la dénomination du projet de mesure, etc.

Etape 6: Vérifier la linéarité pendant les mesures

Il est indispensable de préserver l'intégrité des mesures en vérifiant la linéarité pendant les opérations. Lors de la prise des mesures, que ce soit à la fréquence fondamentale ou dans les rayonnements non essentiels, il convient de vérifier périodiquement la linéarité du système en introduisant 10 dB d'affaiblissement RF à l'entrée RF, en amont du AFB. Le résultat devrait toujours être une baisse de 10 dB du niveau des signaux mesurés; sinon, on a soit une surcharge de l'entrée, soit la présence d'un signal de traversée non désiré. Ces problèmes potentiels doivent être anticipés par une bonne conception du système. S'ils se posent, on peut être amené soit à prendre des mesures supplémentaires pour protéger le système de mesure, soit carrément à changer d'emplacement, comme il a été indiqué à l'Etape 2 ci-dessus.

Etape 7: Mesurer le radar dans plusieurs largeurs de bande FI (opération recommandée, mais pas indispensable)

Il peut être utile de mesurer les émissions du radar dans plusieurs largeurs de bande. On obtient ainsi une indication claire et précise de la variation de la puissance du radar mesurée, en fonction de la largeur de bande du récepteur à telle ou telle fréquence donnée du spectre.

Appendice 2 à l'Annexe 1

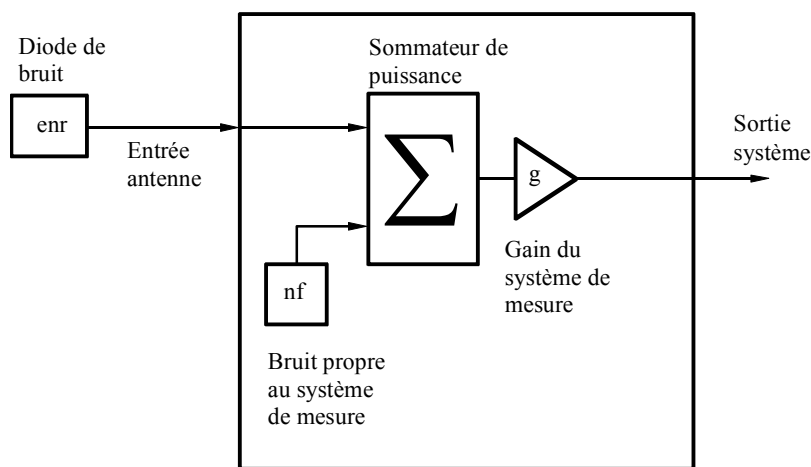
Étalonnage du gain et du facteur de bruit au moyen d'une diode de bruit

Il convient d'étalonner le système de mesure avant toute mesure portant sur le spectre d'émission des radars. Lors des mesures, des corrections de gain doivent être apportées automatiquement à chaque point de mesure. Pour les mesures de facteur de bruit de 20 dB ou moins, l'étalonnage du facteur de bruit, γ , peut être effectué au moyen d'une diode de bruit. Le présent Appendice décrit la théorie et la procédure relatives à cet étalonnage.

L'étalonnage au moyen d'une diode de bruit d'un récepteur syntonisé sur une fréquence particulière peut être représenté en termes de composantes localisées comme le montre la Fig. 8. Dans ce diagramme, le symbole Σ représente une fonction de sommation de puissance qui ajoute toute puissance appliquée à l'entrée du système de mesure à la puissance de bruit intrinsèque du système. Le symbole g représente le gain total du système de mesure. Le facteur de bruit du système de mesure est désigné par n_f , et le rapport de bruit excédentaire de la diode par enr . (Dans le présent Appendice, toutes les quantités algébriques en minuscules, telle « g », représentent des unités linaires. Toutes les quantités algébriques en majuscules, telle « G », représentent des unités en décibels.)

FIGURE 8

Étalonnage par diode de bruit: Schéma à composante localisée



1177-08

Le facteur de bruit est le rapport exprimé en termes de puissance de bruit produite par un dispositif, $n_{dispositif}$ (W), sur le bruit thermique:

$$\frac{n_{dispositif}}{k T B}$$

où:

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T : température du système (K)

B : largeur de bande (Hz).

Le rapport de bruit excédentaire est égal au facteur de bruit moins un, ce qui donne la fraction de puissance excédentaire de $k T B$. Le facteur de bruit d'un système est défini par la relation $10 \log$ (facteur de bruit). On peut utiliser le facteur de rapport de bruit excédentaire étant donné que de nombreuses sources de bruit sont spécifiées avec ce paramètre.

En ce qui concerne l'étalonnage de la diode de bruit, le principal problème tient à la différence du signal de sortie lorsque la diode de bruit est activée ou désactivée. Lorsque la diode de bruit est activée, la puissance $P_{on}(W)$ est donnée par la relation:

$$p_{on} = (nf_s + enr_d) \times g k T B$$

où:

nf_s : facteur de bruit du système

enr_d : rapport de bruit excédentaire de la diode de bruit.

Lorsque la diode est désactivée, la puissance, $P_{off}(W)$, est donnée par la relation:

$$p_{off} = (nf_s) \times g k T B$$

Le rapport entre P_{on} et P_{off} est le facteur Y :

$$y = \left(\frac{p_{on}}{p_{off}} \right) = \frac{(nf_s + enr_d)}{nf_s}$$

$$Y = 10 \log(y) = 10 \log \left(\frac{p_{on}}{p_{off}} \right) = P_{on} - P_{off}$$

On peut en déduire le facteur de bruit du système qui est donné par la relation:

$$nf_s = \frac{enr_d}{y - 1}$$

Le facteur de bruit du système de mesure est donc:

$$NF_s = 10 \log \left(\frac{enr_d}{y - 1} \right) = ENR_d - 10 \log (y - 1) = ENR_d - 10 \log (10^{Y/10} - 1)$$

On obtient ainsi:

$$g = \frac{p_{on} - p_{off}}{enr_d \times k T B}$$

$$G = 10 \log (p_{on} - p_{off}) - 10 \log (enr_d \times k T B)$$

ou

$$G = 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right) - ENR_d - 10 \log (k T B)$$

Pour l'étalonnage avec la diode de bruit, l'équation précédente est utilisée pour calculer le gain du système de mesure à partir des valeurs mesurées sur la diode de bruit.

Bien que l'équation donnant NF_s peut être utilisée pour calculer le facteur de bruit du système de mesure, le logiciel peut utiliser une équation équivalente, à savoir:

$$nf_s = \frac{P_{off}}{g k T B}$$

$$NF_s = 10 \log (P_{off}) - 10 \log (g k T B) = P_{off} - G - 10 \log (k T B)$$

et en explicitant le gain dans l'équation précédente on obtient:

$$NF_s = P_{off} + ENR_d - 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right)$$

Les valeurs du gain et de facteur de bruit déterminées à l'aide de ces équations peuvent être stockées dans des tableaux. Les valeurs de gain sont utilisées pour corriger les données de mesure fréquence par fréquence.

En excluant l'antenne de réception, le trajet total du signal est étalonné avec la source diode de bruit avant les mesures sur le spectre radar. Une diode de bruit est connectée à l'entrée de la première ligne RF en lieu et place de l'antenne de réception. La connexion peut être réalisée manuellement ou par un relais selon la configuration de mesure. Le niveau de bruit du système est mesuré en une série de points de la plage de fréquences du système, la diode de bruit étant en circuit. La mesure du bruit est effectuée en réglant la largeur de bande FI à 1 MHz et la largeur de bande vidéo à 1 kHz. La diode de bruit est alors mise hors circuit et le bruit du système est mesuré comme précédemment, aux mêmes fréquences. Le calculateur du système de mesure recueille ainsi un ensemble de valeurs P_{on} et P_{off} sur une série de fréquences dans la bande étudiée. Les valeurs P_{on} et P_{off} sont utilisées pour obtenir le gain et le facteur de bruit du système de mesure à l'aide des équations précédentes.

Appendice 3 à l'Annexe 1

Mesure de la largeur d'impulsion et des temps de montée et de descente des impulsions

1 Introduction

Le présent Appendice est destiné à donner des indications concernant la mesure des paramètres des impulsions radar nécessaires pour l'application du gabarit d'émission au domaine hors bande. Les émissions non désirées dans le domaine hors bande pour les systèmes radar font l'objet de l'Annexe 8 de la Recommandation UIT-R SM.1541. Pour déterminer la largeur de bande nécessaire B_n et la largeur de bande à 40 dB, B_{-40} , la largeur d'impulsion t et le temps de montée t_r des impulsions radar doivent être mesurés².

² Lorsque le temps de descente t_f de l'impulsion radar est inférieur au temps de montée t_r , celui-ci doit être utilisé à la place du temps de montée en appliquant les équations données dans la Recommandation UIT-R SM.1541.

La largeur d'impulsion, t , est mesurée aux points -6 dB (points de tension à 50%) d'une impulsion radar. Le temps de montée t_r ou le temps de descente t_f est mesuré entre les points 0,9 et 20 dB (tension à 10%-90%) sur les fronts avant et arrière respectivement de l'impulsion. Pour les impulsions codées, t_r et t_f sont les temps de montée et de descente d'une sous-impulsion. Lorsque les sous-impulsions ne sont pas discernables, on peut supposer que t_r est égal à 40% du temps pour passer d'une phase ou d'une sous-phase à la suivante.

Pour certains radars, la largeur d'impulsion et les temps de montée et de descente peuvent être mesurés par une connexion matérielle vers un coupleur directionnel. Toutefois, les caractéristiques de l'impulsion rayonnée peuvent différer quelque peu de celles mesurées à partir des coupleurs directionnels. De plus, certains radars ne sont pas équipés d'un coupleur directionnel. Pour ces radars, les largeurs d'impulsion et les temps de montée et de descente peuvent être mesurés sur l'énergie rayonnée si la largeur de bande du système de mesure est suffisante (c'est-à-dire supérieure à $(1/t_r)$). Un obstacle potentiel à la mesure de la largeur d'impulsion par rayonnement est l'effet de la propagation de l'énergie par trajets multiples qui provoque une chute en escalier sur le front arrière de chaque impulsion rayonnée. Cet effet peut être minimisé par l'utilisation d'une antenne à réflecteur parabolique reliée au système de mesure. Si l'effet des trajets multiples peut être suffisamment atténué pour que la première chute en escalier du front arrière se produise à plus de 6 dB en dessous du niveau de l'impulsion nominale, une mesure par rayonnement de la largeur d'impulsion est possible si l'exigence en matière de largeur de bande est satisfaite $(1/t_r)^3$. Un détecteur à diode à large bande est nécessaire pour obtenir une largeur de bande suffisante.

2 Mesures sur des radars conventionnels

2.1 Mesures des impulsions par connexion matérielle

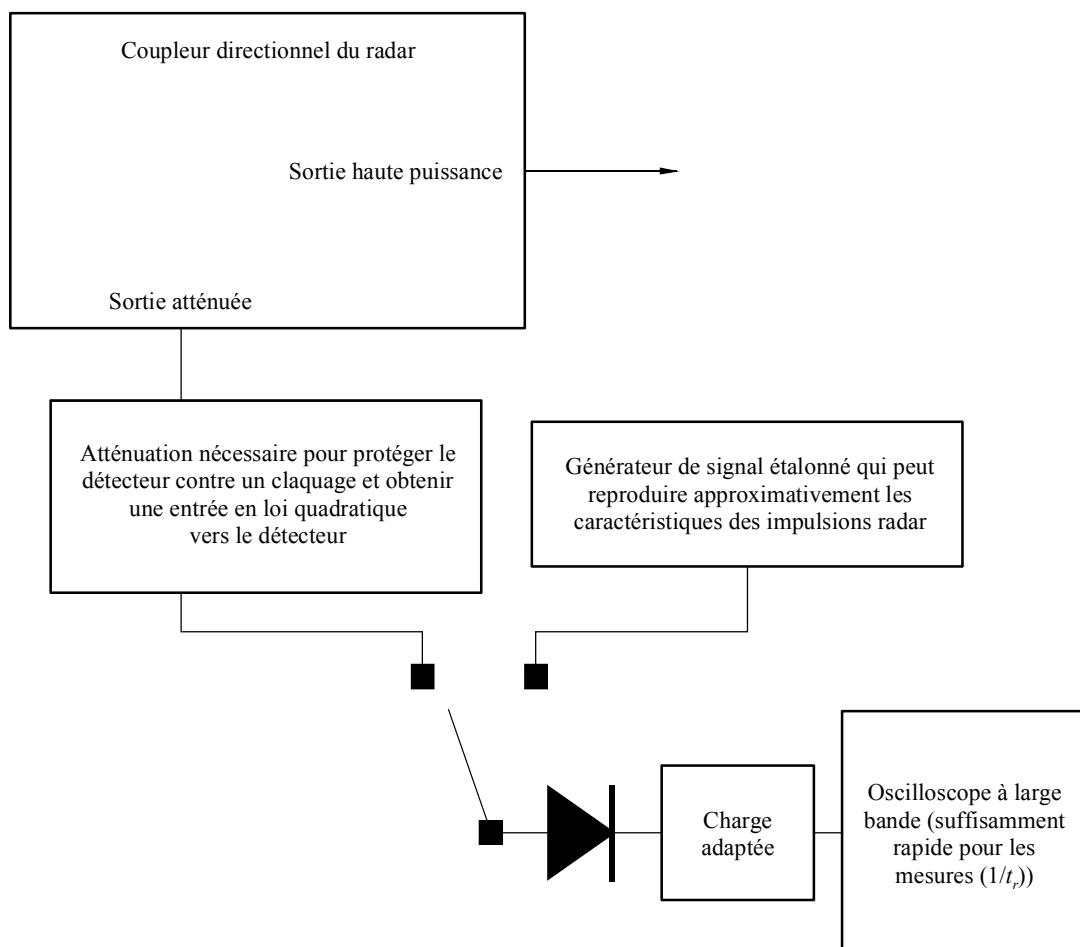
Le montage pour ce type de mesures est représenté à la Fig. 9. Un câble coaxial d'impédance convenable est connecté entre la sortie du coupleur directionnel et l'entrée d'un détecteur à diode à large bande (largeur de bande supérieure à $(1/t_r)$). Un atténuateur variable (0-70 dB par exemple) est inséré entre le coupleur et le détecteur. Avant de connecter le détecteur, l'atténuateur est réglé à un niveau suffisamment grand pour éviter d'endommager la diode⁴. Le niveau maximal admissible d'entrée du détecteur peut être supposé égal à +20 dBm, si l'on ne dispose pas d'autres données pertinentes.

³ Par exemple, une impulsion de 1 μ s peut présenter un temps de montée inférieur à 0,1 μ s. Pour pouvoir mesurer avec précision ce temps de montée, il faudrait une largeur de bande supérieure à 10 MHz. Il existe des oscilloscopes dont les largeurs de bande peuvent atteindre 2 GHz. Pour la mesure des temps de montée/descente, les oscilloscopes présentant une largeur de bande minimale de 500 MHz devraient être utilisés. La largeur de bande doit être disponible dans le mode «un seul coup» (sans échantillon répétitif), étant donné que les mesures sont faites sur des impulsions radar uniques.

⁴ Le réglage initial de l'atténuateur peut être déduit du niveau de puissance crête du radar et de l'affaiblissement d'insertion spécifié du coupleur directionnel.

FIGURE 9

Schéma synoptique du montage de mesure de la largeur d'impulsion et des temps de montée et de descente des impulsions radar au moyen d'une connexion matérielle avec un coupleur directionnel



1177-09

La sortie du détecteur est reliée à un oscilloscope dont la bande passante est supérieure à $(1/t_r)$. Les impédances doivent être adaptées de manière appropriée; la plupart des oscilloscopes modernes ayant des valeurs d'impédance réglables, dans ce cas on choisira l'impédance $50\ \Omega$ qui convient généralement. Un couplage continu devra être utilisé à l'entrée de l'oscilloscope.

L'oscilloscope est réglé pour afficher et enregistrer⁵ des enveloppes d'impulsions radar. Le réglage de l'atténuateur variable est consigné par le personnel effectuant la mesure.

Puis, le câble allant du coupleur directionnel du radar est déconnecté de ce dispositif. Il est ensuite relié à la sortie d'un générateur de signal étalonné qui est capable de produire des impulsions ayant approximativement la même largeur que celle mesurée sur le radar. La sortie du générateur de signal est réglée afin de générer une réponse en amplitude sur l'oscilloscope qui est la même pour les deux enveloppes, de préférence d'environ +10 dBm.

⁵ La plupart des oscilloscopes peuvent enregistrer des données sur un disque interne ou sur un ordinateur externe via un bus IEEE-488 (GPIB). Un autre moyen consiste à photographier l'écran de l'oscilloscope avec un appareil photographique numérique.

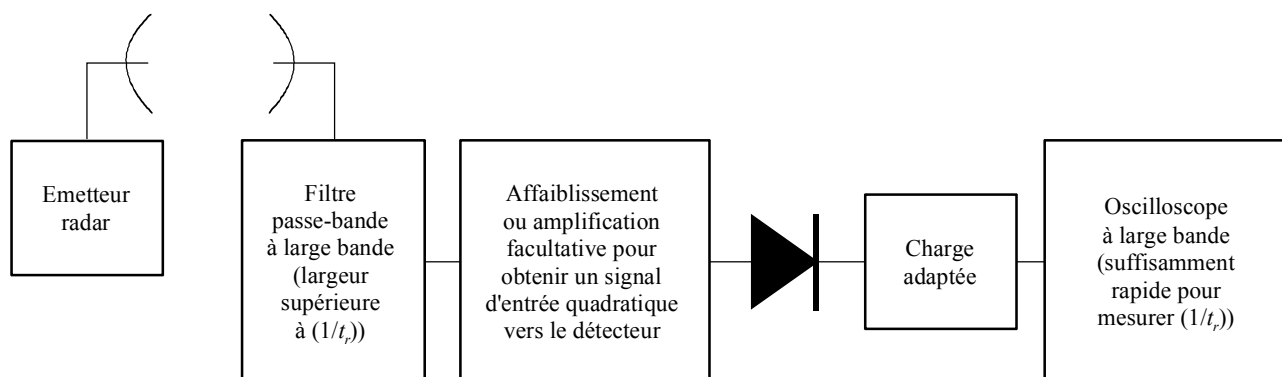
Ce réglage fait, la réponse du détecteur à semi-conducteur peut être étalonnée comme suit. Le niveau de sortie du générateur de signal est diminué successivement de 0,9 dB, 6 dB et 20 dB.⁶ Pour chacun de ces niveaux, des marqueurs verticaux sont placés sur l'enveloppe d'impulsion mesurée. Des intervalles de temps résultant entre les marqueurs verticaux indiquent la largeur d'impulsion (Δ entre les points à 6 dB), le temps de montée (Δ entre les points 0,9 dB et 20 dB sur le front de montée), et les temps de descente (Δ entre les points 0,9 dB et 20 dB sur le front de descente).

2.2 Mesures des impulsions par couplage radiatif

Pour les radars qui ne disposent pas de coupleurs directionnels, les caractéristiques des impulsions ne peuvent être mesurées que sur leurs rayonnements. La Fig. 10 montre la configuration matérielle du système de mesure des impulsions rayonnées.

FIGURE 10

Diagramme synoptique du montage de mesure de la largeur d'impulsion radar et du temps de montée (ou du temps de descente s'il est plus court) au moyen des impulsions rayonnées



1177-10

La procédure qu'il convient d'utiliser est la suivante:

Etape 1: positionner le système de mesure à un endroit où le trajet en visibilité directe vers l'antenne de l'émetteur radar est dégagé, et aussi proche que possible, sans subir une dégradation due aux caractéristiques du système de mesure (par exemple, alimentation), ou perte de puissance en passant au-dessous du faisceau principal ou en se trouvant dans les limites de la distance en champ proche de l'antenne de radar ou de l'antenne de mesure.

Etape 2: utiliser une antenne à haut gain (par exemple une parabole de 1 m de diamètre) reliée au système de mesure pour recevoir les impulsions provenant du radar avec une amplitude la plus élevée possible et pour ne pas recevoir les signaux provenant d'autres émetteurs.

Etape 3: placer, à l'entrée de l'antenne de mesure, un filtre passe-bande qui ne retransmettra que les signaux à la fréquence fondamentale et dont la largeur de bande est supérieure $(1/t_r)$ à celle des impulsions radar à mesurer. Après le filtre passe-bande, placer un détecteur à diode qui a une

⁶ Les sorties du détecteur à semi-conducteur ne sont pas nécessairement linéaires; par conséquent, les points de tension à 10, 50 et 90% pour le signal RF peuvent ne pas correspondre aux points de tension à 10, 50 et 90% au niveau de la sortie de courant continu du détecteur. Un générateur de signal étalonné est nécessaire pour déterminer les tensions continues de sortie réelles correspondant à ces tensions d'entrée.

largeur de bande et une vitesse de réponse en matière de temps de montée supérieure ($1/t_r$) à celle des impulsions radar à mesurer⁷.

Etape 4: connecter la sortie du détecteur à l'entrée d'un oscilloscope. L'impédance de sortie du détecteur doit être adaptée à l'impédance d'entrée de l'oscilloscope. L'oscilloscope doit avoir une largeur de bande en transitoire supérieure à celle des impulsions radar à mesurer ($1/t_r$). Régler l'oscilloscope en mode monocoup, avec un seuil de déclenchement suffisamment faible pour être sûr que les impulsions radar sont enregistrées. Attendre qu'une série d'impulsions soient enregistrées. Augmenter le seuil de déclenchement et attendre un nouvel ensemble d'impulsions pour activer le déclencheur. Poursuivre ce processus jusqu'à ce que le seuil soit suffisamment élevé pour qu'aucune autre impulsion ne soit enregistrée. Diminuer légèrement le seuil de déclenchement et attendre qu'une séquence soit enregistrée. La séquence d'impulsion montre le taux de répétition de l'impulsion.

Etape 5: mesurer la largeur d'impulsion et le temps de montée ou le temps de descente sur l'oscilloscope en utilisant les critères spécifiés ci-dessus pour les mesures à connexion matérielle.

2.3 Notes sur la procédure de mesure des impulsions rayonnées

En plaçant le système de mesure au voisinage du radar, en visibilité directe, les problèmes de propagation par trajets multiples sont minimisés et la puissance reçue provenant des impulsions est maximisée. L'utilisation d'une antenne de mesure à gain élevé atténue encore plus le problème de propagation par trajets multiples et augmente le niveau de puissance des impulsions reçues.

Il faut veiller à ce que tous les éléments du système de mesure présentent une largeur de bande et les caractéristiques de temps de réponse suffisantes pour mesurer le temps de montée des impulsions radar. Les détecteurs à diode à réponse rapide sont probablement nécessaires pour satisfaire à cette exigence.

Dans des environnements multiradars, ou des environnements avec des signaux environnants intenses non produits par des radars, qui se trouvent au bord ou à proximité du bord de la bande occupée par le radar faisant l'objet de la mesure, il peut être nécessaire de prendre des dispositions pour isoler les impulsions du radar des autres signaux. L'utilisation d'une antenne parabolique pour les radars hyperfréquences et d'un filtre passe-bande aux bornes de l'antenne de mesure aidera à isoler les signaux pulsés utiles. Si ces éléments ne permettent pas d'isoler les impulsions utiles, un dispositif de déclenchement en fonction de l'amplitude offrira l'isolation nécessaire, en supposant que l'amplitude des impulsions émanant du radar étudié est supérieure, dans le système de mesure, à celle des autres signaux environnants.

3 Mesures pour les radars utilisant des technologies de pointe

3.1 Mesures des impulsions par connexion matérielle

Dans ce contexte, les radars utilisant les technologies de pointe sont ceux qui font appel à la modulation d'impulsion. Il peut s'agir d'une modulation de phase ou de fréquence. S'il s'agit d'une MF (gazouillement), les mêmes techniques de mesure peuvent être utilisées telles que spécifiées ci-dessus. Mais la largeur de bande de mesure doit être égale ou supérieure à la largeur de bande du signal modulée. En pratique, cela peut nécessiter l'utilisation d'une diode de détection à large bande.

⁷ La puissance crête d'entrée au niveau du détecteur doit se trouver dans la région où la réponse est quadratique. Pour obtenir le niveau d'entrée de puissance approprié, il peut être nécessaire d'installer un atténuateur ou un amplificateur entre le filtre passe-bande et le détecteur à diode.

Les mesures des temps de montée sur les impulsions avec «gazouillis» (modulées en fréquence) sont les mêmes que celles effectuées sur des impulsions sans «gazouillis»; on peut utiliser la même procédure que celle présentée ci-dessus.

Facteur de compression (système à impulsion MF): Les mesures destinées à déterminer le facteur de compression des impulsions sont décrites ci-après. Cette approche convient à la détermination du facteur de compression des impulsions pour tous les radars, y compris pour les radars évolués.

Pour les impulsions radar codées en phase, la mesure de la largeur d'impulsion est également effectuée comme spécifié ci-dessus. En revanche, la mesure du temps de montée de chaque segment de phase (élément) peut s'avérer difficile. La première difficulté apparaît avec le codage de phase ordinaire, dans lequel la modification de phase de π peut se produire entre chaque élément. Bien que la phase soit décalée, la valeur quadratique du signal est observée à la sortie du détecteur, supprimant ainsi l'information de phase. De ce fait, les limites des éléments ne peuvent pas être observées, en principe, avec un détecteur quelconque.

Dans la réalité, des transitoires peuvent apparaître au niveau des transitions de phase entre les «gazouillis» et ces transitoires sont visibles sur un oscilloscope. Néanmoins, l'observation des transitions entre éléments ne permet pas de mesurer le temps de montée d'un élément.

Nombre total de sous-impulsions à l'intérieur de chaque impulsion (système codé en phase): Les radars utilisant le déphasage conventionnel avec commutation instantanée de $\pm 180^\circ$ généreront normalement des transitoires qui peuvent être observées dans les enveloppes des impulsions détectées. De cette façon, le nombre d'éléments de chaque impulsion pourra être déterminé. Toutefois, pour les systèmes radar utilisant la modulation à déphasage minimal (MDM) ou d'autres technologies de déphasage qui éliminent ces transitoires, il est impossible de déterminer le nombre d'éléments à l'intérieur de chaque impulsion en mesurant l'enveloppe d'impulsion détectée. Pour ces radars, si l'on ne dispose pas de deux connexions matérielles pour observer les canaux I et Q, le nombre d'éléments ne pourra être déterminé qu'en utilisant la documentation de référence tels les manuels techniques, les manuels d'exploitation et les feuilles de caractéristiques.

Mesure du temps de montée des éléments: Pour les impulsions à codage de phase conventionnel, le temps de montée des éléments peut être mesuré directement, seulement si le signal est échantillonné avant la détection. Cela peut être effectué en connectant la sortie FI⁸ d'un analyseur du spectre à un analyseur de signal vectoriel ou à un dispositif analogue de traitement numérique du signal.

Les impulsions avec codage en phase évolué n'emploient pas la modification de phase discontinue entre éléments. Elles font appel à la modulation MDM. Avec ce type de modulation, pour pouvoir observer le temps de montée des éléments, il est nécessaire de séparer les composantes I et Q de l'impulsion et d'observer le temps de montée de chacune des composantes. Cette opération peut être effectuée au moyen d'un analyseur de signal vectoriel (VSA, *vector signal analyser*) programmé (ou un processeur de signal numérique (DSP, *digital signal processor*) spécialisé ou un dispositif d'accès programmable par champ, FPGA (*field programmable gate array*)) qui est connecté à la sortie FI de l'analyseur de spectre.

Si l'on ne dispose pas de l'équipement de mesure de phase ci-dessus (VSA, DSP ou FPGA avec le logiciel approprié), une mesure du temps de montée d'impulsion peut être effectuée sur le front avant de l'impulsion au lieu d'une mesure directe du temps de montée de l'élément. La mesure de temps de montée est effectuée comme décrit ci-dessus. Dans ce cas, il faut le signaler dans l'ensemble de données résultantes.

⁸ La sortie FI de l'analyseur de spectre est supposée être prélevée avant les étages de détection et les étages de largeur de bande de résolution, de sorte que la largeur de bande adéquate est conservée pour une mesure du temps de montée des impulsions.

3.2 Mesures d'impulsion par couplage radiatif

Dans les radars modernes, qui ne disposent pas d'un coupleur directionnel (tel que les systèmes qui utilisent plusieurs modules d'émission), les caractéristiques des impulsions doivent être mesurées par rayonnement comme décrit plus haut. Il faut veiller à maintenir une largeur de bande adéquate pour la mesure du temps de montée de l'impulsion et le signal à l'entrée du détecteur à diode doit avoir une amplitude correspondant à une réponse quadratique du dispositif.

3.3 Utilisation de la documentation de référence pour déterminer les caractéristiques des impulsions

Les manuels d'exploitation, les feuilles de caractéristiques et les autres références propres aux radars peuvent être supposés comme étant suffisamment précis pour l'ensemble des radars fabriqués sur la chaîne de production d'un modèle particulier ou pour une série de radars, bien qu'il faille reconnaître que les caractéristiques d'un radar peuvent être quelque peu différentes de la moyenne. Une telle variation apparaît comme le résultat des différences en matière de qualité de fabrication et de maintenance, sur site du radar. Si l'une ou plusieurs des caractéristiques d'impulsions demandées ne peuvent être mesurées directement, les valeurs des paramètres qui sont citées dans ces références peuvent être utilisées pour les calculs de gabarit d'émission.

Appendice 4 à l'Annexe 1

Calcul des facteurs de correction de gain pour une antenne réseau plan au moyen d'un programme logiciel écrit en langage BASIC

Ce programme en langage BASIC permet d'effectuer des calculs en champ éloigné à partir de mesures en champ proche. Il ne prend en compte que les variations de phase de l'onde reçue résultant de la différence entre le front d'onde RF sphérique et l'antenne réseau plan. Il ne doit donc être utilisé que pour déterminer l'axe de visée ou le gain d'antenne maximal à l'infini à partir de mesures en champ proche. Le diagramme de gain d'une antenne n'est pas traité dans ce contexte.

'Test data for error $-.025 \pi$ radians ; error $\sim .3$ dB

'freq = 3000

'l = 10

'd = 1

,

CLS

,

INPUT «Indiquer la fréquence de l'antenne en MHz»; freq

INPUT «Indiquer maintenant la distance de mesure par rapport à l'antenne en mètres»; l

INPUT «Indiquer la dimension maximale de l'antenne en mètres»; d

```

',
',
',

CONST c = 300
CONST pi = 3.141592654#
',
',

lamda = c / freq
num = 100
',
',

IF d < (5 * lamda) THEN
    PRINT «Les dimensions de l'antenne doivent être supérieures (* 5) à»;
    PRINT «la longueur d'onde pour un usage précis de ce programme»
    STOP
END IF

'sum of inphase and quadrature field elements
sumi = 0
sumj = 0
',

'system is symmetrical so integrate from 0 to d/2
FOR i = 0 TO num - 1
    dprime = i * d / (2 * (num - 1))
    phasediff = (1 - ((1 ^ 2) + (dprime ^ 2)) ^ .5) * 2 * pi / lambda
    PRINT «La différence de phase est»;
    PRINT USING «##.##»; phasediff;
    icode = COS(phasediff)
    sumi = sumi + icode
    jcode = SIN(phasediff)
    sumj = sumj + jcode
NEXT i
PRINT «L'erreur de phase maximale est»;
PRINT USING «##.##»; phasediff / pi;
PRINT «* pi radians»

'form final received planar power received from spherical RF wave
res = ((sumj) ^ 2 + (sumi) ^ 2) ^ .5

```

```
'PRINT «Le résultat est»; res; «i est»; i; «le nombre est»; num
'Calc gain reduction
gprime = num / res
'

glog = 20 * (LOG(gprime) / LOG(10#))
PRINT «La réduction de gain d'un champ éloigné infini est»;
PRINT USING «##.###»; glog;
PRINT «dB»
END
```

Annexe 2

Mesure des rayonnements non désirés des systèmes radar suivant les dispositions des alinéas 2 et 3 du *recommande*

1 Introduction

Les techniques recommandées sont appelées directes et indirectes. La première permet de mesurer avec précision les rayonnements non désirés émis par les radars (suivant les dispositions des alinéas 2 et 3 du *recommande*) moyennant la mesure en espace libre des signaux rayonnés; la deuxième permet de mesurer les signaux à la sortie de l'émetteur, puis de les combiner avec des modèles du système suivant pour estimer les intensités de champ en espace libre. Une comparaison des deux techniques a montré que les résultats étaient très proches, la variation étant de l'ordre de 2 dB.

2 Largeur de bande de référence

En général, les règles utilisées pour déterminer la largeur de bande de référence dans le cas des radars haute fréquence (voir l'Annexe 1) s'appliquent aux radars basse fréquence moyennant une simple adaptation des paramètres de la forme des ondes.

Pour les systèmes radar, la largeur de bande de référence, B_{ref} utilisée pour établir les limites des rayonnements non désirés (Recommandations UIT-R SM.329 et UIT-R SM.1541, et Appendice 3 du RR) doit se calculer pour chaque système radar particulier. Pour les trois types généraux de modulation des impulsions radar utilisées pour les fonctions, à grande longueur d'onde, de radionavigation, de radiolocalisation, d'acquisition, de poursuite et de radiorepérage, les valeurs de la largeur de bande de référence sont déterminées au moyen des formules suivantes:

- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions non codées, un divisé par la durée de l'impulsion radar (s) (par exemple, si la durée de l'impulsion radar est égale à 100 μ s, la largeur de bande de référence est alors de $1/100 \mu\text{s} = 10 \text{ kHz}$);
- pour les radars à fréquence fixe, à impulsions codées en phase, un divisé par la durée de l'élément de phase (s) (par exemple, si l'élément codé en phase est égal à 200 μ s, la largeur de bande de référence est alors de $1/200 \mu\text{s} = 5 \text{ kHz}$);

- pour les radars MF ou à compression d'impulsions, racine carrée de la quantité obtenue en divisant la largeur de bande de l'impulsion comprimée, (MHz) par la durée de l'impulsion (μs) (par exemple, si la MF est comprise entre 1 250 MHz et 1 251 MHz, soit 10 kHz, pendant l'impulsion de 20 ms, la largeur de bande de référence est alors de $(10 \text{ kHz}/20 \text{ ms})^{1/2} = 700 \text{ Hz}$).

Lorsque la largeur de bande calculée ci-dessus est supérieure à 1 MHz, on doit utiliser une largeur de bande de référence, B_{ref} , de 1 MHz.

3 Largeur de bande de mesure et paramètres du détecteur

La largeur de bande de mesure, B_m , est définie comme étant la largeur de bande en impulsions du récepteur et est supérieure à la largeur de bande FI, B_{if} , (parfois dénommée largeur de bande de résolution pour les analyseurs de spectre). La largeur de bande de mesure, B_m peut être calculée à partir de la formule suivante:

$$B_m = B_{if} \times MBR$$

Le MBR, doit être déterminé pour le récepteur de mesure utilisé. Le MBR est approximativement de 3/2 pour un filtre gaussien d'une largeur de bande FI de -3 dB , utilisé dans de nombreux récepteurs d'analyseur de spectre du commerce.

NOTE 1 – Dans certains instruments, la largeur de bande FI est définie au point de -6 dB .)

Pour obtenir une des largeurs de bande de mesure recommandées ci-après, on doit choisir une largeur de bande FI appropriée pour le récepteur. (En général, les règles utilisées pour déterminer la largeur de bande de mesure pour les radars haute fréquence (voir l'Annexe 1) s'appliquent aux radars basse fréquence moyennant une simple adaptation des paramètres de la forme des ondes.)

- Largeur de bande de mesure^{9, 10}
- $\leq (1/T)$ 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 de $100 \mu\text{s}$, la largeur de bande FI de mesure doit être $\leq 1/(100 \mu\text{s}) = 10 \text{ kHz}$).
 - $\leq (1/t)$ 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 $260 \mu\text{s}$, chaque impulsion étant constituée de 13 éléments codés en phase d'une durée de $20 \mu\text{s}$, la largeur de bande FI de mesure doit être $\leq 1/(20 \mu\text{s}) = 50 \text{ kHz}$).
 - $\leq (B/T)^{1/2}$, pour les radars à balayage de fréquence (MF, ou à compression d'impulsions, ou encore FMCW), 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 1 250-1 251 MHz (= 10 kHz de spectre) pendant chaque impulsion comprimée, et si la durée de cette impulsion est de 20 ms, la largeur de bande FI de mesure doit être alors $\leq (10 \text{ kHz}/20 \text{ ms})^{1/2} = \sqrt{0,5} \text{ kHz} \approx 700 \text{ Hz}$).

⁹ Dans tous les cas, si la largeur de bande de mesure calculée mentionnée ci-dessus est supérieure à 1 MHz, on doit utiliser une largeur de bande de mesure, B_m , proche de 1 MHz.

¹⁰ Les corrections associées aux transformations de la largeur de bande de mesure en largeurs de bande de référence et PEP (voir le § 3 de l'Annexe 1) s'appliquent également aux radars à grande longueur d'onde visés ici dans l'Annexe 2.

4 Gamme dynamique du système de mesure

Le système de mesure doit pouvoir mesurer les niveaux des rayonnements non désirés selon les dispositions de l'Appendice 3 du RR. Pour obtenir une représentation complète du spectre, notamment dans le domaine des rayonnements non essentiels, il est recommandé de pouvoir mesurer les niveaux des émissions 10 dB en dessous des niveaux indiqués dans l'Appendice 3 du RR.

Pour que le niveau de confiance dans les résultats soit élevé, il faut que la gamme dynamique de mesure du système soit nettement plus importante que la gamme de mesure qui est demandée (marge (2) dans la Fig. 2).

La relation entre la gamme de mesure nécessaire et la gamme dynamique recommandée du système de mesure est indiquée dans la Fig. 2.

5 Méthode directe

Une méthode directe décrite ci-après peut être utilisée pour mesurer les rayonnements non désirés (hors bande et non essentiels) provenant des systèmes radar à grande longueur d'onde; elle permet d'accéder facilement au faisceau principal du radar, notamment lorsque l'antenne ou l'antenne réseau se situe au sol et est verticalement polarisée. Cette méthode a été utilisée pour mesurer les caractéristiques des émissions des systèmes radar à grande longueur d'onde fonctionnant aux fréquences jusqu'à 45 MHz, et à des niveaux de p.i.r.e. dans la gamme des mégawatts.

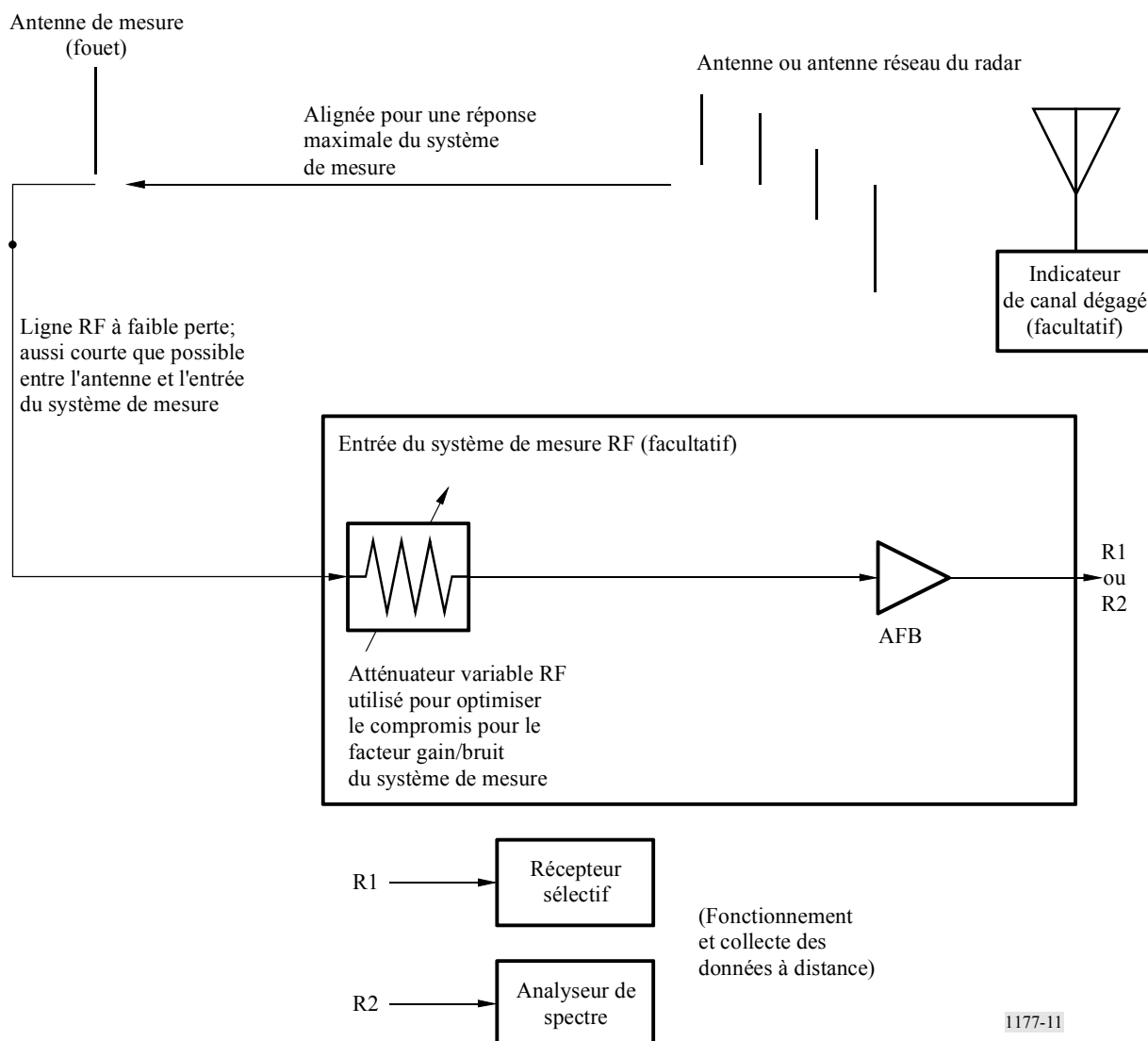
5.1 Matériel et logiciel de mesure

5.1.1 Antenne

Un diagramme par blocs du type du système de mesure nécessaire pour les deux méthodes directes est présenté à la Fig. 11. Le premier élément à prendre en considération dans le système est l'antenne de réception, laquelle doit avoir une réponse en fréquence dans une large bande, au moins aussi large que la gamme de fréquences à mesurer. A cette fin, il conviendra éventuellement d'utiliser des écrans au sol. Le gain ne pose normalement pas de problème, de sorte qu'il suffit d'utiliser une simple antenne-fouet pourvue d'un écran au sol. Pour les mesures large bande il faudra peut-être étalonner aussi le gain de l'antenne, opération qui se fera à l'aide d'une source de référence et d'une deuxième antenne de petite taille (correspondance approximative) branchée directement sur un potentiomètre.

FIGURE 11

**Diagramme par blocs pour la mesure des rayonnements non désirés des radars
en utilisant la méthode directe manuelle**



L'antenne doit, dans la mesure du possible, se situer dans le domaine éloigné, par exemple à 20 MHz à une distance supérieure à 1 km, bien que la mesure des caractéristiques spectrales n'ait fait apparaître aucune différence notable entre les mesures réalisées dans le domaine éloigné et celles effectuées dans le domaine proche. De nombreux radars à grande longueur d'onde synthétisent un faisceau qu'il est possible d'orienter électroniquement; dans ce cas, le faisceau doit être orienté ou l'antenne de mesure être positionnée de telle sorte qu'elle soit aussi proche que possible de la crête du faisceau principal.

La polarisation de l'antenne est choisie de manière à maximaliser la réponse vis-à-vis des signaux du radar.

Le câble raccordant l'antenne de mesure au système de mesure peut être un câble coaxial normal.

5.1.2 Indicateur de canal dégagé

Etant donné les conditions de propagation dans l'ionosphère, les émissions à grande longueur d'onde peuvent parcourir de grandes distances, et une grande partie du spectre qui est mesuré par l'antenne de test sera, en général, exposée à des signaux extérieurs. Il importe donc d'avoir un dispositif qui indique les canaux qui sont dégagés et ceux qui sont occupés, et qui de préférence peut saisir les

données correspondantes et donner une indication de la puissance du signal. On peut utiliser pour ce faire le système de mesure du spectre, ou un système de réception indépendant. Les données correspondantes peuvent être utilisées pour déduire la contribution des rayonnements non désirés qui peuvent avoir été causés par des sources extérieures; elles doivent pouvoir servir également à détecter un canal dégagé pour procéder au test du point B_{-40} et du domaine hors bande.

5.1.3 Entrée RF

L'entrée RF remplit deux fonctions. La première est de protéger l'entrée du système de détection moyennant l'utilisation d'un affaiblissement RF variable; la deuxième est une fonction de préamplification à faible bruit pour obtenir une sensibilité maximale aux émissions de faible puissance. Premier élément du dispositif d'entrée, l'atténuateur RF fournit un affaiblissement variable (par exemple de 0 à 70 dB) par pas fixes (par exemple, 10 dB/pas de l'atténuateur).

5.1.4 Système de mesure manuel

La mesure manuelle consiste à balayer le spectre par pas fixes (d'une valeur égale à la largeur de bande de mesure). A chaque balayage, on peut ajuster l'atténuateur pour maintenir la puissance de crête du radar dans la gamme dynamique du système de mesure (la limite est souvent imposée par l'amplificateur d'entrée et par l'amplificateur logarithmique de l'analyseur de spectre). Une fois que l'atténuateur RF d'entrée a été adapté à chaque balayage, on procède à la mesure de la puissance du radar à la fréquence en question.

L'élément final dans l'entrée RF est un AFB, élément suivant dans le chemin du signal après le présélecteur. Grâce à son faible bruit en entrée, le AFB est très sensible aux rayonnements non essentiels, de faible amplitude, émis par les radars et son gain compense le bilan de bruit du reste du système de mesure (par exemple une certaine longueur de la ligne de transmission, plus un analyseur de spectre/récepteur sélectif).

On optimise la sensibilité et la gamme dynamique du système de mesure en choisissant avec soin les caractéristiques de gain et de bruit du AFB. Il est en effet souhaitable d'en réduire le bruit tout en ayant un gain suffisant pour optimiser le fonctionnement des dispositifs de mesure après le AFB (afin de réduire surtout les pertes sur la ligne RF après l'entrée ainsi que le bruit de l'analyseur de spectre/récepteur sélectif). Dans l'idéal, la somme des valeurs de gain et de bruit du AFB (soit l'excès de bruit produit par le AFB doté à son entrée d'une borne de 50 Ω) doit être approximativement égale à la valeur de bruit de tout le système de mesure restant. Par exemple, en supposant que la valeur de bruit de l'analyseur de spectre soit de 25 dB et que l'affaiblissement sur la ligne RF entre l'entrée RF et l'analyseur soit de 5 dB, le AFB à l'entrée a donc à faire face à une valeur de bruit totale de 30 dB. La somme du gain et du facteur de bruit du AFB devrait donc être égale approximativement à 30 dB dans cet exemple. Dans ce cas le AFB pourrait combiner une valeur de bruit de 3 dB et un gain de 27 dB.

Le dernier dispositif du système de mesure RF est, pour l'essentiel, un analyseur de spectre qui peut être un dispositif du commerce, ou qui peut être pourvu d'un présélecteur ou d'un récepteur sélectif; il est possible d'utiliser n'importe quel équipement pouvant recevoir des signaux sur la gamme de fréquences en question. Des mesures ont été effectuées avec des récepteurs numériques modernes qui satisfont facilement aux conditions de fréquence et de gamme dynamique, ce qui dans une grande mesure dispense de la nécessité de prévoir un affaiblissement ou un gain dans le dispositif d'entrée.

6 Méthode indirecte

Dans la méthode indirecte, les mesures sont effectuées par couplage à partir de la sortie de chaque émetteur, l'appareil de mesure est analogue à celui de la méthode directe de ce point de vue. En présence de plusieurs émetteurs, il faut enregistrer l'amplitude qui est complexe, puis combiner ensemble les signaux dans le logiciel en tenant compte du facteur de pondération du réseau d'orientation du faisceau et des retards sur la ligne d'alimentation.

Pour la saisie des données il suffit de raccorder l'analyseur de spectre ou le récepteur à un ordinateur portable via une interface GPIB ou équivalente.
