

## RECOMMANDATION UIT-R M.1464-1\*

**Caractéristiques des radars de radiolocalisation, et caractéristiques et critères de protection applicables aux études de partage des radars de radionavigation aéronautique et des radars météorologiques du service de radiorepérage fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz**

(Question UIT-R 35/8)

(2000-2003)

**Résumé**

Cette Recommandation devrait servir aux analyses de brouillage entre systèmes fonctionnant dans le service de radiorepérage et systèmes fonctionnant dans d'autres services. Elle ne doit pas être utilisée pour les analyses de brouillage radar-radar.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les caractéristiques d'antenne, de propagation du signal, de détection des cibles et de grande largeur de bande nécessaire propres aux radars pour remplir leurs fonctions sont optimales dans certaines bandes de fréquences;
- b) que les caractéristiques techniques des radars météorologiques et des radars de radionavigation aéronautique sont déterminées par les objectifs du système et varient grandement, même à l'intérieur d'une bande;
- c) que le service de radionavigation est un service de sécurité au sens du numéro 4.10 du Règlement des radiocommunications (RR) et qu'aucun brouillage préjudiciable à son encontre ne peut être toléré;
- d) qu'une partie considérable du spectre attribué aux services de radiolocalisation et de radionavigation (s'élevant à environ 1 GHz) a été retirée à ces services ou reléguée à un statut inférieur depuis la CAMR-79;
- e) que certains groupes techniques de l'UIT-R envisagent la possibilité d'introduire de nouveaux types de systèmes (par exemple, systèmes d'accès hertzien fixe ou systèmes fixes ou mobiles à haute densité) ou de services dans des bandes entre 420 MHz et 34 GHz utilisées par des radars météorologiques et de radionavigation;
- f) que des caractéristiques techniques et d'exploitation représentatives des radars météorologiques et de radionavigation sont nécessaires pour déterminer la possibilité d'introduire de nouveaux types de systèmes dans des bandes de fréquences où ces derniers fonctionnent;

---

\* La présente Recommandation doit être portée à l'attention de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

g) que des procédures et méthodologies sont nécessaires pour analyser la compatibilité des radars météorologiques et de radionavigation avec les systèmes d'autres services;

h) que les radars au sol utilisés dans cette bande pour les besoins de la météorologie sont autorisés à fonctionner sur une base d'égalité avec les stations du service de radionavigation aéronautique (numéro 5.423 du RR);

j) que les radars fonctionnant dans cette bande servent à la surveillance des aérodrômes, activité de sécurité essentielle grâce aux informations qu'elle fournit aux aéronefs pendant les phases d'approche et d'atterrissage et qui permettent d'éviter les collisions. Les autorités de régulation aéronautique garantissent et assurent la sécurité aéronautique et imposent des normes obligatoires garantissant une qualité de fonctionnement et une dégradation du service minimales,

*reconnaissant*

1 que les critères de protection dépendent des types des signaux brouilleurs tels que ceux décrits dans les Annexes 2 et 3;

2 que l'application de critères de protection doit être examinée, en vue de tenir compte de la nature statistique des critères et d'autres éléments de la méthode permettant d'effectuer les études de compatibilité (balayage d'antenne et affaiblissement de propagation par exemple). La mise au point de ces considérations statistiques pourrait être intégrée dans des versions révisées futures de la présente Recommandation et d'autres Recommandations connexes, selon qu'il conviendra,

*recommande*

1 que les caractéristiques techniques et d'exploitation des radars météorologiques et de radionavigation aéronautique décrits à l'Annexe 1 soient considérées comme représentatives des systèmes fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz;

2 que la Recommandation UIT-R M.1461 soit utilisée comme directive pour l'analyse de la compatibilité des radars météorologiques et des radars de radionavigation aéronautique avec les systèmes d'autres services;

3 que le niveau déclencheur de protection applicable aux radars de radionavigation aéronautique soit fondé sur l'Annexe 2, en particulier le § 4, pour l'évaluation de la compatibilité avec des types de signaux brouilleurs émis par d'autres services représentatifs de ceux figurant dans l'Annexe 2. Ces critères de protection représentent le niveau de protection contre les brouillages cumulatifs dûs à la présence de plusieurs brouilleurs.

4 que le niveau déclencheur de protection applicable aux radars météorologiques soit fondé sur l'Annexe 3, en particulier le § 7, pour l'évaluation de la compatibilité avec des types de signaux brouilleurs émis par d'autres services représentatifs de ceux figurant dans l'Annexe 3. Ces critères de protection représentent le niveau de protection contre les brouillages cumulatifs dûs à la présence de plusieurs brouilleurs.

NOTE 1 – La présente Recommandation sera révisée dès que plus d'informations seront disponibles.

## Annexe 1

### Caractéristiques des radars météorologiques et de radionavigation aéronautique

#### 1 Introduction

La bande de fréquences 2 700-2 900 MHz est attribuée au service de radionavigation aéronautique à titre primaire et au service de radiolocalisation à titre secondaire. Les radars au sol utilisés pour les besoins de la météorologie sont autorisés à fonctionner dans cette bande sur une base d'égalité avec les stations du service de radionavigation aéronautique (numéro 5.423 du RR).

Les radars de radionavigation aéronautique sont utilisés pour le contrôle du trafic aérien (ATC) sur les aéroports et assurent un service de sécurité (numéro 4.10 du RR). Il semble que la bande en question soit celle qui est la plus utilisée pour le trafic aérien civil dans le monde entier par les radars de surveillance d'aéroport/d'approche. Les radars météorologiques sont utilisés pour la détection d'éléments météorologiques dangereux comme les tornades, les ouragans ou les orages violents. Ils permettent également de prendre des mesures quantitatives des précipitations d'une zone particulière, qui sont très importantes pour la prévision d'éventuelles inondations. Elles sont en effet utilisées pour avertir la population et assurent donc un service de sauvegarde de la vie humaine.

#### 2 Caractéristiques techniques

La bande de fréquences 2 700-2 900 MHz est utilisée par plusieurs types différents de radars sur plates-formes mobiles et fixes au sol. Les fonctions des systèmes radar exploités dans cette bande comprennent l'ATC et l'observation météorologique. On peut supposer que les fréquences d'exploitation de ces radars se répartissent uniformément dans la bande 2 700-2 900 MHz. La plupart des systèmes utilisent plusieurs fréquences pour tirer parti de la diversité de fréquence. Bien souvent on utilise deux fréquences, on ne connaît pas de cas d'utilisation de quatre fréquences. Le Tableau 1 présente les caractéristiques techniques de radars météorologiques et de radionavigation aéronautique types fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz. Ces informations suffisent pour effectuer des calculs généraux visant à évaluer la compatibilité de ces radars avec d'autres systèmes.

##### 2.1 Emetteurs

Les radars fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz utilisent des impulsions à ondes entretenues et à modulation de fréquence (pulsée). Des dispositifs de sortie à champs croisés, à semi-conducteur et à faisceau linéaire sont utilisés aux étages de sortie des émetteurs. Les nouveaux systèmes radar ont tendance à employer des dispositifs de sortie à faisceau linéaire et à semi-conducteur en raison des exigences du traitement du signal Doppler. Par ailleurs, les radars utilisant des dispositifs de sortie à semi-conducteur ont une puissance de sortie émetteur de crête plus faible et un coefficient d'utilisation d'impulsion plus élevé, atteignant 10%. Les systèmes radar de radionavigation ont également tendance à employer la diversité de fréquence.

Les largeurs de bande types des émissions RF des radars fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz sont comprises entre 66 kHz et 6 MHz. Les puissances de sortie de crête des émetteurs sont comprises entre 22 kW (73,4 dBm), pour les émetteurs à semi-conducteur, 70 kW (78,5 dBm) pour les systèmes à tubes à ondes progressives (TOP) et 1,4 MW (91,5 dBm) pour les radars de grande puissance utilisant des klystrons et des magnétrons.

Pour les systèmes à forte puissance de crête, il y a en principe un émetteur par fréquence car ces systèmes sont équipés d'étages de sortie à bande étroite. Les systèmes à puissance de crête moins élevée utilisant des TOP ou des semi-conducteurs, sont équipés d'un seul émetteur pouvant fonctionner sur plusieurs fréquences. Ils disposent ainsi d'étages de sortie à large bande susceptibles d'être utilisés pour des applications multifréquence.

TABLEAU 1

**Caractéristiques des radars de radionavigation aéronautique  
fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz**

Caractéristiques	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Type de plate-forme (aéroportée, de navire, au sol)	Sol, ATC					
Plage de syntonisation (MHz)	2 700-2 900 <sup>(1)</sup>					
Modulation	P0N		P0N, Q3N	P0N	P0N, Q3N	P0N, Q3N
Puissance de l'émetteur fournie à l'antenne <sup>(2)</sup>	1,4 MW	1,32 MW	25 kW	450 kW	22 kW	70 kW
Largeur d'impulsion (µs)	0,6	1,03	1,0, 89	1,0	1,0, 55,0	0,4, 20 0,5, 27 <sup>(3)</sup>
Temps de montée/de descente des impulsions (µs)	0,15-0,2		0,5/0,32 (impulsion courte) 0,7/1 (impulsion longue)			0,1 (valeur type)
Fréquence de répétition des impulsions (FRI) (pps)	973-1 040 (sélectionnable)	1 059-1 172	722-935 (impulsion courte) 788-1 050 (impulsion longue)	1 050	8 ensembles, 1 031 à 1 080	1 100 840 <sup>(3)</sup>
Coefficient d'utilisation (%)	0,07 maximum	0,14 maximum	9,34 maximum	0,1 maximum		2 (valeur type)
Largeur de bande de modulation (MHz)	Sans objet		2	Sans objet	MF non linéaire à 1,3	2
Largeur de sous-impulsion codée en phase	Sans objet					
Rapport de compression	Sans objet		89	Sans objet	55	40:1 55:1
Largeur de bande d'émission RF:						
-20 dB	6 MHz	5 MHz	2,6 MHz (impulsion courte) 5,6 MHz (impulsion longue)			3 MHz (valeur type)
3 dB		600 kHz	1,9 MHz			2 MHz
Dispositif de sortie	Klystron		Transistors à semi-conducteur, Classe C	Magnétron	Transistor, Classe C	TOP
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)	En cosécante carrée +30°		En cosécante carrée 6° à +30°			En cosécante carrée améliorée à +40°
Type d'antenne (à réflecteur, à scrutation électronique en phase, à fentes, etc.)	Réflecteur parabolique					
Polarisation de l'antenne	Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire ou linéaire	Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire gauche

TABLEAU 1 (*fin*)

Caractéristiques	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Gain du faisceau principal de l'antenne (dBi)	33,5		34	32,8	34,3 faisceau inférieur 33 faisceau supérieur	33,5
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne (degrés)	4,8			4	4,8	5,0
Ouverture angulaire en azimut du faisceau de l'antenne (degrés)	1,35	1,3	1,45	1,6	1,4	1,5
Vitesse de scrutation horizontale de l'antenne (degrés/s)	75			90	75	90 60 <sup>(3)</sup>
Type de scrutation horizontale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, secteur, etc.)	360°					
Vitesse de scrutation verticale de l'antenne (degrés/s)	Sans objet					
Type de scrutation verticale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, secteur, etc.) (degrés)	Sans objet		+2,5 à -2,5	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et derniers lobes latéraux)		+7,3 dBi	+9,5 dBi 3,5°			+7,5 dBi 0 à -3 dBi
Hauteur de l'antenne (m)	8					8-24
Largeur de bande à 3 dB de la FI du récepteur	5 MHz	653 kHz	15 MHz		1,2 MHz	4 MHz
Facteur de bruit du récepteur (dB)	4,0 maximum		3,3	2,7	2,1	2,0
Signal minimum perceptible (dBm)	-110	-108	-110	-112		-110 (valeur type)
Point de compression à 1 dB des étages d'entrée du récepteur (dBm)		-20				-10
Niveau de saturation du récepteur syntonisé (dBm)		-45				
Largeur de bande à 3 dB du récepteur RF (MHz)	2-2,3	10	280,6			400 <sup>(1)</sup>
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et IF du récepteur						
Largeur de bande de filtrage Doppler (Hz)		95 par secteur				
Caractéristiques d'affaiblissement du brouillage <sup>(4)</sup>	Circuit d'amélioration à contre-réaction	<sup>(5)</sup>				
Distribution géographique	Monde entier					
Fraction du temps d'utilisation (%)	100					

(1) 2,7 à 3,1 GHz.

(2) Les systèmes fixes présentent une puissance pouvant atteindre 750 kW ou 1 MW.

(3) Dépend de la portée.

(4) Les caractéristiques suivantes sont présentes dans la plupart des systèmes radar et font partie de leurs fonctions normales: Gain variable dans le temps (GVT), taux de fausse alarme constant (CFAR), affaiblissement des impulsions asynchrones, suppression des impulsions saturées.

(5) Les caractéristiques suivantes sont présentes dans certains systèmes radar: FRI sélectionnables, filtrage Doppler.

TABLEAU 2

**Caractéristiques des radars météorologiques  
fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Radar G</b>	<b>Radar H</b>
Type de plate-forme (aéroportée, de navire, au sol)	Sol, météorologie	Sol, météorologie
Plage de syntonisation (MHz)	2 700-3 000	2 700-2 900
Modulation	P0N	
Puissance d'émission délivrée à l'antenne (kW)	500	400 ou 556
Largeur d'impulsion (µs)	1,6 (impulsion brève) 4,7 (impulsion longue)	1,0 (impulsion brève) 4,0 (impulsion longue)
Temps de montée/de descente des impulsions (µs)	0,12	
FRI (pps)	318-1 304 (impulsion brève) 318-452 (impulsion longue)	539 (impulsion brève) 162 (impulsion longue)
Coefficient d'utilisation (%)	0,21 maximum	
Largeur de bande de modulation	Sans objet	Sans objet
Largeur de sous-impulsion codée en phase	Sans objet	Sans objet
Rapport de compression	Sans objet	Sans objet
Largeur de bande d'émission RF: -20 dB -3 dB	4,6 MHz 600 kHz	
Dispositif de sortie	Klystron	Magnétron coaxial
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)	Crayon	Crayon
Type d'antenne (à réflecteur, à scrutation électronique en phase, à fentes, etc.)	Réflecteur parabolique	Réflecteur parabolique
Polarisation de l'antenne	Linéaire: verticale et horizontale	Linéaire: horizontale
Gain du faisceau principal de l'antenne (dBi)	45,7	38,0
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne (degrés)	0,92	2,0
Ouverture angulaire en azimut du faisceau de l'antenne (degrés)	0,92	2,0
Vitesse de scrutation horizontale de l'antenne (degrés/s)	18	18 et pivotement entièrement manuel

TABLEAU 2 (*fin*)

Caractéristiques	Radar G	Radar H
Type de scrutation horizontale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	360° et sectoriel	360° et sectoriel
Vitesse de scrutation verticale de l'antenne (degrés/s)	14 pas en 5 min	
Type de scrutation verticale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.) (degrés)	Pas fixes: 0,5-20	-2,0 à +60
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et derniers lobes latéraux) (dBi)	+20	+15 (estimation)
Hauteur d'antenne (m)	30	30
Largeur de bande à 3 dB de la FI du récepteur	630 kHz	0,25 MHz (impulsion longue) 0,5 MHz (impulsion brève)
Facteur de bruit du récepteur (dB)	2,1	9,0
Signal minimum discernable (dBm)	-115	-110
Point de compression à 1 dB des étages d'entrée du récepteur (dBm)	-17	-32
Niveau de saturation du récepteur syntonisé (dBm)	-10	
Largeur de bande à 3 dB du récepteur RF (MHz)	1,6	0,5 (impulsion longue) 1,5 (impulsion brève)
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et IF du récepteur	-10 dBm, 1 µs	
Largeur de bande de filtrage Doppler (Hz)	Estimée 95 <sup>(1)</sup>	
Caractéristiques d'affaiblissement du brouillage		
Distribution géographique	Monde entier	
Fraction du temps d'utilisation (%)	100	

<sup>(1)</sup> Filtrage Doppler et suppression des impulsions saturées.

TABLEAU 3

**Caractéristiques de radars génériques militaires de radiorepérage  
fonctionnant dans la bande 2 700-3 400 MHz**

Caractéristiques	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L
Type de plate-forme (aéroportée, de navire, au sol)	Sol, ATC couverture complémentaire, côtier	2D/3D surveillance navale, défense sol-air	Défense sol-air	Multifonction types divers
Plage de syntonisation (MHz)	2 700-3 100	2 700-3 100	2 700 à 3 100 2 900 à 3 400	Totalité de la bande jusqu'à 25% de la largeur de bande
Fréquences de fonctionnement (minimum/maximum)	Minimum: 2 espacées de > 10 MHz Maximum: entièrement agile	Minimum: 2 espacées de > 10 MHz Maximum: entièrement agile	Minimum: fixes Maximum: entièrement agile	Minimum: 2 espacées de > 10 MHz Maximum: entièrement agile
Modulation	MF non linéaire P0N, Q3N	MF non linéaire P0N, Q3N	MF non linéaire Q3N	Mixte
Puissance de l'émetteur fournie à l'antenne	60 kW (valeur type)	60 à 200 kW	1 MW (valeur type)	30 à 100 kW
Largeur d'impulsion (µs)	0,4 <sup>(1)</sup> à 40	0,1 <sup>(1)</sup> à 200	> 100	Jusqu'à 2
Temps de montée/de descente des impulsions (µs)	10 à 30 (valeur type)	10 à 30 (valeur type)	Non communiqué	Non communiqué
FRI (pps)	550 à 1 100 Hz	300 Hz à 10 kHz	< 300 Hz	Jusqu'à 20 kHz
Coefficient d'utilisation (%)	2,5 maximum	10 maximum	Jusqu'à 3	30 maximum
Largeur de bande de modulation (MHz)	2,5	Jusqu'à 10	> 100	Dépend de la modulation
Largeur de sous-impulsion codée en phase	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Non communiqué
Rapport de compression	Jusqu'à 100	Jusqu'à 300	Sans objet	Non communiqué
Largeur de bande d'émission RF (MHz): -20 dB -3 dB	3,5 2,5	15 10	> 100	Non communiqué
Dispositif de sortie	TOP	TOP ou semi-conducteur	Klystron ACC	Eléments actifs
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)	En cosécante carrée	Faisceau étroit 3D ou cosécante carrée 2D	Faisceau étroit à scrutation	Faisceau étroit
Type d'antenne (à réflecteur, à scrutation électronique en phase, à fentes, etc.)	Réflecteur conformé	Réseau plan ou réflecteur conformé	Réseau plan avec scrutation de fréquence ou réflecteur	Réseau actif
Ouverture du faisceau en azimut (degrés)	1,5	1,1 à 2	En général 1,2	Dépend du nombre d'éléments
Polarisation de l'antenne	Rectiligne ou circulaire ou commuté	Rectiligne ou circulaire ou commuté	Rectiligne ou circulaire fixe	Rectiligne fixe
Gain du faisceau principal de l'antenne (dBi)	33,5 (valeur type)	Jusqu'à 40	> 40	Jusqu'à 43
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne (degrés)	4,8	1,5 à 30	Valeur type 1	Dépend du nombre d'éléments



TABLEAU 3 (fin)

Caractéristiques	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L
Vitesse de scrutation horizontale de l'antenne (degrés/s)	45 à 90	30 à 180	Valeur type 36	Scrutation sectorielle scrutation par rotation instantanée jusqu'à 360
Type de scrutation horizontale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, secteur, etc.) (degrés)	Continu 360	Continu 360 + scrutation sectorielle	Continu 360 + scrutation sectorielle actif	Scrutation sectorielle aléatoire, scrutation sectorielle + rotation
Vitesse de scrutation verticale de l'antenne (degrés/s)	Sans objet	Instantanée	Instantanée	Instantanée
Type de scrutation verticale de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, secteur, etc.) (degrés)	Sans objet	0 à 45	0 à 30	0 à 90
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et derniers lobes latéraux)	26 dB 35 dB	> 32 dB valeur type < -10 dBi	> 26 dB valeur type < 0 dBi	Non communiqué
Hauteur de l'antenne au-dessus du sol (m)	4 à 30	4 à 20	5	4 à 20
Largeur de bande à 3 dB du récepteur FI (MHz)	1,5 impulsion longue 3,5 impulsion brève	10	Non communiqué	Non communiqué
Facteur de bruit du récepteur(2) (dB)	2,0 maximum	1,5 maximum	Non communiqué	Non communiqué
Signal perceptible minimum (dBm)	-123 impulsion longue -104 impulsion brève	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Point de compression à 1 dB densité de puissance au niveau de l'antenne (W/m <sup>2</sup> )	$1,5 \times 10^5$	$5 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^3$
Niveau de saturation du récepteur syntonisé. Densité de puissance au niveau de l'antenne (W/m <sup>2</sup> )	$4,0 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$	Non communiqué	Non communiqué
Largeur de bande à 3 dB du récepteur RF (MHz)	400	400	150 à 500	Jusqu'à la totalité de la bande
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et IF du récepteur	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Largeur de bande de filtrage Doppler	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Caractéristiques d'affaiblissement du brouillage <sup>(3)</sup>	(4)	(4) et (5)	(4) et (5)	Synthèse de faisceau adaptative (4) et (5)
Distribution géographique	Monde entier site fixe transportable	Monde entier site fixe naval transportable	Monde entier site fixe transportable	Monde entier site fixe naval transportable
Fraction du temps d'utilisation (%)	100	Dépend de la mission	Dépend de la mission	Dépend de la mission

(1) Impulsion non comprimée.

(2) Inclut les pertes d'alimentation.

(3) Représente les caractéristiques qui sont présentes dans la plupart des systèmes radar dans le cadre de leurs fonctions normales: GVT, CFAR, rejet des impulsions asynchrones, suppression des impulsions saturées.

(4) Les caractéristiques suivantes sont disponibles dans certains systèmes radar: fréquence de répétition des impulsions sélectionnables, filtrage des cibles mobiles, agilité de fréquence.

(5) Annulation des lobes latéraux, suppression des lobes latéraux.

## 2.2 Récepteurs

Les systèmes radar de nouvelle génération utilisent un système de traitement numérique du signal après détection pour le traitement des données de télémétrie, d'azimut et Doppler. Les systèmes de traitement du signal utilisent généralement des techniques permettant d'améliorer la détection des cibles utiles et d'afficher les symboles des cibles sur l'écran. Les techniques de traitement du signal utilisées pour la surbrillance et l'identification des cibles utiles permettent également de supprimer le brouillage par des signaux à faible cycle d'utilisation (moins de 5%), c'est-à-dire non synchronisés avec le signal désiré.

Les systèmes de traitement du signal des radars ATC de nouvelle génération utilisent également des impulsions modulées en fréquence permettant un gain de traitement du signal utile et éventuellement la suppression de signaux inutiles.

Certains émetteurs à semi-conducteur de faible puissance les plus récents utilisent un système de traitement du signal à coefficient d'utilisation élevé et à plusieurs canaux pour améliorer les retours des signaux utiles. Certains récepteurs de radar peuvent identifier des canaux RF qui ont des signaux faibles inutiles et obliger l'émetteur à émettre sur ces canaux RF.

En général, les systèmes à forte puissance de crête utilisent un récepteur par fréquence et disposent ainsi d'étages d'entrée radiofréquence à bande étroite. Les systèmes de puissance plus faible ont des étages d'entrée radiofréquence à large bande pouvant recevoir toutes les fréquences sans syntonisation, ces étages d'entrée sont suivis par des récepteurs superhétérodynes cohérents. Les systèmes qui utilisent la compression d'impulsion disposent d'une largeur de bande FI adaptée à l'impulsion élargie et qui agit comme des filtres adaptés afin que la dégradation du rapport  $S/N$  soit minimale.

Les radars météorologiques, conçus pour repérer les particules dans l'atmosphère et les hydrométéores de taille submillimétrique utilisent un traitement de données élaboré pour extraire les signaux du bruit reçu. Les tests effectués sur un type de radar utilisé dans le monde entier ont montré que ce gain de traitement était de l'ordre de 6 à 9 dB. En outre, les radars météorologiques ne font pas que détecter la présence d'une impulsion d'écho. Le processeur permet de calculer les caractéristiques de l'impulsion d'écho et aussi de déterminer certains paramètres tels la vitesse du vent, le cisaillement du vent, la turbulence et le type de précipitation. La présence d'un processeur, compte tenu du fait que les radars météorologiques ne font pas que détecter l'impulsion d'écho avec des rapports  $S/N$  négatifs, les rend très vulnérables au brouillage. On trouvera de plus amples informations dans l'Annexe 3 de la présente Recommandation.

## 2.3 Antennes

Seules les antennes de type réflecteur parabolique sont utilisées sur les radars fonctionnant dans la bande de fréquences 2700-2900 MHz. Les radars d'ATC possèdent une antenne à faisceau en cosécante carrée, alors que les radars météorologiques possèdent une antenne à faisceau-crayon. Etant donné que les radars fonctionnant dans la bande 2700-2900 MHz assurent des fonctions d'ATC et d'observation météorologique, les antennes balayent un angle de 360° dans le plan horizontal. Les polarisations horizontale, verticale et circulaire sont utilisées. Les radars de nouvelle génération utilisant des antennes de type réflecteur possèdent plusieurs cornets. On utilise des cornets doubles à l'émission et à la réception afin d'améliorer la détection en fouillis de surface. Les radars tridimensionnels emploient également des antennes à réflecteur, à faisceaux empilés et à plusieurs cornets. Les antennes à plusieurs cornets réduisent le niveau de brouillage. Les hauteurs d'antenne type des radars météorologiques et de radionavigation aéronautique sont respectivement de 8 m et de 30 m au-dessus du niveau du sol.

### 3 Critères de protection

L'effet de désensibilisation qui affecte les radars de radionavigation aéronautique et les radars météorologiques dû à une modulation à ondes entretenues, à une modulation MDP-2 ou MDP-4, ou bien à une modulation assimilable à du bruit, est probablement lié à l'intensité de cette modulation. Dans le secteur azimutal où ce type de brouillage se produit, il suffit d'ajouter la densité spectrale de puissance de ce brouillage à la densité spectrale de puissance du bruit thermique du récepteur du radar pour obtenir un résultat relativement fiable. Si la densité spectrale de puissance du bruit du récepteur du radar en l'absence de brouillage est désignée par  $N_0$  et celle du brouillage de type bruit est désignée par  $I_0$ , on obtient simplement la densité spectrale de puissance du bruit effectif qui en résulte par la somme  $I_0 + N_0$ .

Le facteur de regroupement peut être très important dans le cas de certains systèmes de communication, pour lesquels un grand nombre de stations peuvent être utilisées. Une analyse par agrégation doit prendre en considération les contributions cumulatives dans toutes les directions, reçues dans le lobe principal de l'antenne radar ou dans ses lobes latéraux afin d'obtenir le rapport  $I/N$  global.

L'effet du brouillage par impulsions est plus difficile à quantifier; il dépend fortement du type de processeur utilisé par les récepteurs et du mode de fonctionnement de ces derniers. En particulier, les gains résultant du traitement différentiel du retour de cible, qui est pulsé de façon synchrone, et des impulsions de brouillage, qui sont généralement asynchrones, ont souvent des effets importants sur les niveaux donnés de brouillage par impulsions. Cette désensibilisation peut être à l'origine de différents types de dégradation de la performance. L'évaluation de la désensibilisation constituera un objectif en ce qui concerne les analyses d'interaction entre certains types de radar. On s'attend, en général, à ce que les nombreuses fonctions des radars de radiorepérage contribuent à supprimer le brouillage par impulsions à faible coefficient d'utilisation, en particulier lorsqu'il provient de quelques sources isolées. Les techniques de suppression du brouillage par impulsions à faible coefficient d'utilisation figurent dans la Recommandation UIT-R M.1372 – Utilisation efficace du spectre radioélectrique par les stations radar du service de radiorepérage.

### 4 Caractéristiques d'exploitation

#### 4.1 Radars météorologiques

Le Tableau 2 décrit les caractéristiques techniques de radars météorologiques types, à savoir les radars G et H, qui fonctionnent principalement dans la bande 2 700-2 900 MHz. Le radar G peut toutefois fonctionner jusqu'à 3 000 MHz. Ces systèmes radar météorologiques primaires sont utilisés pour l'établissement des plans de vol. Situés sur les aéroports du monde entier, ils indiquent aux avions les conditions météorologiques exactes et fonctionnent donc 24 h sur 24.

Le radar G utilise la technologie Doppler pour observer et calculer la vitesse et le déplacement de phénomènes météorologiques dangereux (tornades, ouragans ou orages violents). Le radar G permet également de prendre des mesures quantitatives des précipitations d'une zone particulière, qui sont très importantes pour la prévision d'éventuelles inondations. Les possibilités de détection d'éléments météorologiques dangereux et de calcul de leur déplacement qu'offre ce radar contribuent à augmenter la précision et la rapidité des services d'alerte. Le radar G détecte très bien les phénomènes météorologiques dangereux pour les personnes et les biens. Il permet en effet de détecter très tôt les vents dangereux et d'estimer la pluviométrie, ce qui est très utile pour la prévision des crues des cours d'eau et des inondations. Le radar H est du type non Doppler utilisé dans de nombreux pays.

Le radar G est utilisé dans un réseau intégré qui couvre la totalité du territoire des Etats-Unis d'Amérique, Guam, Porto Rico, le Japon, la Corée du Sud, la Chine et le Portugal. La bande 2700-2900 MHz offre d'excellentes caractéristiques atmosphériques et de propagation concernant les possibilités de prévision météorologiques et d'alerte. Les améliorations techniques qu'il est prévu d'apporter à ces radars devraient contribuer à étendre leur durée de vie jusqu'à 2040. L'OMM signale que plus de 320 radars météorologiques fonctionnent dans cette bande dans au moins 52 pays.

## **4.2 Radars de radionavigation aéronautique**

Dans le monde entier, les radars de surveillance d'aéroport fonctionnent dans la bande de fréquences 2700-2900 MHz. Le Tableau 1 décrit six types représentatifs de radars d'ATC, notés de A à F. Ces radars assurent la surveillance d'approche des aéroports en balayant généralement un angle de 360°, 24 h sur 24. Les radars A, C, E et F sont en principe situés sur des aéroports; tous les aéroports importants sont normalement équipés d'un système radar similaire. Les radars A, B et F représentent la génération des radars actuellement utilisés. Les radars C et E représentent la prochaine génération, bien qu'un grand nombre de ceux-ci ait déjà été mis en place et représente une certaine technologie déjà utilisée et que ceux-ci devraient compléter ou remplacer les radars A, B, et éventuellement le radar F après 2010. Le radar D est un système transportable utilisé pour l'ATC sur les aéroports qui ne disposent pas d'installations existantes. Toutefois, il existe également encore un grand nombre de radars à magnétron non cohérent de ce type sur des sites fixes dans le monde. Ils fonctionnent en général avec des puissances crête d'environ 1 MW. En service, le radar D fonctionne 24 h sur 24. Certains radars de ce type fonctionnent en mode à diversité de fréquence nécessitant deux assignations de fréquence, voire quatre, par radar.

## **Annexe 2**

### **Résultats des tests effectués avec des radars de radionavigation aéronautique**

#### **1 Introduction**

Cette Annexe décrit les résultats de tests effectués par deux administrations sur des radars de radionavigation aéronautique et conclut qu'un critère de protection  $I/N$  de  $-10$  dB permet d'assurer la protection intégrale de ces types de radars dans la bande 2700-2900 MHz. Les résultats obtenus par une administration s'appuient sur des mesures faites sur un radar de radionavigation aéronautique à impulsions Doppler qui présente des caractéristiques techniques analogues à celles du radar B du Tableau 1 de l'Annexe 1. Les tests réalisés par une autre administration s'appuient sur des mesures effectuées sur des radars dont les caractéristiques sont analogues à celles des radars D et E du Tableau 1 de l'Annexe 1.

#### **2 Tests avec le radar B**

Les tests avaient pour objet de déterminer les effets produits par les émissions de systèmes de communication numériques sur les radars de radionavigation de recherche aéronautique (radar B du Tableau 1 de l'Annexe 1) fonctionnant avec une attribution à titre primaire pour le service de radionavigation aéronautique (SRNA) dans la bande 2700-2900 MHz. Les résultats de ces tests ont servi à déterminer le critère de protection  $I/N$  à utiliser dans les études d'évaluation de la

compatibilité des radars de radionavigation avec le service mobile ou des systèmes de production en extérieur/reportage électronique dans la bande 2700-2900 MHz. Ce radar utilise des techniques de limitation des brouillages/méthodes de traitement figurant dans la Recommandation UIT-R M.1372, qui leur permettent de fonctionner en présence d'autres radars de radionavigation, de radars de radiolocalisation et de radars météorologiques. Comme le montre le Rapport UIT-R M.2032, les techniques de ce type sont très efficaces pour réduire ou éliminer les brouillages pulsés entre radars.

Ces tests ont permis d'étudier l'efficacité des circuits/logiciels de suppression ou de réduction des brouillages causés par les systèmes de communication numériques.

## 2.1 Objectifs des tests sur le radar B

Des objectifs des tests sur le radar B étaient les suivants:

- quantifier la capacité du système de traitement d'élimination des brouillages du radar B à limiter les effets des émissions non désirées produits par les systèmes de communication numériques en fonction de leur niveau de puissance;
- définir des critères de protection en termes de rapport  $I/N$  pour les émissions des systèmes de communication numériques reçues par le radar de radionavigation;
- observer et quantifier l'efficacité des techniques d'élimination des brouillages du radar de radionavigation afin de réduire le nombre de fausses cibles, de traînées radiales (traces) et de bruits de fond;
- observer et quantifier l'efficacité des techniques d'élimination des brouillages du radar de radionavigation pour limiter la perte des cibles recherchées.

## 2.2 Caractéristiques techniques et opérationnelles du radar B

Le radar B est utilisé par des administrations pour la surveillance du trafic aérien à l'intérieur et au voisinage des aéroports dans un périmètre de 60 milles marins (111 km environ). Les valeurs nominales des principaux paramètres de ce radar ont été extraites des documents d'homologation réglementaires, des brochures commerciales et des manuels techniques. Ces caractéristiques figurent dans le Tableau 1 de l'Annexe 1.

Le radar subdivise sa portée opérationnelle de 60 milles marins en intervalles de 1/16ème de mille marin (116 m environ) et l'azimut en 256 intervalles de 1,4° environ, il y a donc au total 249088 cellules portée-azimut. Dans chaque intervalle d'azimut de 1,4°, l'émetteur envoie 10 impulsions avec une FRI constante et émet ensuite huit impulsions avec une FRI inférieure. Le récepteur traite chaque ensemble de 18 impulsions pour former 18 filtres Doppler. L'alternance de FRI tous les 1,4° permet d'éliminer les vitesses indétectables, fait apparaître les cibles mobiles masquées par les conditions météorologiques et élimine les répétitions d'écho du fouillis et scinde le signal de sortie du radar en 4 483 584 cellules distance-azimut-Doppler.

## 2.3 Caractéristiques de traitement du signal du radar B

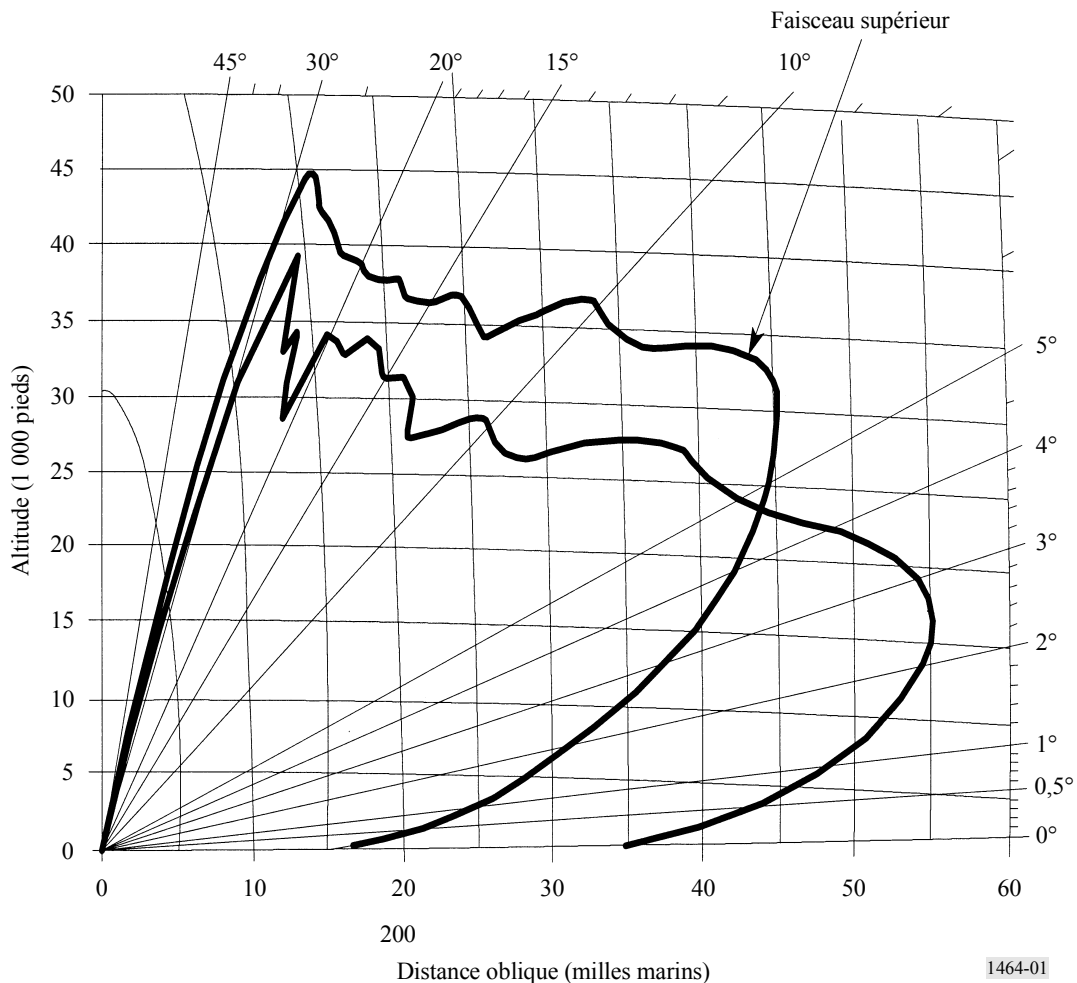
### 2.3.1 Antenne

Le radar B utilise des cornets pour les faisceaux hauts et bas dans le réseau d'alimentation de l'antenne. Les impulsions réfléchies sont reçues par les cornets de faisceaux hauts et bas dans le réseau d'antenne et sont commutées, atténuées et amplifiées par des composants micro-ondes et envoyées vers leur récepteur respectif. Le cornet à faisceaux élevés reçoit les échos des cibles à haute altitude proches de l'antenne, tandis que le cornet de faisceaux bas reçoit les échos des cibles à faible altitude et à des distances plus grandes. Le trajet du faisceau élevé réduit l'intensité du

fouillis pour les faibles distances afin d'améliorer la visibilité en dessous du fouillis. On a choisi pour ces tests le récepteur de faisceaux élevés car il est probable que les brouillages à la réception du radar seront dus aux émetteurs locaux situés au sol le long de ce trajet. Le faisceau bas est utilisé pour l'observation des cibles à des distances dépassant environ 15-20 milles marins (environ 28-37 km). Les faisceaux ne sont pas utilisés simultanément; le récepteur du radar bascule des uns aux autres. Les diagrammes de couverture des faisceaux hauts et bas pour une surface apparente de cible de 1 m<sup>2</sup> avec une probabilité de détection égale à 0,80 sont montrés à la Fig. 1.

FIGURE 1

Diagramme de couverture des faisceaux hauts et bas



### 2.3.2 Récepteur de cible du radar B

Le récepteur/processeur de cible du radar B utilise un GVT et une détection de cibles mobiles, qui fait intervenir un filtrage Doppler et un traitement de taux CFAR pour pouvoir détecter et distinguer les échos de cible du bruit, du fouillis au sol et des phénomènes météorologiques. Le récepteur/processeur de cible trie les échos de cible en fonction de leur distance, détecte leur décalage Doppler et envoie le résultat au post-processeur du système radar.

#### 2.3.2.1 Circuit FI du radar B

Le circuit FI du récepteur amplifie les signaux de sortie du récepteur RF et détecte leur déphasage. Le circuit FI se compose d'un détecteur/amplificateur vidéo logarithmique à trois étages présentant une grande dynamique et un détecteur de phase I et Q. La fréquence de sortie du récepteur/amplificateur FI est de 31,07 MHz. Un signal à ondes entretenues balayé en fréquence a été appliqué comme stimuli d'entrée du récepteur radar pour déterminer la largeur de bande à 3 dB

du récepteur, qui est d'environ 680 kHz à l'entrée des détecteurs de phase. La réponse du récepteur au signal à ondes entretenues vobulées est représentée à la Fig. 2. La dynamique du récepteur radar a été mesurée en faisant varier le niveau de puissance d'un signal à ondes entretenues de fréquences fixes et en observant la sortie du circuit FI au même point de mesure. La Fig. 3 montre la caractéristique de gain du récepteur radar. Le point de compression apparaît lorsque le signal d'entrée a un niveau de puissance d'environ  $-43$  dBm.

FIGURE 2

## Courbe de sélectivité FI du radar B

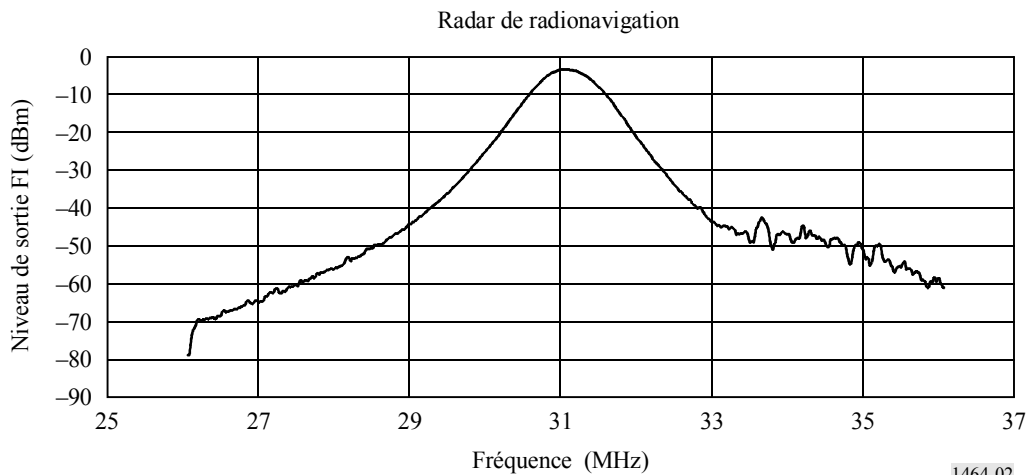
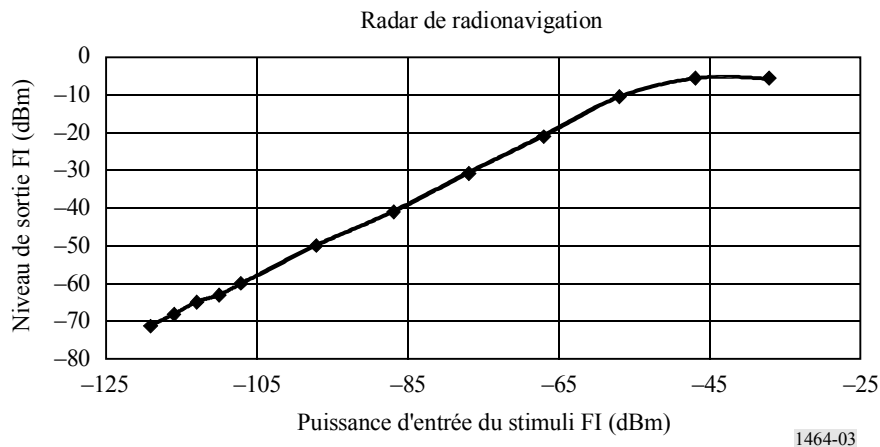


FIGURE 3

## Courbe de gain entrée/sortie du radar B



Les détecteurs de phase situés à la sortie de l'amplificateur FI mesurent la modification de phase entre les échos et les impulsions émises qui ont produit ces échos, en utilisant l'oscillateur cohérent du générateur de fréquence comme référence de phase de l'impulsion émise. Les réponses des détecteurs de phase sont sinusoïdales et produisent des signaux de sortie en phase, I ou en quadrature, Q avec une relation de phase sinus-cosinus ( $90^\circ$ ) entre eux. Comme les réponses des détecteurs de phase I et Q sont des fonctions sinusoïdales et cosinusoïdales, leurs sorties peuvent être additionnées vectoriellement pour déterminer l'amplitude réelle des échos de cible. Des boucles d'asservissement logicielles permettent d'ajuster les décalages en courant continu, de régler la balance de gain et la balance de phase des sorties I et Q à partir des détecteurs de phase, et de régler également le niveau de commande automatique du gain des amplificateurs RF et FI pour limiter le niveau de bruit d'un quanta (modification du niveau RF représentée par le bit de plus faible poids de sortie du convertisseur analogique/numérique (A/N)) du bruit lui-même.

Les sorties I et Q des circuits FI sont échantillonnées et numérisées par des convertisseurs A/N tous les  $0,77 \mu\text{s}$  (égal à 0,75% de la largeur d'impulsion d'émission), couvrant une cellule de distance de 1/16ème de mille marin (environ 116 m) avec une fréquence d'horloge de 2,6 MHz. Les résultats sont alors entrelacés. Le convertisseur A/N délivre en sortie des mots numériques de 12 bits qui représentent des échantillons des signaux I et Q au filtre et au processeur d'amplitude.

### 2.3.2.2 Filtrage Doppler

Dans chaque cellule de distance de 1/16ème de mille marin, des intervalles de traitement cohérent, composés d'échos alternés de 10 et 8 intervalles de répétition d'impulsions successives, sont formés. Dans le cas de 10 impulsions, les lots associés à chaque incrément de distance de 1/16ème de mille marin successif sont appliqués séquentiellement au même banc de 10 filtres Doppler. La mémoire vive stocke les représentations numériques des échos sur plusieurs trains de répétition d'impulsions et les filtres Doppler les traitent ensemble de sorte que des modifications d'impulsion à impulsion de l'amplitude d'écho des cibles (représentant des fréquences Doppler apparentes) peuvent être calculées. Pour l'intervalle de traitement cohérent de 10 impulsions, cinq des filtres sont utilisés pour détecter les cibles qui se déplacent vers l'antenne du radar et les cinq autres pour détecter les cibles qui s'en éloignent. Un processus analogue est utilisé pour les intervalles de huit impulsions à ceci près que huit filtres sont utilisés. La présence de filtres Doppler permet d'améliorer le rapport  $S/N$  du récepteur car les filtres Doppler ajoutent ou intègrent une série d'échos de cible à leur fréquence. De ce fait, les signaux d'écho s'accumulent progressivement à la sortie du filtre, tandis que le bruit à fréquence aléatoire s'accumule aux sorties du filtre à une vitesse beaucoup plus lente.

### 2.3.2.3 Traitement de CFAR

Le radar utilise une technique CFAR à moyennage par fenêtre glissante de 27 cellules (ou moyennage de distance) pour calculer le seuil de niveau moyen (MLT, *mean level threshold*). Le traitement CFAR fait varier automatiquement un seuil de détection pour conserver les déclarations de fausse cible, fondées sur le signal d'écho plus les sorties bruit des filtres Doppler à débit constant. Chaque filtre Doppler calcule la somme de l'énergie contenue dans le flux d'écho reçu au fur et à mesure que l'antenne balaie une cible. L'énergie est combinée avec l'énergie de bruit qui s'accumule dans le filtre durant le même intervalle de temps. Si le signal intégré plus le bruit à la sortie d'un filtre dépassent le seuil MLT, le détecteur conclut qu'une cible est présente.

Les seuils pour les cellules à résolution de vitesse non nulle sont déterminés en calculant la somme des sorties détectées du signal dans le même filtre de vitesse dans une fenêtre de 27 cellules centrée autour de la cellule considérée. Ainsi, chaque signal de sortie du filtre est moyenné pour déterminer le niveau moyen d'un fouillis de vitesse non nulle. Les seuils des filtres sont déterminés en multipliant les niveaux moyens par une constante appropriée pour obtenir la probabilité souhaitée de fausse alarme.

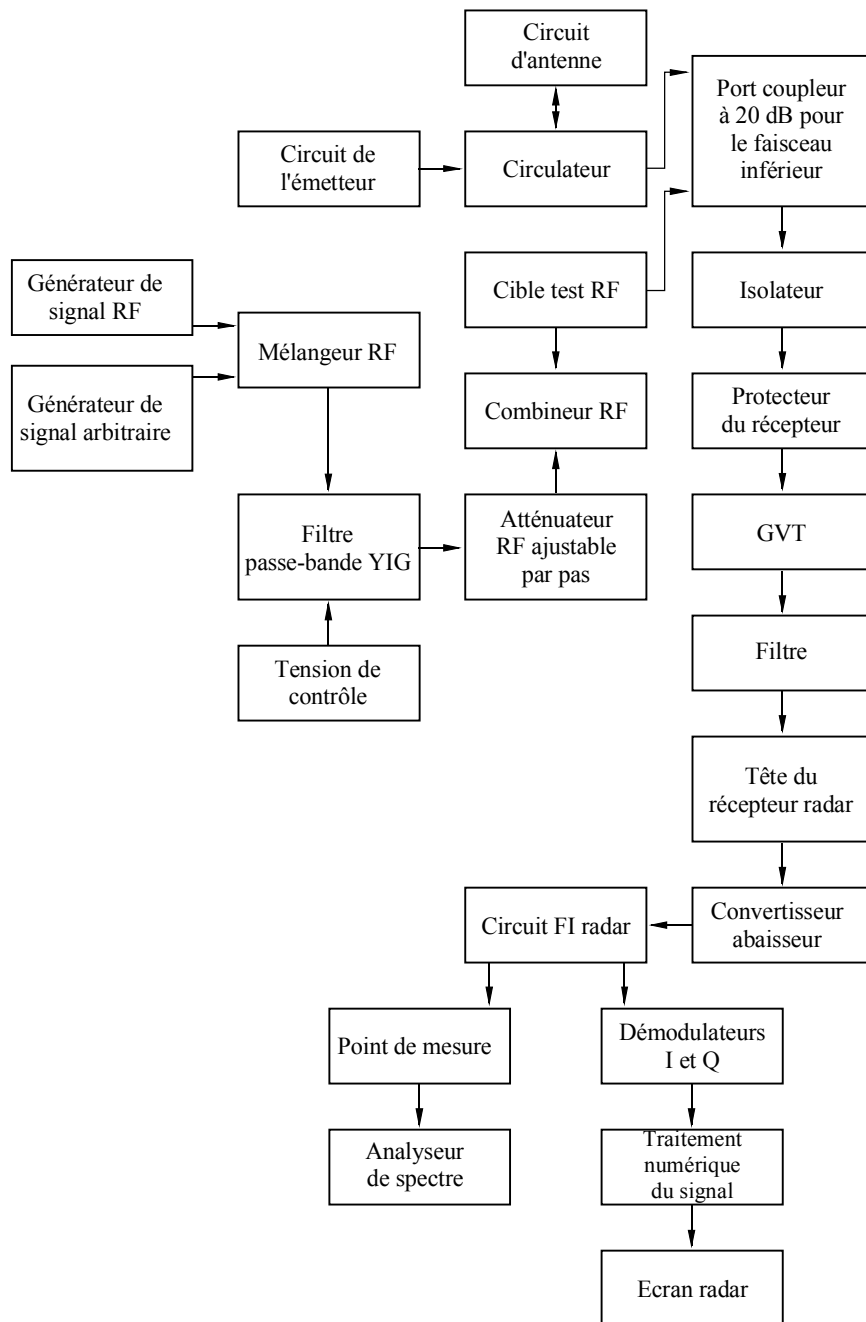
Le bruit aléatoire dépassera parfois le seuil MLT et le détecteur indiquera faussement la présence d'une cible. La probabilité de fausse alarme sera d'autant plus faible que le seuil de détection par rapport au niveau moyen de l'énergie de bruit sera grand et inversement. Si le seuil de détection est trop élevé, il se peut que des cibles valables ne soient pas détectées. Les sorties des filtres Doppler sont analysées de manière continue pour maintenir un réglage de seuil optimal. Le dispositif CFAR fixe les seuils de détection de manière à maintenir le taux de fausse alarme pour chaque filtre Doppler à une valeur optimale. Une onde de type MDP-4 couvrant la bande du récepteur radar apparaîtra simultanément dans tous les filtres Doppler comme un bruit et amènera le dispositif CFAR à augmenter le seuil de détection, faisant en sorte que toutes les cibles aient une probabilité de détection plus faible en conséquence.



2.4 Signaux non désirés

Trois types de signaux ont été injectés dans le radar représentant des émissions non désirées via un port couplé à 20 dB dans le trajet du guide d'ondes du récepteur (voir la Fig. 4). Les signaux étaient les suivants: une onde entretenue non modulée, une onde MDP-4 à 2 Mbit/s et une onde MDP-4 à 2 Mbit/s avec un facteur d'utilisation correspondant à un intervalle de temps de 1/8ème. Les trois signaux étaient syntonisés sur la fréquence de fonctionnement du radar et étaient présents pendant toute la période de rotation de l'antenne (360°).

FIGURE 4  
Montage de test avec générateur de signal MDP-4



Les ondes entretenues ou les ondes MDP-4 pulsées représentent le type de signal utilisé dans les systèmes de communication numériques.

Un signal MDP-4 a été produit et injecté dans le récepteur du radar de radionavigation en utilisant le montage de test représenté à la Fig. 4.

Le signal à ondes entretenues a été simulé au moyen d'un générateur de signal RF. Pour le signal MDP-4 de type accès multiple par répartition en code (AMRC), un générateur de signal arbitraire a été programmé pour délivrer un signal MDP-4 avec un débit de données de 2 Mbit/s. Pour le signal MDP-4 de type accès multiple par répartition dans le temps (AMRT), un autre générateur de signal arbitraire a été utilisé pour pulser le signal MDP-4 avec un facteur d'utilisation d'intervalle de temps de 1/8ème. L'impulsion durait 577  $\mu$ s et la période était de 4,6 ms.

Le signal délivré par le générateur de signal arbitraire était appliqué à un mélangeur dont l'autre entrée était reliée à un générateur de signal RF. Le générateur de signal RF fonctionnait en tant qu'oscillateur local et sa fréquence était réglée de manière telle que la fréquence de la porteuse de l'onde MDP-4 soit la même que celle du récepteur radar. Le filtre passe-bande YIG (*Yttrium-iron-garnet*) était utilisé pour éliminer tous rayonnements parasites dus au processus de mélange. L'atténuateur RF par pas placé immédiatement après le filtre YIG était utilisé pour régler le niveau de puissance des émissions MDP-4.

## 2.5 Génération et comptage des cibles

Dix cibles régulièrement espacées étaient générées le long d'un rayon en utilisant le matériel/logiciel du générateur de cibles incorporé au radar. Les cibles sur le rayon avaient une enveloppe de puissance constante. Le décompte des cibles était effectué par 20 rotations du radar. Pendant les 20 rotations, 200 cibles étaient produites. Si l'on décomptait 200 cibles, la valeur de probabilité de détection  $P_d$  était de 100%, si l'on décomptait 180 cibles la valeur de  $P_d$  était de 0,90 et ainsi de suite. Par conséquent, la  $P_d$  était calculée en divisant le nombre de cibles décomptées par le nombre de cibles attendues (ou de cibles produites). Les cibles étaient comptées manuellement en observant la sortie vidéo corrélée sur l'écran radar.

## 2.6 Conditions de test

Pour les essais, les paramètres du radar de radionavigation aérienne avaient les valeurs représentées dans le Tableau 4.

TABLEAU 4

### Réglage des commandes du radar

Paramètre	Réglage
GVT	Désactivé
Réjection des brouillages (RB)	Activé
Commande automatique de gain	Activé
Image sélectionnée	Vidéo avec traitement
Portée	60 milles marins (111 km environ)
$P_d$ de base de cible	0,90 (assurée par logiciel)

Bien que la commande automatique de gain ait été activée, les signaux brouilleurs n'étaient pas suffisamment intenses pour perturber son fonctionnement.

Les spécifications de qualité de fonctionnement fournies par le fabricant concernant le radar B sont les suivantes: la probabilité de détection de cible  $P_d$  est de 80%, pour une surface apparente de cible de  $1 \text{ m}^2$  à 55 milles marins avec une probabilité de fausse alarme,  $P_{fa}$  de  $1 \times 10^{-6}$ . La  $P_d$  de base de cible souhaitée 0,90 qui a été choisie pour les essais correspond au niveau de qualité de fonctionnement auquel parviendront dans un proche avenir les radars fonctionnant dans la bande 2700-2900 MHz lorsqu'un gain additionnel de traitement leur permettra de détecter des cibles dont le niveau d'écho est égal ou inférieur au bruit de fond du récepteur radar.

## 2.7 Procédures de test

La sortie de puissance RF du générateur de cibles était réglée de sorte que la  $P_d$  de cibles était aussi proche que possible (étant donné que les niveaux des cibles ne pouvaient être réglés que par incrément de 1 dB) d'une  $P_d$  de base de 90% en l'absence de brouillage (pour des cibles vidéo corrélées). Les cibles étaient comptées pendant 20 scrutations pour fixer la  $P_d$  de base. En raison du traitement CFAR, il fallait au radar huit à dix scrutations avant d'atteindre un état stable après que la puissance des cibles a été ajustée.

Après que le radar a été réglé dans sa condition initiale, un brouillage par onde entretenue et par signal MDP-4 était injecté dans le récepteur radar. La puissance de ces signaux était réglée à différents niveaux tandis que le niveau de puissance des cibles était maintenu à une valeur constante. Les niveaux de puissance des signaux à onde entretenue et MDP-4 étaient réglés à des valeurs qui produisaient des niveaux de rapport  $I/N$  de  $-12$ ,  $-10$ ,  $-9$ ,  $-6$ ,  $-3$ ,  $0$ ,  $+3$  et  $+6$  dB dans les circuits FI du récepteur radar. Pour tenir compte du traitement CFAR du radar, les cibles n'étaient pas comptées avant que dix scrutations se soient produites après activation des brouillages. Après 20 scrutations en présence de brouillages et comptage des cibles, les brouillages étaient désactivés et dix autres scrutations étaient exécutées avant de tester le niveau  $I/N$  suivant. Le fait d'attendre dix scrutations garantissait que les mesures effectuées n'étaient pas affectées par les précédentes mesures.

A mesure que l'on faisait varier les niveaux de puissance des signaux à ondes entretenues et MDP-4, on regardait sur l'écran radar s'il y avait eu une augmentation du nombre de fausses cibles, de traînées radiales (traces), et une augmentation du «scintillement» du fond.

## 2.8 Résultats des essais

Les courbes montrant la  $P_d$  des cibles en fonction du rapport  $I/N$  ont été tracées pour des émissions non désirées à onde entretenue, MDP-4-AMRC et MDP-4-AMRT. Les résultats sont représentés à la Fig. 5.

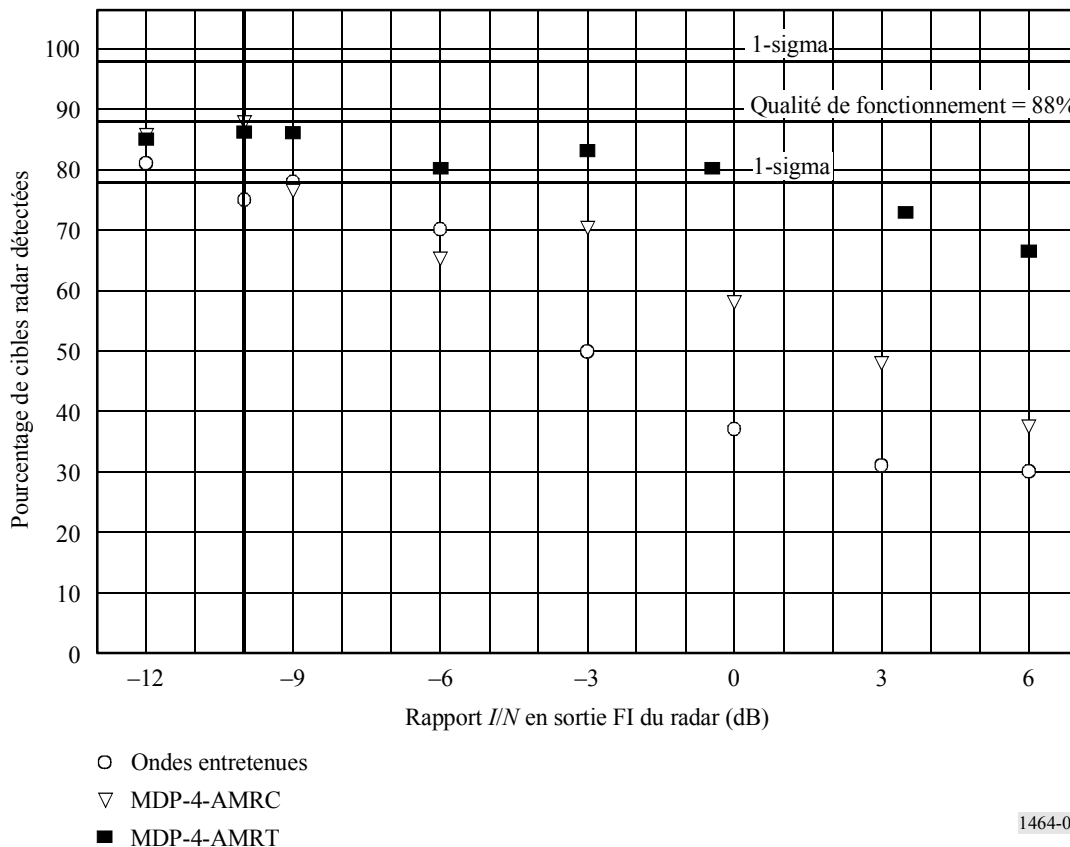
Pour les essais de base (pas de brouillage injecté dans le radar), le radar présentait une valeur moyenne de 8,8 cibles observées par rotation, sur les dix cibles simulées par rotation. On a observé vingt rotations par test. La  $P_d$  réelle de base de détection d'une cible était alors de  $175/200$ , soit 88%. Bien que l'on ait spécifié 9 cibles sur 10 par rotation ce qui correspond à la  $P_d$  de base souhaitée pour ces essais, la puissance de sortie RF du générateur de cibles ne pouvait varier que par pas de 1 dB, ce qui rendait extrêmement difficile l'obtention d'une valeur de  $P_d$  exactement égale à 0,90. Avec le réglage de puissance des cibles utilisé pour les essais, un accroissement de 1 dB de cette puissance conduisait à une valeur de  $P_d$  supérieure à 0,95 alors qu'une diminution de 1 dB de celle-ci conduisait à une valeur de  $P_d$  environ égale à 0,75.

La variance pour un comptage des cibles quelconque de base était de 1,1 cible par rotation. La valeur 1-sigma est égale à la racine carrée de la variance, soit 1,05. L'erreur admissible par rapport à la valeur  $P_d$  de base est égale au nombre moyen de cibles observées moins la valeur 1-sigma, divisé par 10. On obtient alors  $(8,8 - 1,05)/10$ , c'est-à-dire  $\pm 10\%$ . Sur la Fig. 5 figurent la valeur  $P_d$  de base de 88% ainsi que les limites supérieure et inférieure de l'erreur admissible par rapport à  $P_d$  sur la base des valeurs 1-sigma. La limite supérieure correspond à une valeur  $P_d$  de 98% et la limite inférieure correspond à une valeur  $P_d$  de 78%. La valeur acceptable du rapport  $I/N$  pour le brouillage injecté dans le récepteur radar correspond à la valeur  $I/N$  pour laquelle ce brouillage n'entraîne pas une baisse de la valeur telle que  $P_d$  est inférieure de 78%. Une valeur supérieure de  $P_d$  conduirait à une valeur plus petite de 1-sigma, ce qui rendrait le critère de protection  $I/N$  plus contraignant.

La Fig. 5 indique les valeurs  $I/N$  de seuil pour chaque type de signal brouilleur lorsque la  $P_d$  de détection d'une cible devient inférieure au seuil 1-sigma. Pour les types de signaux brouilleurs continus à ondes entretenues ou MDP-4-AMRC, cela correspond à des valeurs  $I/N$  supérieures à  $-10$  dB. Pour un signal brouilleur MDP-4-AMRT,  $P_d$  n'était pas inférieure à 1-sigma tant que  $I/N$  était supérieure à 0 dB.

FIGURE 5

Courbes de probabilité de détection de cibles



1464-05

### 3 Tests sur les radars D et E

Des mesures ont été effectuées par une administration avec les radars D et E en utilisant un bruit blanc à large bande et des signaux de multiplexage par répartition en fréquence orthogonale comme sources de brouillage pour déterminer l'effet de ces brouillages sur la probabilité de détection de cibles  $P_d$ . Pour ce qui est des cibles, on a utilisé tout naturellement des aéronefs présents dans le ciel.

Outre la probabilité  $P_d$ , le taux de fausse alarme  $P_{fa}$  et la précision sont des paramètres de qualité de fonctionnement importants des radars qui peuvent être affectés par des brouillages additionnels,

bien que le taux de fausse alarme devrait théoriquement être constant étant donné que le processeur vidéo utilise un algorithme à CFAR pour ajuster le seuil de détection. Pour ces tests, seuls les résultats concernant la probabilité de détection  $P_d$  sont présents.

Les chiffres ci-après montrent l'effet des brouillages causé par des signaux de radiodiffusion télévisuelle numérique par voie hertzienne de terre sur la probabilité de détection par un radar de tous les aéronefs présents dans le volume considéré:

- 40-60 milles marins (74-111 km environ) (60 milles marins est la portée maximale de détection du radar); et
- au-dessus de l'altitude de vol 250 (25 000 pieds, soit environ 7 620 m au-dessus du niveau de la mer).

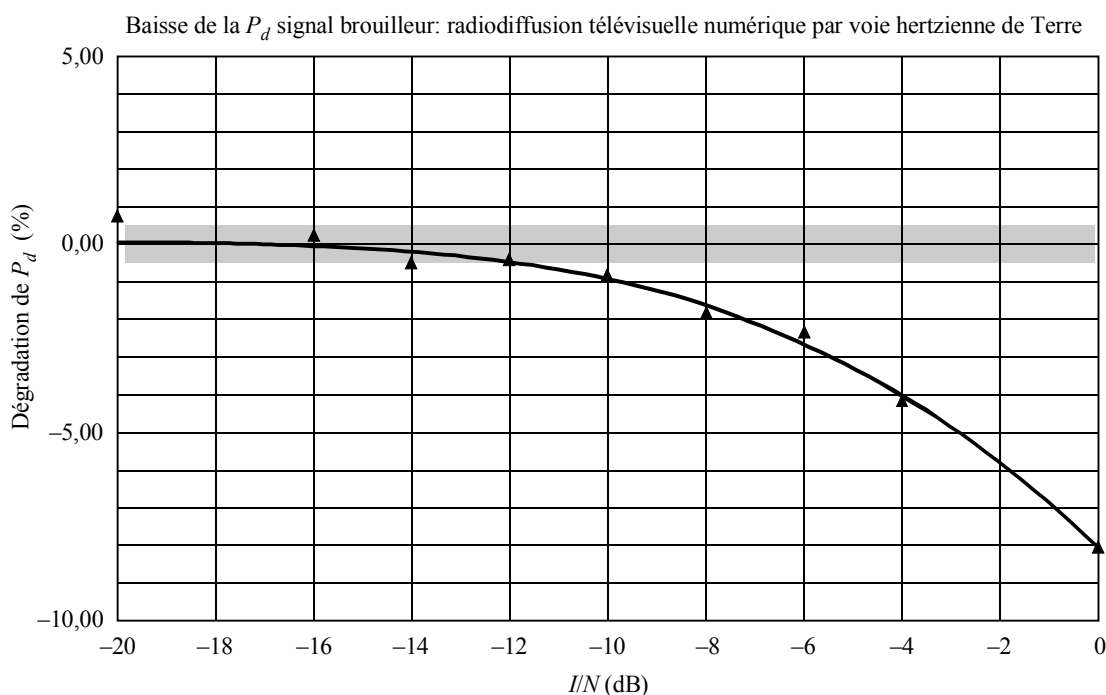
Il convient de mentionner que bien qu'il s'agisse d'un scénario où la dégradation de la qualité de fonctionnement est naturellement plus forte que celle que l'on constate au voisinage du radar, il existe d'autres circonstances où les effets peuvent être encore plus graves:

- présence unique de petit aéronef (avion à réaction de l'aviation générale ou avion à réaction militaire);
- altitude de vol faible (en particulier pour de grandes distances);
- en limite de portée (par exemple 50-60 milles marins ou 92-111 km environ).

L'exemple ci-dessus a été choisi car il permet d'obtenir un nombre suffisant d'échantillons pour une analyse statistique stable. La valeur de référence – pour laquelle la diminution de la probabilité de détection est nulle – est la moyenne de  $P_d$  de sept mesures sans signal brouilleur. Ces valeurs ont un écart type de 0,5% qui se compose des erreurs de mesure et des effets des fluctuations de l'ensemble de données du trafic des aéronefs et qui est indiqué par la partie ombrée des figures suivantes.

FIGURE 6

**Niveau de brouillage,  $I/N$ , en fonction de la baisse de la  $P_d$  d'un aéronef évoluant au-dessus du niveau de vol 250 et au-delà de 40 milles marins dans le cas du radar de surveillance aéroportuaire de Salzbourg**

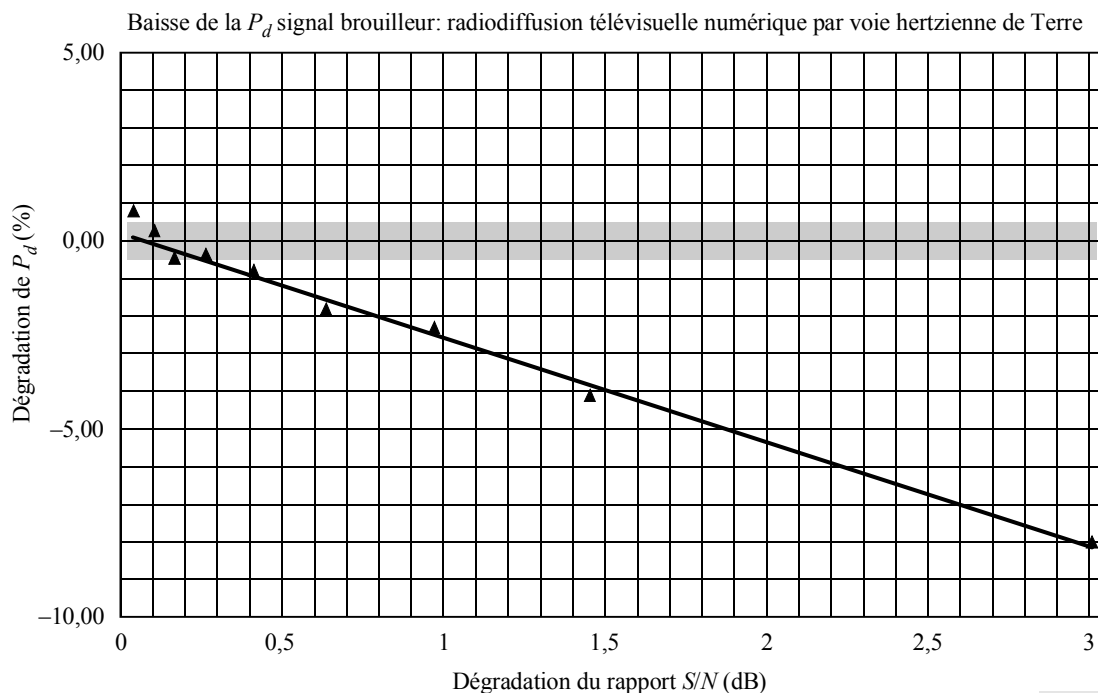


Pour une valeur du rapport  $I/N = -6$  dB, il y a déjà une dégradation de 2,5% de la probabilité de détection et, à  $-10$  dB, cette dégradation est de 0,8%, ce qui se trouve encore en dehors de la marge d'erreur. La courbe d'interpolation montre que la baisse de  $P_d$  commence à environ  $-14$  dB et devient importante au-dessus de  $-10$  dB. La Fig. 7 montre les mêmes données mais en fonction du rapport  $\Delta S/N$  à la place du rapport  $I/N$ . La sensibilité de la  $P_d$  à la dégradation du rapport  $S/N$  est d'environ 3%/dB pour une dégradation comprise entre 1 et 7% de  $P_d$ .

Les résultats des mesures effectuées avec l'autre radar sont généralement les mêmes sauf que la valeur absolue  $P_d$  de l'ancien système radar (en particulier lorsqu'on utilise un seul canal de fréquence) est inférieure à la valeur constatée avec le système moderne doté d'un traitement de données différent.

FIGURE 7

**Dégradation du rapport  $\Delta S/N$  en fonction de la dégradation de  $P_d$  pour un aéronef évoluant au-dessus du niveau de vol 250 et au-delà de 40 milles marins**



1464-07

#### 4 Conclusions

Les résultats des tests consignés dans la présente Annexe montrent que la capacité des radars B, D, et E à détecter des cibles est déjà altérée lorsque  $I/N$  est égal à  $-6$  dB. Afin de pouvoir protéger totalement les radars des types B, D, E et autres radars de radionavigation aéronautique qui fonctionnent dans la bande 2700-2900 MHz contre les émissions des systèmes de communication qui utilisent les schémas de modulation numérique choisis pour les tests, le critère de protection  $I/N$  devrait être de  $-10$  dB. Cette valeur correspond au seuil de brouillage cumulatif en présence de brouillages multiples. De futures spécifications applicables aux radars fonctionnant dans la bande 2700-2900 MHz aux fins de détection et de poursuite de cibles présentant des surfaces apparentes plus petites pourraient conduire à des critères de protection plus contraignants.

## Annexe 3

### Résultats des tests effectués avec un radar météorologique

#### 1 Résumé

Le principal objectif des travaux de la présente Annexe était de déterminer le niveau de brouillage maximal que les systèmes radars météorologiques pouvaient supporter avant que leur capacité de prévision soit altérée.

Les modèles mathématiques ont été établis à partir des spécifications techniques des radars pour les produits clés (réflectivité de base, vitesse radiale moyenne et largeur de spectre) qui indiquent ce que devraient être les niveaux attendus. Afin de valider physiquement cette analyse, une méthode de test et d'analyse de données a été définie et utilisée pour collecter et analyser les données.

L'analyse des données confirme la valeur calculée requise pour assurer la protection des mesures de réflectivité. Les limites actuelles du processus d'étalonnage et de suppression de bruit des radars effectué par le processeur de données à faible niveau restreignent les mesures des critères de protection nécessaires pour les mesures de largeur de spectre. Toutefois, la correction des données apportées pour pallier aux limites de traitement, se traduit par des valeurs qui concordent avec les valeurs de protection calculées.

#### 1.1 Introduction

Les tests ont été effectués avec un radar météorologique moderne (appelé radar G dans l'Annexe 1, Tableau 2) pour déterminer les critères de protection contre les brouillages causés par des signaux à ondes entretenues et autres signaux dans la bande 2 700-2 900 MHz. Pour les tests, on a injecté un signal à ondes entretenues et des signaux modulés selon six schémas de modulation numérique différents, sur le récepteur radar pendant que celui-ci explorait l'atmosphère. Les produits météorologiques de faible niveau ou de base (réflectivité de base, vitesse radiale moyenne, largeur de spectre) ont été consignés pendant l'exécution d'une série de rotations d'antenne avec une élévation d'antenne unique. Les signaux brouilleurs étaient injectés avec des rapports  $I/N$  allant de +6 dB à -15 dB.

#### 2 Calcul théorique du critère de protection nécessaire

Le radar génère trois produits de base qui sont utilisés par le système de traitement du signal pour obtenir les produits météorologiques qui sont utilisés par les météorologues. Ces trois produits de base sont les suivants:

- la réflectivité volumique,  $Z$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ), qui, pour la pluie, mesure le contenu total en eau du volume échantillon du radar;
- la vitesse radiale moyenne,  $V$  (m/s), qui est la vitesse radiale moyenne pondérée en puissance des cibles situées dans le volume échantillon;
- la largeur spectrale,  $W$  (m/s), qui est une mesure de la dispersion de vitesse radiale des cibles dans le volume échantillon.

#### 2.1 Niveau minimal du signal

Le traitement du signal élimine les effets du bruit du système radar des produits réflectivité et spectre de sorte que le système peut fournir ces produits lorsque le niveau du signal est en dessous du niveau de bruit du récepteur. Le seuil  $S/N$ , c'est-à-dire le niveau le plus faible pour lequel le signal d'écho est traité, peut être sélectionné par l'opérateur radar pour des valeurs du rapport  $S/N$

allant de  $-12$  dB à  $+6$  dB. Avec le système actuel de traitement du signal, les valeurs inférieures ne sont pas en général utilisées en raison des limites de suppression de bruit, mais le système fournit des produits utiles jusqu'à un rapport  $S/N$  de  $-3$  dB. Le niveau de brouillage qui compromet le bon fonctionnement du système est lié au niveau minimal du signal du rapport  $S/N$  de  $-3$  dB et aux caractéristiques des produits proprement dites, telles que décrites ci-dessous. Un brouillage excessif aura un effet négatif sur la qualité des données, dégradera les produits météorologiques et compromettra la capacité du système à accomplir sa mission qui consiste à fournir les données nécessaires pour les prévisions météorologiques publiques, les alertes météorologiques et les mesures des taux de précipitation pour les prévisions des crues subites et la gestion des eaux.

## 2.2 Réflectivité

La réflectivité est utilisée dans de multiples applications dont la plus importante est l'évaluation du taux de précipitation. La réflectivité est calculée à partir d'une moyenne linéaire de la puissance des échos et peut être polluée par les brouillages, ce qui se traduit alors par une augmentation inconnue de la réflectivité mesurée. La réflectivité est sérieusement faussée si le biais dépasse 1 dB. Un biais de 1 dB correspond au double de la précision d'étalonnage du radar et est égal à l'écart type de l'estimée de la réflectivité spécifiée dans les caractéristiques techniques des radars.

Le biais en termes de rapport  $I/S$  est donné par la relation:

$$\text{dB biais} = 10 \log \frac{S+I}{S}$$

Et un biais de 1 dB se produit dans les conditions suivantes:

$$I/S = 0,26$$

$$10 \log I/S = -6 \text{ dB}$$

Par conséquent, la réflectivité est biaisée de 1 dB lorsque le niveau du brouillage est inférieur de 6 dB au niveau du signal.

Etant donné que le niveau minimal de signal correspond à un rapport  $S/N$  de  $-3$  dB et que le niveau maximal du rapport  $I/S$  pour le produit réflectivité est de  $-6$  dB, la valeur maximale du rapport  $I/N$  est:

$$(-3 \text{ dB}) + (-6 \text{ dB}) = -9 \text{ dB } I/N$$

## 2.3 Vitesse radiale moyenne

La vitesse radiale moyenne est calculée à partir de l'argument de la covariance complexe d'un seul décalage. L'argument de la covariance complexe donne une estimée du déplacement angulaire du vecteur signal Doppler entre deux impulsions radar. Ce déplacement divisé par l'intervalle de temps entre les impulsions donne la vitesse angulaire du vecteur Doppler.

En tant que bruit à large bande, le vecteur signal brouilleur a une probabilité uniforme sur le plan complexe et ainsi n'introduit pas de rotation systématique du vecteur Doppler et de biais dans l'estimée. Toutefois, le caractère «aléatoire» des signaux composites plus le vecteur brouillage dû au brouillage accroît la variance de l'estimée du signal Doppler.



La variance de la fréquence Doppler, en conservant tous les termes à l'exception de ceux qui sont inversement proportionnels au carré du nombre d'échantillons, peut être calculée au moyen de la formule suivante:

$$\text{var}(\hat{f}) = \frac{2\pi^{3/2}WT}{8\pi^2 M \beta^2(T)T^2} + \frac{\left(\frac{N}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{N}{S}\right)[1 - \beta(2T)]}{8\pi^2 M \beta^2(T)T^2}$$

dans laquelle:

- $\hat{f}$ : estimée de la fréquence (Hz)
- $W$ : écart type de la fréquence (Hz)  
= 80 Hz pour 4 m/s pour le repère  $N/T$  à  $f_c = 2\,995$  MHz
- $T$ : intervalle d'échantillonnage (s)  
=  $10^{-3}$  s pour le repère  $N/T$
- $M$ : nombre d'échantillons dans l'estimée
- $N$ : puissance de bruit
- $S$ : puissance du signal
- $\beta$ : corrélation du signal pour le décalage  $T$   
= puissance  $(-2\pi^2 W^2 T^2)$  pour le spectre gaussien pris pour hypothèse.

Le premier terme est la contribution à la variance de la caractéristique du signal et le deuxième terme la contribution à la variance du bruit.

Les variances de fréquences sont fortement dégradées lorsque le brouillage augmente la variance de plus de 50%. La certitude des données dégrade tous les produits fondés sur la vitesse et les mesures de cisaillement de vitesse en particulier (le cisaillement de vitesse est la différence de vitesse sur une certaine distance). Une augmentation de 50% de la variance augmente la valeur du cisaillement détectée de manière fiable d'environ 25% au-dessus de la valeur d'étape de formation d'un événement météorologique sévère.

Une expression du rapport  $I/N$  se traduisant par une augmentation de la variance de 50% des paramètres de repère des exigences techniques et un rapport  $S/N = -3$  dB est donnée par:

$$2\pi^{3/2}WT + \left(\frac{N+I}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{N+I}{S}\right)[1 - \beta(2T)] = 3/2(2\pi^{3/2}WT) + 3/2\left(\frac{N}{S}\right)^2 + 3/2(2)\left(\frac{N}{S}\right)[1 - \beta(2T)]$$

dans laquelle:

$$\begin{aligned} W &= 80 \text{ Hz} \\ T &= 10^{-3} \text{ s} \\ 2\pi^{3/2}WT &= 0,89 \\ 1 - \beta(2T) &= 0,4 \\ S &= 0,5 N \end{aligned}$$

Par substitution et en recherchant une solution pour  $I/N$ , on obtient l'expression quadratique suivante:

$$(I/N)^2 + 2(I/N) - 1,21 = 0$$

$$I/N = 0,49$$

$$10 \log I/N = -3 \text{ dB}$$

Par conséquent, le niveau du brouillage ne peut pas être supérieur au niveau minimal du signal.

## 2.4 Largeur spectrale

La largeur spectrale est calculée à partir d'une corrélation à un seul décalage en supposant une densité spectrale gaussienne. L'algorithme s'exprime comme suit:

$$W = \frac{Va}{\pi} \left| \ln \frac{R^2}{S^2} \right|^{1/2}$$

formule dans laquelle:

$W$ : largeur spectrale (écart type)

$Va$ : vitesse de Nyquist, 25 m/s déterminée à partir des spécifications techniques du radar

$R$ : puissance de la covariance d'un seul décalage

$S$ : puissance du signal.

Le signal brouilleur provoque une augmentation du biais et de la variance de l'estimation de la largeur spectrale, mais le biais est bien plus gênant. La largeur spectrale se dégrade lorsque le biais provoqué par les brouillages dépasse la précision de la largeur figurant dans les spécifications techniques du radar qui est de 1 m/s. Le rapport  $I/N$  auquel ce niveau de biais apparaît peut être calculé en résolvant l'équation pour la covariance à 4 m/s et la puissance du signal de  $N/2$ , puis en résolvant l'équation pour le niveau  $S + I$  produisant une largeur spectrale à 5 m/s. La valeur donnée dans les spécifications techniques est de 4 m/s. Pour calculer le rapport  $I/N$ , on résout l'équation ci-dessus pour  $W = 4$  m/s et 5 m/s.

Pour  $W = 4$  m/s:

$$25/\pi \left| \ln (R^2/S^2) \right|^{1/2} = 4$$

$$\ln (R^2/S^2) = -0,25$$

$$R/S = 0,88$$

$$R = 0,88 S$$

$$R = 0,88 (N/2)$$

Pour  $W = 5$  m/s:

$$25/\pi \left| \ln (R^2 + I)^2 \right|^{1/2} = 5$$

$$\ln R^2/(S + I)^2 = -0,39$$

$$R/(S + I) = 0,82$$

Remplacement :  $R = 0,88 (N/2)$ ,  $S = N/2$ :

$$0,88 (N/2) / (N/2) + I = 0,82$$

$$0,82 ((N/2) + I) = 0,88 (N/2)$$

$$I/N = 0,0366$$

$$10 \log (I/N) = -14,4 \text{ dB}$$

### 3 Fonctionnement du système, produits de sortie et sensibilité au brouillage

#### 3.1 Mode de fonctionnement du système pour les tests

Le radar dispose de plusieurs modes de fonctionnement qui utilisent différentes vitesses de rotation de l'antenne, différentes élévations de l'antenne et différentes FRI. Le mode de fonctionnement retenu pour les tests est l'un des plus couramment utilisés, il est optimisé pour une sensibilité du système conduisant à une grande sensibilité aux brouillages. Le Tableau 5 donne les caractéristiques du mode utilisé pour les tests.

TABLEAU 5

#### Caractéristiques du radar météorologique utilisé pour les tests

Caractéristiques du radar	
Fréquence	2 995 MHz
Puissance des impulsions	750 kW
Largeur d'impulsion	4,7 $\mu$ s
FRI	322 Hz (première coupe) 446 Hz (deuxième coupe)
Portée maximale	290 milles (467 km environ)
Largeur de bande RF (à 3 dB)	13 MHz
Largeur de bande FI	630 kHz
Facteur de bruit	4,9 dB
Type de diagramme d'antenne	Faisceau étroit
Vitesse de scrutation	0,84 tour/mn
Temps de scrutation de l'antenne	71,4 s
Hauteur de l'antenne	30 m
Ouverture du faisceau d'antenne	0,90°
Polarisation	Rectiligne horizontale

Dans le mode utilisé, la rotation de l'antenne commence à une élévation de 0,5°, le radar émet une impulsion de 4,7  $\mu$ s toutes les 3,1 ms pour la première rotation, puis une impulsion toutes les 2,24 ms pour la deuxième rotation. Cela correspond à des FRI de 322 Hz et 446 Hz respectivement. Chaque révolution couvre 360° en azimut. Dans des conditions normales de fonctionnement, le radar effectue également des rotations d'antenne à plusieurs angles d'élévation plus élevés avant de revenir à 0,5°. Pour ce test, deux coupes en élévation pour la seule élévation d'antenne ont fourni un volume suffisant de données pour l'analyse et des coupes pour des élévations plus élevées n'ont pas été effectuées. La première rotation d'antenne est utilisée pour mesurer la réflectivité et la deuxième pour mesurer la vitesse radiale moyenne et la largeur spectrale (voir ci-dessous). Pour chaque point de l'atmosphère, plusieurs impulsions sont émises et reçues. Compte tenu de la durée des impulsions émises et du temps séparant deux impulsions consécutives, le système se trouve en mode de réception pendant plus de 99,5% du temps. L'amplitude des impulsions reçues est inférieure de 200 dB environ par rapport aux impulsions émises car les impulsions sont diffusées par les petits objets se trouvant dans l'air (diamètre de l'ordre du millimètre ou moins) à des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. Le signal reçu subit une conversion qui le fait passer de 2995 MHz à la fréquence FI de 57 MHz avant d'être appliqué au détecteur synchrone. Les signaux I et Q en bande de base détectés sont numérisés sur 16 bits pour permettre leur passage dans les sous-systèmes de traitement.

### 3.2 Produits de sortie

Les impulsions réfléchies en chaque point sont utilisées par les sous-systèmes de traitement pour obtenir trois moments de base météorologiques de la réflectivité de base, la vitesse radiale moyenne et la largeur spectrale. Ces moments de base sont présentés sous forme de produits aux utilisateurs et servent à élaborer d'autres produits météorologiques représentant l'accumulation des précipitations, les tornades, le cisaillement du vent, etc. La réflectivité est calculée à partir de l'amplitude (ou de la puissance) du signal reçu. La vitesse radiale moyenne est déduite des différences entre les vecteurs I et Q dues au décalage Doppler. La largeur de spectre est la variance entre impulsions des vitesses reçues en provenance du même point.

### 3.3 Sensibilité au brouillage

Des produits de base sont affectés par les brouillages de deux manières différentes. Tout d'abord, les valeurs peuvent être biaisées, ce qui diminue la précision du système; ensuite, la variance des signaux de sortie peut être affectée. En présence de brouillage, la réflectivité est sensible au biais, la vitesse radiale moyenne aux erreurs de variance et la largeur spectrale à la fois au biais et aux erreurs de variance. En ce qui concerne la largeur spectrale, les erreurs dues au biais sont plus importantes que les erreurs dues à la variance car le biais ou le décalage représente une erreur de mesure de la vitesse tandis que la variance représente l'incertitude sur les vitesses mesurées. Le Tableau 6 montre laquelle des erreurs induites par les brouillages, biais et variance, affecte les produits de base.

TABLEAU 6

#### Sensibilité des produits météorologiques de base aux erreurs induites par les brouillages

Produit de base	Erreurs induites par les brouillages	
	Biais	Variance
Réflectivité	X	
Vitesse		X
Largeur spectrale	X	X

Le radar a été conçu avec des critères de qualité de fonctionnement spécifique pour obtenir le niveau de prévision météorologique le plus élevé possible. Le cahier des charges techniques du radar spécifie que la précision d'étalonnage de la réflectivité doit être de moins de 1 dB (on obtient 0,5 dB en pratique). La réflectivité est fortement polluée si le biais de l'estimée est supérieur à 1 dB. Un biais de 1 dB est égal au double de la précision d'étalonnage du radar et est égal à l'écart type de l'estimée de la réflectivité spécifiée dans le cahier des charges techniques du radar météorologique. La vitesse et la largeur spectrale doivent être précises à 1 m/s conformément au cahier des charges. Les mesures de vitesse sont fortement perturbées si le brouillage accroît la variance estimée de plus de 50%. L'incertitude dans les données dégrade les produits fondés sur la vitesse radiale moyenne. Lorsque ces niveaux sont dépassés en raison des brouillages, l'utilisation du système radar comme outil de prévision est fortement compromise et ce dépassement indique la présence des brouillages préjudiciables.

Parmi les trois produits de base, la largeur spectrale est la plus sensible car elle est issue d'une fonction d'autocorrélation très sensible au bruit. Les niveaux de brouillage peuvent affecter la précision de plus de 1 m/s, ce qui affectera fortement la qualité de fonctionnement du système. La vitesse radiale moyenne et la largeur spectrale sont utilisées conjointement pour distinguer le vent, qui présente une largeur spectrale faible, des tornades et autres phénomènes météorologiques violents qui présentent une grande largeur spectrale. Le seuil du radar, pour ce qui est des brouillages, est limité à un biais de 1 m/s de la largeur spectrale.

#### 4 Méthode de mesure

Les mesures ont été effectuées en injectant le signal brouilleur dans le récepteur radar au moyen d'un coupleur pour combiner le brouillage avec le signal reçu par le radar. La fréquence de fonctionnement du radar testé et la fréquence du signal brouilleur simulé étaient de 2 995 MHz.

NOTE 1 – Dans la Recommandation UIT-R M.1464 il est admis que les systèmes radars météorologiques peuvent fonctionner jusqu'à 3 000 MHz.

Les signaux brouilleurs utilisés pour les tests sont représentés dans le Tableau 7.

TABLEAU 7  
Signaux brouilleurs

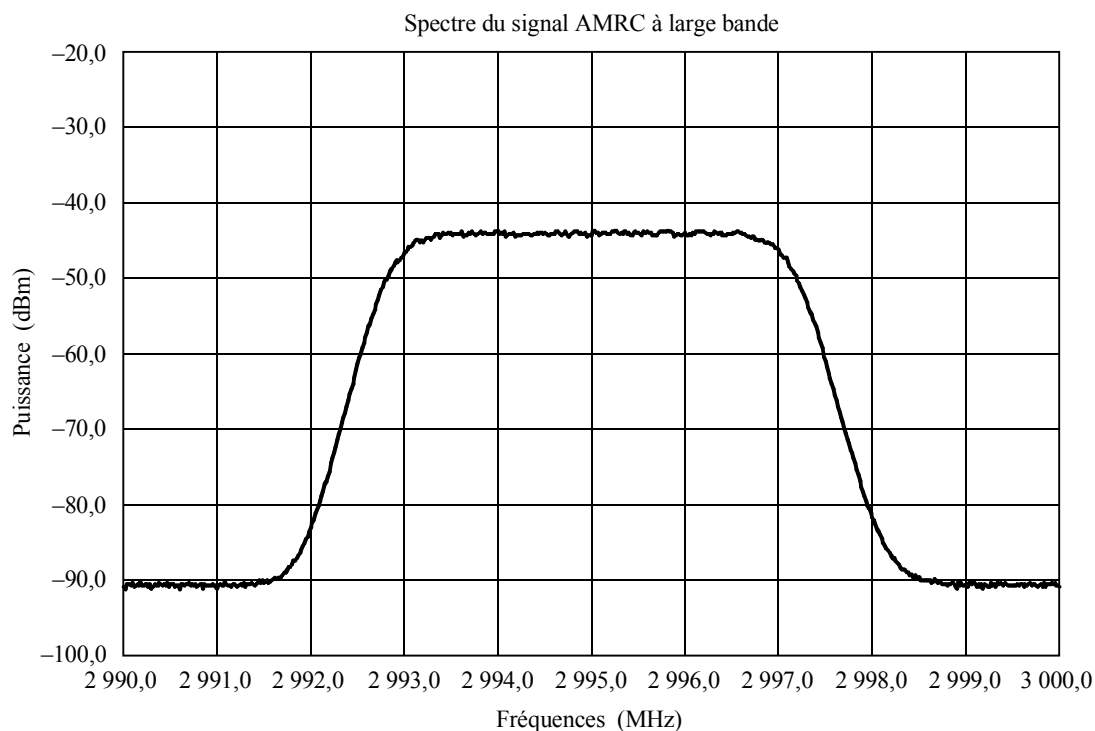
Source de signal brouilleur Fréquence centrale = 2 995 MHz	
Ondes entretenues	
AMRC à large bande	4,096 Msymbole/s
AMRC-2000-3X	3,686 Msymbole/s
EDGE-MDMG	384 ksymbole/s
EDGE-MDP-8	384 ksymbole/s
DECT	1,152 Msymbole/s

MDMG: Modulation par déphasage minimal avec filtrage gaussien.

DECT: Télécommunications numériques améliorées sans cordon.

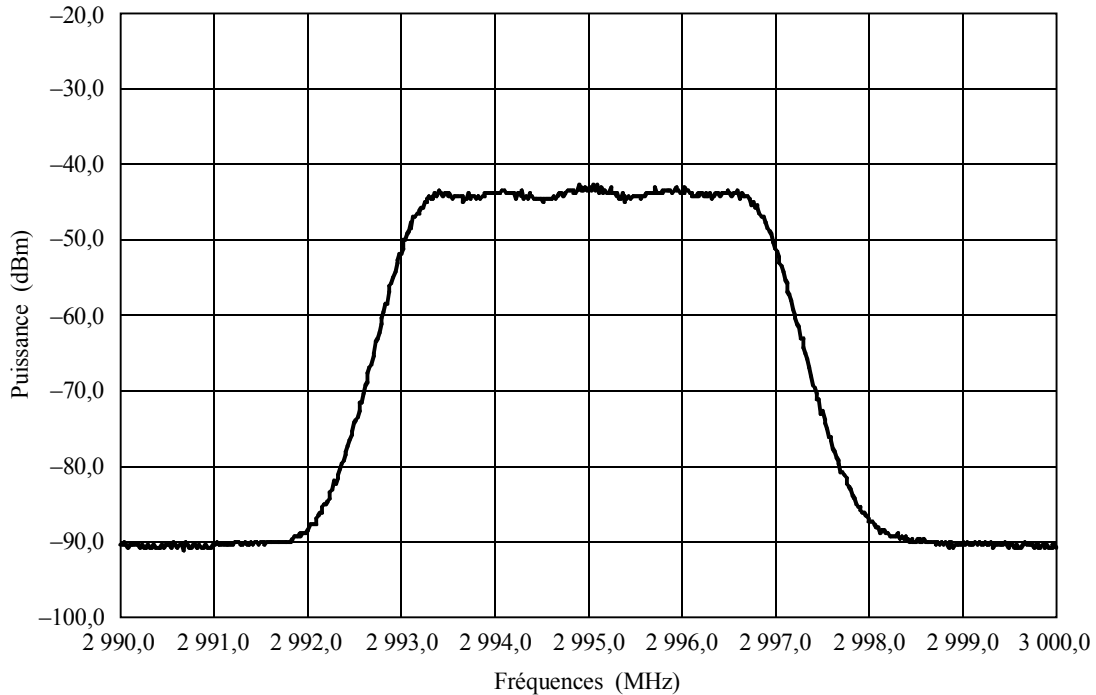
Les spectres des signaux AMRC à large bande et AMRC-2000 3X sont illustrés aux Fig. 8 et 9.

FIGURE 8  
Tracé du spectre dans le cas d'un signal AMRC à large bande



Réglage de l'analyseur de spectre:  
Largeur de bande de résolution: 300 kHz  
Temps de balayage: 5 s

FIGURE 9  
Tracé du spectre du signal AMRC-2000 3X



Réglage de l'analyseur de spectre:  
Largeur de bande de résolution: 300 kHz  
Temps de balayage: 5 s

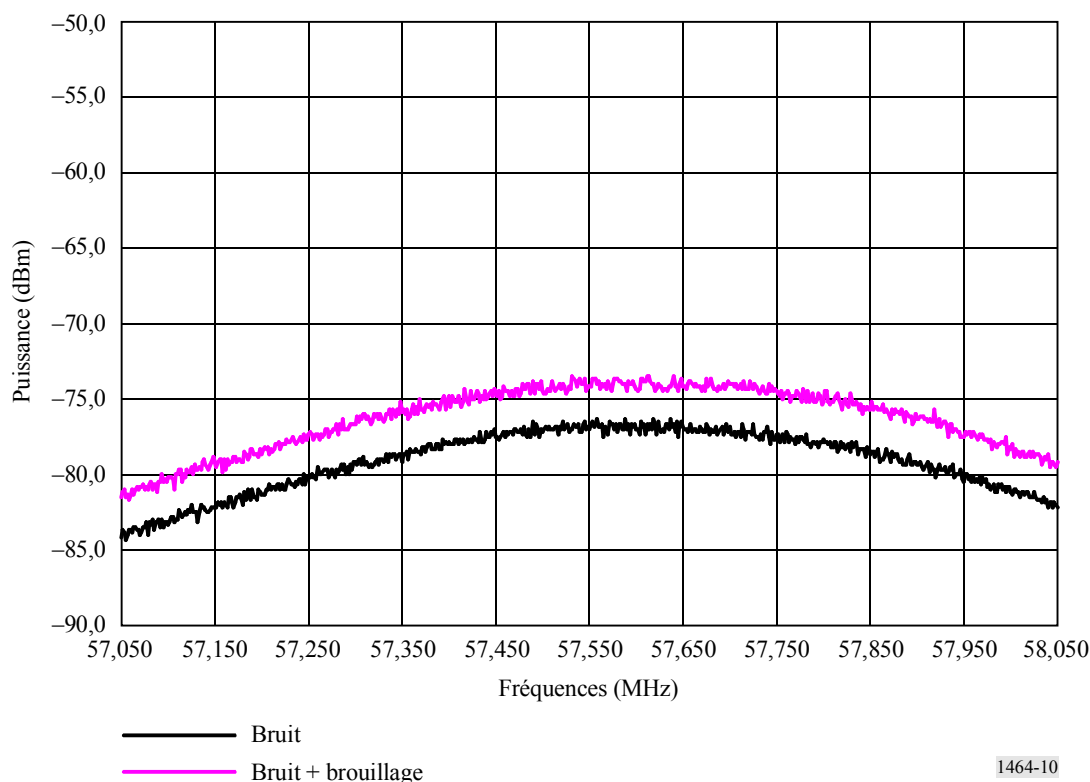
1464-09

Pour étalonner le montage de test avec un niveau de brouillage connu à l'entrée du récepteur radar, le bruit de fond du récepteur a été mesuré, sans brouillage, à la sortie FI à 57,55 MHz du récepteur. Le signal brouilleur a ensuite été activé et son niveau a augmenté jusqu'au point où le bruit de fond à la sortie FI du radar augmentait de 3 dB. Ce point correspondait au niveau de brouillage dans la bande passante du radar égale au bruit du récepteur radar dans sa bande passante, et a un rapport  $I/N$  de 0 dB. Le niveau de sortie du signal délivré par la source a été consigné pour la valeur 0 dB du rapport  $I/N$  et le niveau réel injecté dans le trajet de réception du radar a été mesuré et relevé. Connaissant la valeur du signal délivré par la source pour un rapport  $I/N$  égal à 0 dB, la source de signal a pu être réglée pour toute autre valeur du rapport  $I/N$  souhaité en réglant le niveau de sortie de la source de signal. Les tests ont été effectués aux points où le niveau de brouillage correspondait à des valeurs du rapport  $I/N$  de -15 dB, -12 dB, -10 dB, -6 dB, -3 dB, 0 dB, +3 dB et +6 dB. La Fig. 10 donne un exemple des résultats des mesures du bruit du récepteur en présence ou en absence de brouillage pour des tests effectués avec des signaux AMRC à large bande.

FIGURE 10

Spectre de bruit pour un étalonnage du rapport  $I/N$  de 0 dB (FI centrale de 57,55 MHz)  
dans le cas d'un signal AMRC à large bande

Etalonnage pour les essais AMRC à large bande



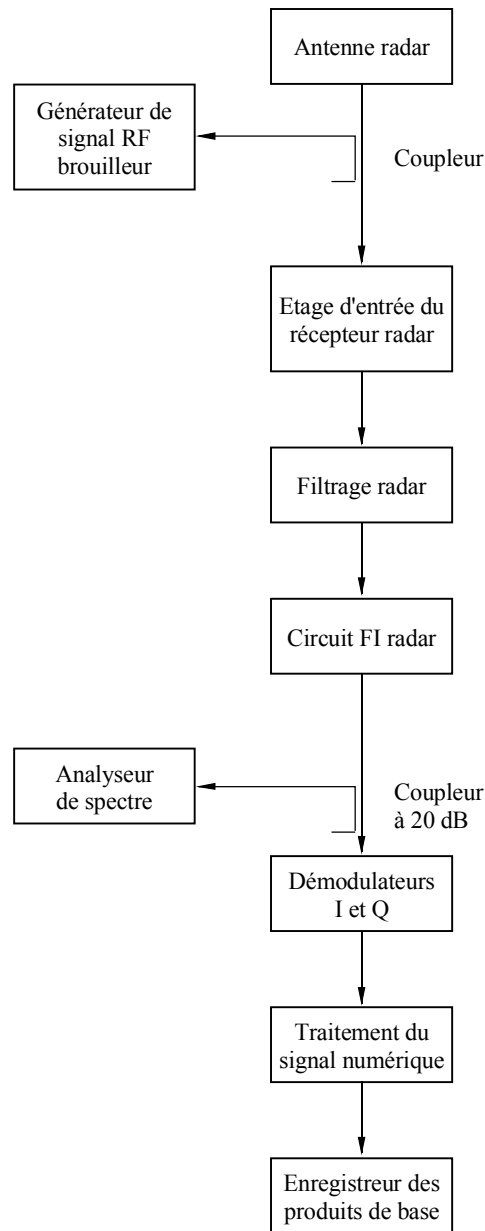
1464-10

Le radar a été réglé pour balayer l'atmosphère, appelé ci-après « scrutation volumique », pour une élévation de l'antenne sans brouillage suivie par une scrutation volumique avec brouillage. Pour chaque scrutation volumique, avec ou sans brouillage, l'antenne faisait deux révolutions complètes permettant ainsi d'obtenir deux coupes d'élévation pour la même élévation en utilisant deux FRI. La FRI utilisée pour la première rotation était une fréquence basse optimisée pour collecter les produits de réflectivité de base. La FRI utilisée pour la deuxième rotation était plus élevée et permettait de recueillir les données de la vitesse radiale moyenne et de largeur spectrale. Cette scrutation alternative volumique, avec et sans brouillage, a été répétée pour des niveaux de brouillage allant de  $-15$  à  $+6$  dB. Cette méthode de test a permis d'obtenir une scrutation volumique immédiatement avant et après chaque scrutation volumique avec brouillage qui pouvait être utilisé comme référence pour déterminer les effets statistiques du brouillage. Pendant toute la durée des tests, les données radar des produits de base ont été enregistrées pour analyse ultérieure.

La Fig. 11 montre la configuration de test qui se compose d'un générateur de signal alimentant un coupleur RF dans lequel le signal brouilleur est combiné avec le signal d'écho radar reçu à l'entrée du récepteur. Le récepteur amplifie et convertit le signal en signal FI où il est observé sur un analyseur de spectre. Les sorties I et Q sont numérisées et traitées pour obtenir les produits météorologiques de base à savoir la réflectivité de base, la vitesse moyenne et la largeur spectrale. Les produits de base ont été enregistrés pour analyse statistique. Les tests avec chacun des types de signaux brouilleurs, à toutes les vitesses de données et avec tous les schémas de modulation, n'étaient pas réalisables en raison du grand nombre de combinaisons. Les signaux de test ont été choisis pour couvrir les signaux AMRC et AMRT ainsi que plusieurs systèmes de modulation et plusieurs fourchettes de débit de données.

FIGURE 11

## Schéma synoptique du montage de test



1464-11

## 5 Méthode d'analyse des données et résultats

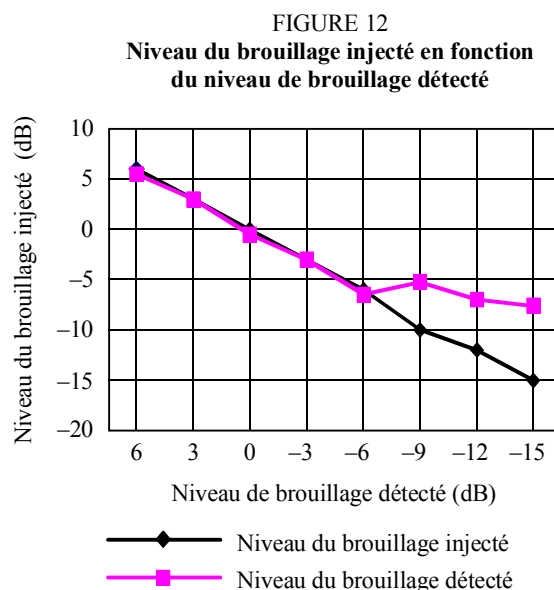
Les radars testés jusqu'à présent avaient été utilisés pour des applications de navigation qui assurent la détection de cibles ponctuelles. Les radars météorologiques recueillent un type de données nettement différent en ce sens qu'ils effectuent une scrutation volumique de l'atmosphère et fournissent des données sur l'atmosphère sur un espace de 360° en azimut et jusqu'à des angles d'élévation de 60° environ. Dans les précédents rapports, dans lesquels il s'agissait de radars poursuivant des cibles ponctuelles, l'analyse des effets des brouillages sur la probabilité de détection était souvent suffisante. Les brouillages sur ces types de système provoquaient souvent un masquage des cibles souhaitées et créaient des fausses cibles. Pour les radars météorologiques, pour lesquels les données sont collectées et analysées pour un volume de l'atmosphère, la qualité de



fonctionnement des radars n'est pas caractérisée par la probabilité de détection. L'analyse des données doit faire appel à une approche différente afin d'obtenir des résultats significatifs. Plutôt que d'étudier les effets sur la probabilité de détection, l'analyse statistique est effectuée sur les données météorologiques de faible niveau pour chaque réponse de créneau de portée. L'étude des réponses visuelles affichées sur l'écran radar montre certains effets des brouillages mais ne donne pas une analyse scientifique des résultats sur les produits météorologiques générés telles les estimées de précipitation, les mesures de vitesse du vent ou la détection des cisaillements.

## 5.1 Hypothèses

- Comme indiqué plus haut, la procédure de test utilisée pour injecter des signaux brouilleurs dans le récepteur radar exigeait l'injection d'un niveau brouilleur connu à l'entrée du récepteur radar. Le processus d'analyse des données permettant de déterminer graphiquement le niveau  $I/N$  pour lequel on observe un biais de 1 dB sera facilité par la connaissance de ce niveau brouilleur.
- Pour ce type particulier de radar, le signal minimal utilisable, avec la technologie actuelle, est inférieur de 3 dB au bruit de fond.
- Pour le produit réflectivité, le rapport  $I/N$  minimal requis est égal au niveau de brouillage en dessous du signal qui donne un biais de 1 dB plus le niveau minimal du signal qui doit être extrait (–9 dB d'après le § 2.2).
- Pour le produit largeur spectrale, la valeur maximale du rapport  $I/N$  est égale au niveau de brouillage au-dessous du signal qui donne une différence de 1 m/s de la largeur spectrale (–14,4 dB d'après le § 2.4).
- Le système utilise un traitement visant à éliminer les effets du bruit, permettant ainsi au radar de traiter les signaux dont le niveau est inférieur à celui du bruit de fond. Dans un système qui ne comporte pas d'effets de bruits résiduels, on pourrait s'attendre à ce que le signal brouilleur qui a été injecté au niveau de l'entrée du récepteur suive linéairement le niveau de brouillage qui a été détecté en utilisant l'analyse des données. Dans la Fig. 12, on compare les niveaux relatifs du brouillage qui ont été injectés à l'entrée du récepteur au niveau de brouillage qui a été détecté en utilisant l'analyse des données. On constate une divergence à environ –6 dB.



Cet effet résiduel a des conséquences sur l'analyse comme suit:

- *Réflexivité*: aucun effet étant donné que la technique graphique qui a été utilisée pour déterminer le niveau pour lequel un biais de 1 dB dans la réflectivité apparaît est relative et n'est pas modifiée par cet effet résiduel.
- *Largeur spectrale*: le bruit résiduel, présent en raison des incertitudes associées au réglage des niveaux absolus de brouillage et des incertitudes associées au processus de suppression du bruit, a un effet sur notre capacité à déterminer graphiquement le niveau pour lequel la différence de largeur spectrale est supérieure à 1 m/s.

On peut utiliser les données de la Fig. 12 pour corriger les erreurs qui sont introduites en utilisant une technique graphique pour déterminer le niveau pour lequel la différence de largeur spectrale est égale à 1 m/s. Le Tableau 8 recense les valeurs de la correction appliquée pour l'analyse de la largeur spectrale. Ces données ne sont pas nécessaires pour l'analyse de réflectivité.

TABLEAU 8

**Valeurs de la correction appliquée**

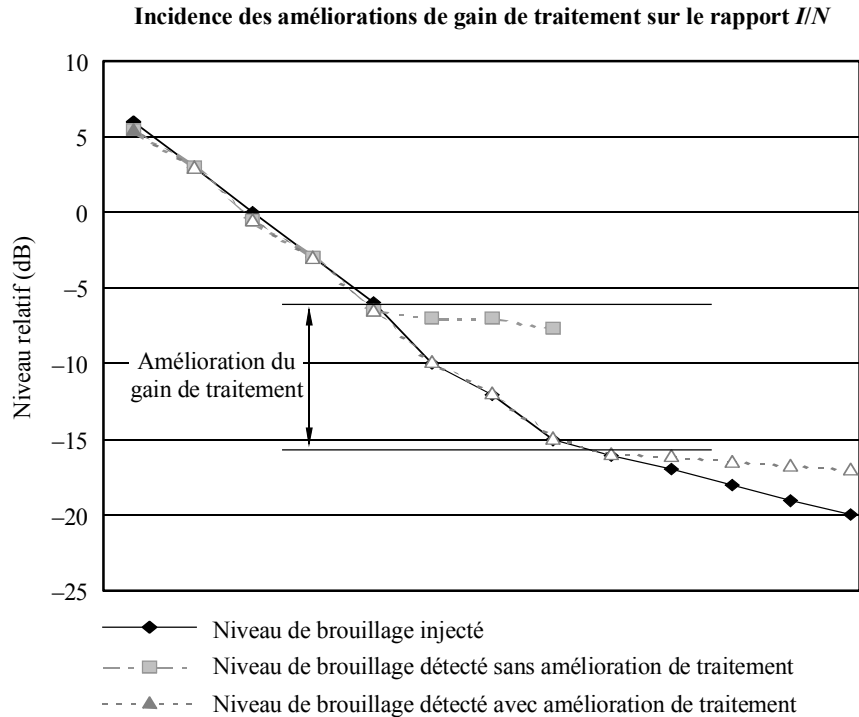
Niveau du brouillage injecté $I/N$ (dB) – A	Niveau de brouillage détecté $I/N$ (dB) – B	Valeurs de la correction appliquée (B – A)
6	5,5	–0,5
3	3	0
0	–0,5	–0,5
–3	–3,0	–0,0
–6	–6,5	–0,5
–10	–5,25	4,75
–12	–7	5
–15	–7,6	7,4

La variabilité supplémentaire qui s'ajoute aux erreurs d'analyse de données agit comme une fonction permettant d'estimer graphiquement les points de données moyens et associés.

La mise en oeuvre des améliorations apportées au radar, qui sont examinées au § 6, permettra d'obtenir une puissance de traitement d'environ 10 dB, ce qui diminuera le bruit de fond équivalent d'une valeur équivalente à l'amélioration de la détection. Le résultat final est que le point à partir duquel la sensibilité réelle du radar au brouillage s'écarte de la courbe théorique de la Fig. 13 est décalé d'une valeur égale à la puissance de traitement. La Fig. 12 indique que les résultats du test diffèrent de la théorie lorsque  $I/N = -6$  dB. La mise en oeuvre des améliorations conduisant à une puissance de traitement de 10 dB décalera ce point jusqu'à la valeur  $I/N = -16$  dB. Toutefois, la valeur à partir de laquelle la qualité de fonctionnement est dégradée au-delà des spécifications du système en raison du brouillage ((Biais de 1m/s) impose que  $I/N$  soit égal à  $-14,4$  dB comme l'ont montré des calculs et des mesures précédents.

NOTE 1 – L'incidence des améliorations proposées pour le récepteur (voir la Fig. 13) est théorique et n'est pas fondée sur des mesures réelles.

FIGURE 13



1464-13

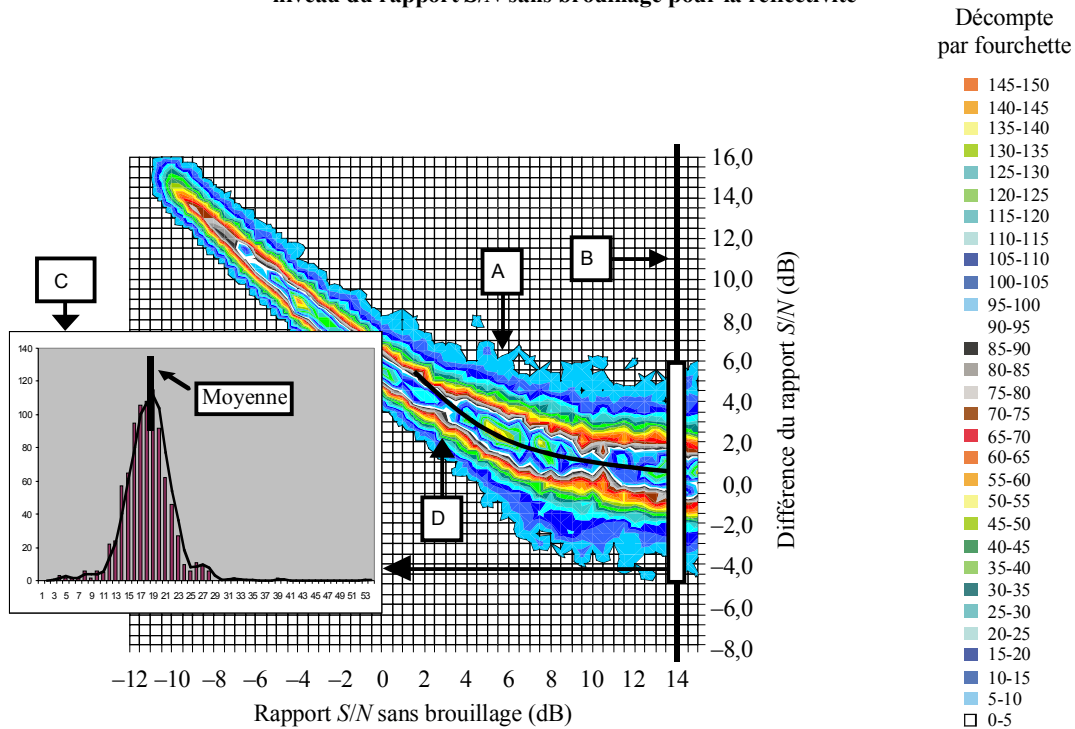
## 5.2 Méthode d'analyse des données

Les données tirées d'un certain nombre de balayages de volume (voir le § 4) ont été recueillies et traitées en utilisant les algorithmes de génération de produit radar. Les données recueillies étaient représentatives de milliers de points qui, en fonction du balayage de volume, étaient répartis en 920 intervalles sur 360 axes radiaux. Un programme en langage C a été développé pour analyser les données. En bout de chaîne, ce programme permettait de trier l'ensemble des données et de les répartir en deux tableaux: celui des rapports  $S/N$  sans brouillage ( $S/N$ ) et celui des rapports  $S/N$  avec brouillage  $(S + I + N)/N$ . Un troisième tableau, celui de la différence du rapport  $S/N$ , a été créé et contenait la différence entre les valeurs du rapport  $S/N$  sans brouillage ( $S/N$ ) et les valeurs du rapport  $S/N$  avec brouillage  $(S + I + N)/N$ . Les valeurs de ce dernier tableau ont été classées par comptage d'intervalle (en fonction du rapport  $S/N$  sans brouillage). On a représenté sur un graphe à l'aide d'un code des couleurs le nombre d'intervalles présentant la même valeur de différence du rapport  $S/N$  et la même valeur du rapport  $S/N$  sans brouillage. On peut voir sur la Fig. 14-A la fonction de régression, représentée par un diagramme de contour codé par des couleurs.

Une coupe de ce diagramme de contour pour une valeur spécifique du niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage (Fig. 14-B) nous donne des indications sur la distribution des différences de rapport  $S/N$ . Les valeurs associées aux différences du rapport  $S/N$  contenues dans l'intervalle du rapport  $S/N$  sans brouillage défini par un niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage de 14 dB sont représentées par un histogramme sur la Fig. 14-C. Nous nous intéressons à la valeur moyenne de cette distribution car elle indique la valeur moyenne de la différence du rapport  $S/N$  due au brouillage pour une valeur spécifique du niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage. Nous pouvons déterminer la valeur moyenne de la différence du rapport  $S/N$  pour chaque niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage puis tracer une courbe unique (Fig. 14-D) représentant la valeur moyenne de la différence du rapport  $S/N$  en fonction du niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage. On forme ainsi la base de données qui sera utilisée pour une analyse graphique permettant d'estimer le biais mesuré de la grandeur signal plus brouillage en présence de brouillage.

FIGURE 14

Distribution de fréquence des différences du rapport  $S/N$  classées en fonction niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage pour la réflectivité



1464-14

La fonction de régression de la différence de puissance avec ou sans brouillage (différence du rapport  $S/N$ ) en fonction du signal sans brouillage ( $S/N$  sans brouillage) correspond au biais en fonction du niveau de signal puisqu'il s'agit de la différence entre le niveau véritable du signal et le niveau de la grandeur signal plus brouillage, interprétée comme étant le niveau de signal en présence de brouillage.

Lorsque la différence du rapport  $S/N$  est de 3 dB (ce qui correspond à un facteur deux), le niveau de brouillage est égal au niveau de signal. Puisque le traitement supprime les effets du bruit, la puissance de bruit peut être supprimée, ce qui permet d'évaluer le niveau de brouillage et constitue un point de référence commode. Le biais de mesure du niveau signal plus brouillage peut être spécifié comme étant le niveau du signal par rapport au niveau du brouillage ou le rapport  $S/I$ . Puisque le bruit du système est connu et que le niveau de brouillage peut être exprimé à l'aide des rapports  $S/N$  et  $I/N$ , on peut prévoir pour la fonction de régression que:

- lorsque la valeur du signal augmente par rapport à celle du brouillage, la différence du rapport  $S/N$  diminue;
- lorsque la valeur du signal et celle du brouillage sont égales, la différence du rapport  $S/N$  est égale à 3 dB;
- lorsque la valeur du signal diminue par rapport à la valeur du brouillage du rapport  $S/N$ , la différence du rapport  $S/N$  tend vers le rapport de brouillage.

Ces caractéristiques peuvent être observées sur le diagramme de contour/de régression de la Fig. 14-A. Disposant du point à 3 dB comme référence, on peut déterminer graphiquement le rapport  $I/S$  pour une différence du rapport  $S/N$  quelconque en relevant simplement la différence entre le niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage associé à une différence du rapport  $S/N$  de 3 dB et le niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage associé à la différence du rapport  $S/N$  qui nous intéresse. Puisque le rapport  $I/N$  pour une différence du rapport  $S/N$  de 3 dB est égal à zéro, cette différence

sera égale à la valeur du rapport  $I/S$  associée à la différence du rapport  $S/N$  recherchée. Le récepteur radar ayant la capacité d'extraire des signaux du bruit jusqu'à un niveau de  $-3$  dB, le rapport  $I/N$  requis aux fins de protection jusqu'à un niveau donné de différence du rapport  $S/N$  est alors égal à:

$$I/N = I/S + (-3 \text{ dB})$$

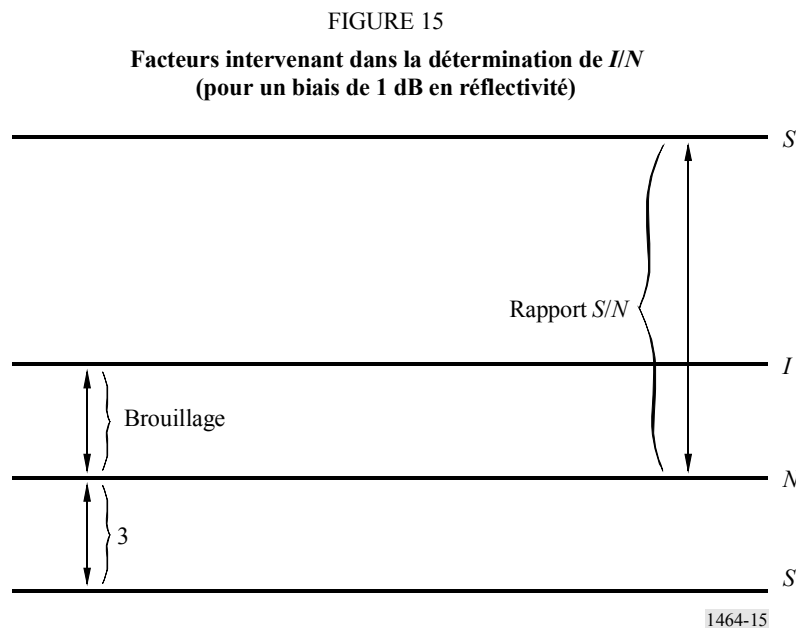
où:

$$I/S = (\text{niveau du rapport } S/N \text{ sans brouillage } (S/N) \text{ au niveau de différence du rapport } S/N = 3 \text{ dB (où } S = I)) - (\text{niveau du rapport } S/N \text{ sans brouillage } (S/N) \text{ à la différence du rapport } S/N \text{ recherchée (1 dB pour la réflectivité)})$$

Les facteurs à prendre en compte lorsque l'on procède à l'analyse graphique sont les suivants:

- $S_u$ : niveau de signal minimum utilisable en présence de bruit
- $I$ : niveau de brouillage
- $N$ : bruit de fond du récepteur
- $S_m$ : niveau minimal de signal détectable en l'absence de brouillage et niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage ( $S/N$ ).

Les relations entre ces facteurs sont illustrées sur la Fig. 15.



Aux fins d'analyse, supposons que le niveau relatif de brouillage,  $I$ , soit supérieur de 6 dB au bruit de fond et que l'on ait déterminé, à partir du diagramme de contour, que pour le niveau auquel un biais de 1 dB se produit, le niveau du rapport  $S/N$  avec brouillage ( $S/N$ ) est égal à 10,6 dB. En outre, on sait que  $S_m = -3$  dB et que les mesures sont faites par rapport au niveau de bruit  $N$ .

Dans ce cas, une valeur  $S/N$  ou un niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage d'au moins 10,6 dB est requis pour s'assurer que le biais de réflectivité n'excède pas 1 dB pour un niveau de brouillage de 6 dB. Le niveau réel de brouillage peut être obtenu à partir du diagramme de contour au point pour lequel  $S = I$ . Pour ce jeu de données, la valeur réelle du brouillage injecté est de 4,5 dB par rapport au bruit de fond. La différence de 1,5 dB entre le niveau de brouillage relatif réel ( $I/N = 4,5$  dB) et le niveau de brouillage relatif injecté ( $I/N = 6$  dB) est due aux incertitudes liées au réglage du niveau

de brouillage injecté et à celles relatives à l'analyse graphique. En particulier, la fonction de régression varie lentement dans la partie utilisée pour évaluer le niveau de brouillage injecté  $I$  et le niveau  $S/N$  pour lequel un biais de 1 dB se produit, ce qui rend donc les résultats particulièrement sensibles à toute variation des conditions de mesure et d'analyse graphique.

Il faut ramener  $S_u$  à la valeur de  $S_m$  pour satisfaire au critère de biais de 1 dB au niveau de sensibilité minimale utilisée du radar. On doit pour cela diminuer  $S_u$  d'une quantité équivalente à :

$$I - (S/N + S_m)$$

On obtient la valeur  $I/N$  équivalente nécessaire pour s'assurer que le biais de 1 dB n'est pas dépassé au niveau de sensibilité minimale.

$S_m$  est inférieur à  $S_u$  d'une quantité égale au rapport  $S/N$  avec brouillage  $(S/N) + 3$  dB. Il faut donc diminuer la valeur de  $S_u$  pour qu'elle atteigne celle de  $S_m$ , ce qui correspond à une diminution de  $10,6 + 3$  dB, soit au total 13,6 dB dans notre cas.

Le niveau de brouillage,  $I$ , doit donc être diminué de 13,6 dB. Son écart par rapport à  $N$  est à présent de 4,5 dB. Ainsi, pour l'exemple considéré, la valeur  $I/N$  équivalente requise est égale à :

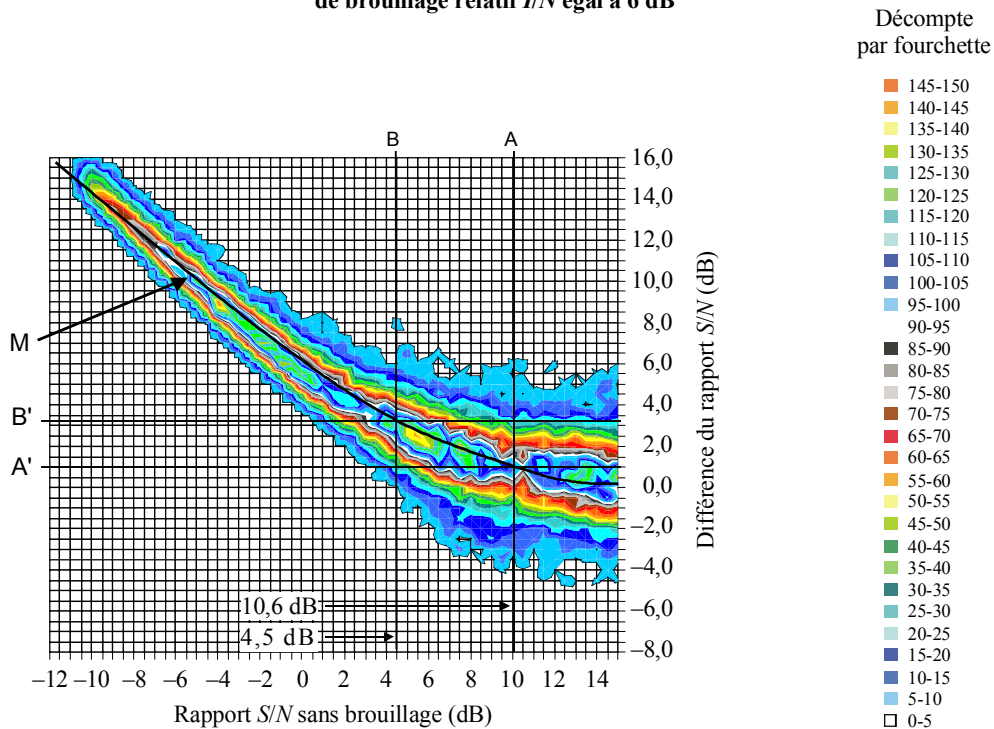
$$I/N \text{ équivalent} = 4,5 - (10,6 + 3) = -9,1 \text{ dB}^*$$

Ces facteurs constituent la base de la technique d'analyse graphique décrite au § 5.3, qui permet de compenser l'incertitude associée au réglage du niveau absolu de brouillage.

### 5.3 Méthode d'analyse de la réflectivité

FIGURE 16

Distribution de fréquence des différences du rapport  $S/N$  classées en fonction du niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage (réflectivité) pour un niveau de brouillage relatif  $I/N$  égal à 6 dB



1464-16

\* La valeur équivalente  $I/N$  pourrait augmenter pour atteindre  $-7,6$  dB si l'on supposait dans les calculs que la valeur correcte de  $I/N$  est de  $+6$  dB au lieu de  $4,5$  dB.

On souhaite déterminer à partir de la Fig. 16 le rapport  $I/N$  conduisant à une différence de 1 dB du rapport  $S/N$  relativement au niveau pour lequel la différence du rapport  $S/N$  est de 3 dB ( $I/S = 0$ ). On peut alors déterminer le rapport de protection  $I/N$  approprié pour le produit réflectivité. On peut obtenir le rapport  $I/S$  grâce aux informations dont on dispose: la valeur moyenne de la régression, le niveau de différence du rapport  $S/N$  pour lequel le rapport  $I/N$  est égal à zéro et le niveau de différence du rapport  $S/N$  correspondant à une différence ou à un biais de 1 dB. La première étape de cette analyse graphique consiste à déterminer la courbe moyenne de la fonction de régression (M sur la Fig. 16).

Dans l'étape suivante, on identifie le point pour lequel  $I/S = 0$  dB, ce qui correspond à une différence du rapport  $S/N$  de 3 dB (droite B' sur la Fig. 16). Les données de réflectivité sont dégradées lorsque la différence du rapport  $S/N$  est de 1 dB (droite A' sur la Fig. 16). L'étape suivante consiste à identifier le point d'intersection entre la courbe moyenne, M, et la différence du rapport  $S/N$  à 3 dB correspondant à une valeur  $I/S$  de 0 dB (B'). On obtient un niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage de 4,5 dB, ce qui correspond au niveau relatif pour lequel le rapport  $I/S$  est égal à 0 dB. On identifie ensuite le point pour lequel la différence du rapport  $S/N$  est égale à 1 dB (segment de droite A'). Le segment A' coupe la courbe moyenne M en un point pour lequel le niveau du rapport  $S/N$  en l'absence de brouillage vaut 10,6 dB. La différence entre les deux points identifiés par l'intersection des segments A et B avec l'axe des x correspond au niveau  $I/S$  conduisant à un biais de 1 dB par rapport à une valeur  $I/S$  de 0 dB. Cette valeur peut être déterminée en relevant simplement la différence entre le point d'intersection du segment A et de l'axe des x et le point d'intersection entre le segment B et l'axe des x. On obtient un rapport  $I/S$  de (4,5 dB – 10,6 dB = –6,1 dB). Il s'agit de la valeur  $I/S$  en dessous du signal minimal détecté, qui présente un rapport  $S/N$  de –3 dB.

$$I/N \text{ équivalent} = (I/S) + (-3 \text{ dB})$$

Les données tirées de cette analyse graphique conduisent au résultat suivant:

$$I/N \text{ équivalent} = -6,1 \text{ dB} + (-3 \text{ dB}) = -9,1 \text{ dB}$$

Il convient de noter qu'en supposant une valeur correcte de  $I/N$  égale à 6 dB au lieu de 4,5 dB, la valeur de  $I/N$  pourrait s'accroître jusqu'à –7,6 dB.

Les résultats obtenus en utilisant cette technique d'analyse pour un type de brouillage unique pour toute la gamme des niveaux de brouillage relatif testés ( $I/N$  variant de +6 à –15 dB) sont détaillés dans le Tableau 9.

TABLEAU 9

Niveau de brouillage relatif testé	Niveau $I/N$ équivalent pour lequel on observe un biais de 1 dB
6	–9,1
3	–9,5
0	–9,5
–3	–10
–6	–7,5
–10	–9
–12	–7,5
–15	–8

La valeur moyenne et l'écart type de ce jeu de données valent:

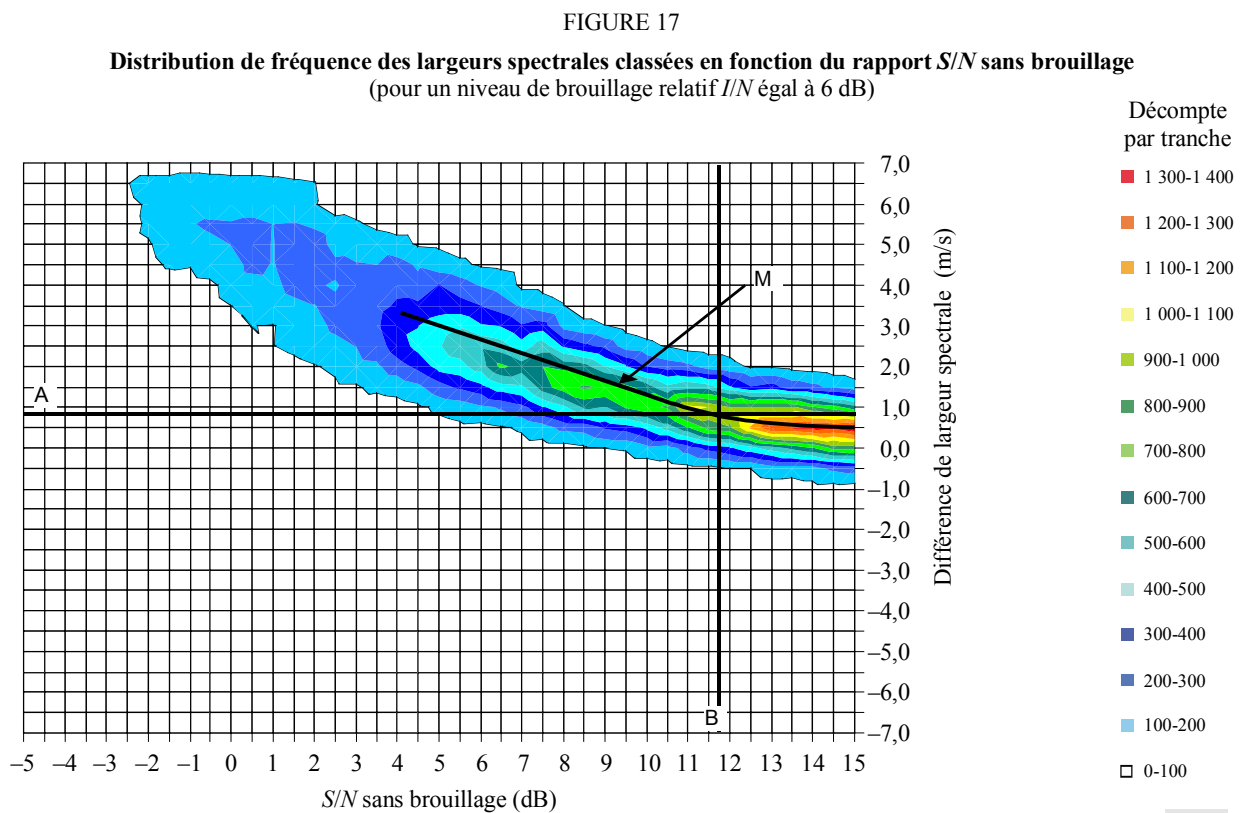
$$\text{Valeur moyenne} = -8,8$$

$$\text{Ecart type} = 0,9$$

Ces résultats sont cohérents vis-à-vis du résultat théorique calculé au § 2.2 et en confirment la validité. Il existe toutefois une incertitude inhérente à ces mesures.

#### 5.4 Méthode d'analyse de la largeur spectrale

Une méthode d'analyse similaire peut être appliquée pour déterminer le niveau pour lequel on observe un biais de 1 m/s de la largeur spectrale. La fonction de régression utilisée pour déterminer graphiquement cette valeur est indiquée sur la Fig. 17 (il s'agit du même jeu de données que celui utilisé pour la Fig. 16).



La méthode appliquée est très similaire à celle utilisée pour déterminer le niveau  $I/N$  pour le produit réflectivité. On sait que le point pour lequel les données de largeur spectrale sont dégradées au-delà des limites acceptables correspond au point pour lequel le biais de l'estimation de la largeur de spectrale est égal à 1 m/s. Cela correspond à une différence de largeur de spectrale de 1 m/s sur la Fig. 17 (segment A). Une fois de plus on détermine une courbe moyenne de la fonction de régression et on identifie le point d'intersection entre le segment A et cette courbe moyenne (segment B). On obtient un niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage égal à 11,75 dB. La valeur réelle du rapport  $I/N$  conduisant à une différence de largeur spectrale dégradant les données de largeur spectrale est donnée par l'équation suivante:

$$I/N (\text{largeur spectrale}) = - ((\text{niveau de rapport } S/N \text{ sans brouillage pour lequel la différence de largeur spectrale est de 1 m/s}) - (\text{niveau relatif pour lequel le rapport } I/S \text{ est égal à 1 dB}) - (\text{facteur de correction du niveau}))$$



Dans cet exemple, le niveau du rapport  $S/N$  sans brouillage pour lequel la différence de largeur spectrale est de 1 m/s peut être calculé à partir de la Fig. 17: il est égal à 11,75 dB.

Le niveau pour lequel le rapport  $I/N$  pour ce jeu de données est égal à 1 peut être obtenu à partir d'une analyse de la réflectivité effectuée à partir de la Fig. 16.  $I/S$  est égal à 1 lorsque la différence du rapport  $S/N$  est égale à 3 dB. Dans cet exemple, le niveau (rapport  $S/N$  sans brouillage) pour lequel la différence du rapport  $S/N$  vaut 3 dB est égal à 4,5 dB.

Compte tenu de ces données, le rapport  $I/N$  requis pour satisfaire à la spécification de largeur de bande est le suivant:

$$I/N \text{ équivalent (largeur spectrale)} = - (11,75 - 4,5) - 3 - 0,5 = -10,75 \quad \text{dB}$$

Il convient de noter qu'en supposant une valeur correcte de  $I/N$  égale à 6 dB au lieu de 4,5 dB, la valeur équivalente de  $I/N$  (largeur spectrale) pourrait s'accroître jusqu'à -9,25 dB.

Les résultats obtenus en utilisant cette technique d'analyse pour un type de brouillage unique pour la gamme des niveaux de brouillage relatif qui n'étaient pas fortement affectés par l'incidence du bruit résiduel ( $I/N$  variant de +6 à -6 dB) sont détaillés dans le Tableau 10.

TABLEAU 10

Niveau de brouillage (dB)	Niveau $I/N$ équivalent pour lequel on observe une différence de 1 m/s (dB)
6	-10,75
3	-10,9
0	-12,3
-3	-9,75
-6	-12,25

La valeur moyenne et l'écart type de ce jeu de données valent:

$$\text{Valeur moyenne} = -11,2$$

$$\text{Ecart type} = 0,97$$

Pour ce radar, le rapport  $I/N$  calculé à partir des données de mesure réelles de la largeur spectrale est cohérent vis-à-vis des résultats des § 2.4 et 5.1. Il existe toutefois une incertitude inhérente à ces mesures.

## 5.5 Récapitulatif des résultats des mesures réelles

L'ensemble des résultats des tests utilisant pour les signaux brouilleurs différents types de techniques de modulation des IMT-2000 sont indiqués dans le Tableau 11. Ces valeurs ont été obtenues en appliquant la technique d'analyse graphique décrite dans les § 5.2, 5.3 et 5.4 avec un niveau de brouillage relatif déterminé par une valeur de  $I/N$  égale à 6 dB.

TABLEAU 11

**Seuils de brouillage mesurés (*I/N*) propres à assurer la protection  
des radars contre les brouillages préjudiciables**

Signal brouilleur	Valeur <i>I/N</i> de la réflectivité	Valeur <i>I/N</i> de la largeur spectrale
Onde entretenue	-7,5	-10,5
AMRC-LB 4,096 Msymbole/s	-9,5	-8,75
AMRC-2000-3X (liaison aller) 3,686 Msymbole/s	-7,0	-10
AMRC-2000-3X (liaison retour) 3,686 Msymbole/s	-9,5	-10,5
EDGE-MDMG 384 ksymbole/s	-8,75	-10,75
EDGE –MDP-8 384 ksymbole/s	-8,75	-9,75
DECT 1,152 Msymbole/s	-9,5	-10
Valeur moyenne	-8,6	-10,04
Ecart type	0,94	0,62

Ces résultats viennent confirmer la validité des valeurs calculées requises pour la protection du produit réflectivité. Il convient de noter que les chiffres du Tableau 11 sont fondées sur une détermination indirecte du niveau *I/N* injecté utilisé pour le test, par comparaison avec la valeur nominale que l'on voulait injecter. Utiliser les valeurs *I/N* nominales voulues plutôt que les valeurs déterminées indirectement pourrait modifier ces dernières.

Comme cela a été noté plus haut, les mesures et l'analyse de la vitesse moyenne ont été difficiles à réaliser; toutefois, étant donné que la vitesse radiale moyenne est la moins sensible au brouillage, les résultats n'affectent pas les niveaux de brouillage globaux que le radar peut tolérer.

Les résultats semblent indiquer que la valeur mesurée du rapport *I/N* requis pour satisfaire au critère de protection du produit largeur spectrale est légèrement inférieure aux valeurs calculées au § 2.4. Comme cela a été examiné plus haut, les limites actuelles en matière d'étalonnage des radars et de processus d'élimination des bruits effectués par le processeur de données de faible niveau limitent la mesure du critère de protection nécessaire pour les mesures de largeur spectrale. Les récepteurs et processeurs radar font actuellement l'objet d'améliorations qui permettront d'atteindre ou de dépasser les critères nominaux prévus à l'origine. Le § 6 traite de ces améliorations avec plus de détails.

## 6 Amélioration des radars

Le système radar qui a été utilisé pour les tests est l'un de ceux qui a fonctionné dans une administration pendant environ 11 ans. Des mises à niveau qui intègrent les progrès réalisés en matière de système de traitement du signal sont en cours. Ces mises à niveau permettront de détecter des signaux à un niveau inférieur de 10 dB au niveau actuel.

Ces améliorations sont rendues nécessaires car il faut:

- améliorer les performances en matière de mesures au-dessus de la couche limite planétaire;
- détecter les précipitations avec des gouttes d'eau de petites dimensions et les brouillards qui peuvent provoquer du givre sur les aéronefs;
- grâce aux mesures à polarisation double, améliorer la surveillance des processus météorologiques évolutifs.

Tous ces impératifs exigent une amélioration de la détection d'environ 10 dB supérieure à ce que l'on peut obtenir avec les radars météorologiques actuels.

Pour répondre à ces impératifs, les performances des radars peuvent être améliorées en augmentant la puissance des émetteurs, en réduisant le bruit de fond des récepteurs ou en augmentant la puissance de calcul de ces radars.

L'augmentation de la puissance des émetteurs n'est pas intéressante sur le plan économique. La réduction du bruit de fond peut être obtenue en augmentant la largeur des impulsions. Cette augmentation de la largeur d'impulsion réduit la largeur de bande nécessaire du filtre accordé réduisant par là même la puissance de bruit dans la partie FI du récepteur. L'augmentation de la largeur d'impulsion d'un facteur 2 augmente le volume échantillon d'un facteur de 3 dB. L'adaptation de la largeur de bande du récepteur se traduit par une baisse de 3 dB du bruit du récepteur. Cela conduit à une amélioration totale de détection de 6 dB. Malheureusement, les limites de conception sur le coefficient d'utilisation du récepteur ne permettent pas une augmentation de la largeur d'impulsion pour les systèmes utilisés dans ces tests. La température de bruit du récepteur peut également être abaissée mais tout ce que l'on peut obtenir, c'est une réduction de 1 à 2 dB. Par conséquent, la façon la plus intéressante d'obtenir ces améliorations serait d'améliorer le traitement du signal.

Pour pouvoir mettre en oeuvre une polarisation double, il faut répartir la puissance du signal d'émission entre des alimentations d'antennes polarisées horizontalement et verticalement, ce qui abaisse de 3 dB la puissance d'émission sur une polarisation. Cette réduction de la puissance émise doit être compensée pour ne pas affecter les performances.

Les réductions de la puissance d'émission pour chaque polarisation associées à des capacités de détection améliorées se traduisent par une exigence minimale de 10 dB environ d'amélioration de la qualité de fonctionnement des radars. L'augmentation de la puissance de traitement des radars avec du matériel mis à niveau permettra la mise en oeuvre d'algorithmes de traitement des données qui, antérieurement, n'étaient pas disponibles. Ce traitement supplémentaire fera appel à l'intégration cohérente et à la détection dans le domaine fréquence. Le radar collecte actuellement tous les paramètres nécessaires pour exécuter ces fonctions, mais la puissance de traitement limitée a empêché sa mise en oeuvre. Les améliorations qu'il est prévu d'apporter lèveront cette limite de puissance de traitement. L'intégration cohérente, telle que mise en oeuvre sur ce radar, a montré une amélioration de 10 dB de la détection. La mise à niveau actuellement en cours permettra d'améliorer les performances d'environ 10 dB. Grâce à la détection dans le domaine fréquence, le spectre est scindé en coefficients discrets, où le nombre réel de coefficients est déterminé par la vitesse de rotation de l'antenne et son mode de fonctionnement. Dans les modes tempête actuels, le nombre d'échantillons est compris entre 41 et 111. Le traitement dans le domaine fréquence (calcul de la densité spectrale) permet de confiner le signal utile dans quelques coefficients spectraux tandis que le bruit est étalé sur tous les coefficients à un niveau bien inférieur.

Les améliorations de la qualité de fonctionnement des radars obtenues par une puissance de traitement plus grande n'abaisseraient pas le bruit de fond réel du récepteur, mais l'effet se traduirait par une réduction du bruit de fond effectif, en permettant de recueillir des signaux utiles à des niveaux bien inférieurs. La différence entre le bruit de fond actuel et le bruit de fond effectif tient à l'amélioration de la détection par traitement.

## 7 Récapitulatif

Les résultats des tests montrent que la protection peut être assurée lorsque le rapport  $I/N$  a une valeur aussi petite que  $-9$  dB pour les données de réflectivité de base, dans les conditions décrites dans les sections précédentes. Bien que, d'après les calculs, la valeur du rapport  $I/N$  pour laquelle la dégradation de la largeur spectrale est supérieure à celle admise dans le cahier des charges (biais  $\geq 1$  m/s) soit encore plus faible ( $-14,4$  dB), les mesures montrent que seule une valeur de  $-10$  dB est tolérée.

Afin d'assurer la protection des paramètres météorologiques les plus sensibles, il convient d'utiliser un rapport  $I/N$  de  $-10$  dB.

---