

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R M.1464-2
(02/2015)

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

Série M

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



Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systemes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

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

Publication électronique
Genève, 2016

© UIT 2016

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R M.1464-2

Caractéristiques des radars de radiolocalisation non météorologiques, et caractéristiques et critères de protection applicables aux études de partage des radars de radionavigation aéronautique et des radars du service de radiorepérage fonctionnant dans la bande de fréquences 2700-2900 MHz

(2000-2003-2015)

Domaine d'application

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

Mots clés

aéronautique, radionavigation, critères de protection, caractéristiques

Abréviations/glossaire

AESA	antenne réseau active à balayage électronique (<i>active electronically scanned array</i>)
AMRT	accès multiple par répartition dans le temps
ATC	contrôle du trafic aérien (<i>air traffic control</i>)
CFAR	taux de fausse alarme constant (<i>constant false alarm rate</i>)
CPI	intervalles de traitement cohérent (<i>coherent processing intervals</i>)
CW	ondes entretenues (<i>continuous wave</i>)
FRI	fréquence de répétition des impulsions
GVT	gain variable dans le temps
MDP-4	modulation par déplacement de phase quadrivalente
MLT	seuil de niveau moyen (<i>mean level threshold</i>)
PESA	antenne réseau passive à balayage électronique (<i>passive electronically scanned array</i>)
pps	impulsions par seconde (<i>pulse per second</i>)
TOP	tubes à ondes progressives

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 dont ont besoin les radars pour remplir leurs fonctions sont optimales dans certaines bandes de fréquences;
- b) que les caractéristiques techniques des radars non météorologiques et des radars de radionavigation aéronautique sont déterminées par les objectifs du système et varient grandement, même à l'intérieur d'une bande de fréquences donnée;
- 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 de fréquences 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;
- 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 de fréquences 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);
- i) que la Recommandation UIT-R M.1849 donne les caractéristiques techniques et opérationnelles des radars de météorologie au sol et peut servir de référence pour les analyses de partage et de compatibilité entre les radars de météorologie au sol et les systèmes d'autres services;
- j) que les radars fonctionnant dans cette bande de fréquences servent à la surveillance des aéroports, 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,

reconnaisant

- 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 de radionavigation aéronautique décrits à l'Annexe 1 soient considérées comme représentatives des systèmes fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz;
- 2** que la Recommandation UIT-R M.1461 serve de référence pour les analyses de 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 décrits dans l'Annexe 2. Ces critères de protection représentent le niveau de protection contre les brouillages cumulatifs dus 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 de radiolocalisation non météorologiques et des radars 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 de fréquences sur une base d'égalité avec les stations du service de radionavigation aéronautique (numéro **5.423** du RR). La bande de fréquences 2 900-3 100 MHz est attribuée aux services de radionavigation et de radiolocalisation à titre primaire. La bande de fréquences 3 100-3 400 MHz est attribuée au service de radiolocalisation à titre primaire.

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 de fréquences 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.

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 de fréquences comprennent l'ATC et l'observation météorologique. On peut supposer que les fréquences d'exploitation de ces radars se répartissent uniformément dans la bande de fréquences 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 de radionavigation aéronautique types fonctionnant dans la bande de fréquences 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 de fréquences 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 de fréquences 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	Unités	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 ⁽¹⁾					
Modulation		P0N		P0N, Q3N	P0N	P0N, Q3N	P0N, Q3N
Puissance de l'émetteur fournie à l'antenne ⁽²⁾	kW	1 400	1 320	25	450	22	70
Largeur d'impulsion	µs	0,6	1,03	1,0; 89 ⁽³⁾	1,0	1,0; 55,0	0,4; 20 0,5; 27 ⁽⁴⁾
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 ⁽³⁾
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:	MHz						
-20 dB		6	5	2,6 (impulsion courte) 5,6 (impulsion longue)			3 (valeur type)
3 dB			0,6	1,9			2
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.)	degrés	En cosécante carrée +30		En cosécante carrée 6 à +30			En cosécante carrée améliorée à +40
Type d'antenne (à réflecteur, à commande de phase, à fentes, etc.)		Réflecteur parabolique					

TABLEAU 1 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Polarisation de l'antenne		Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire ou rectiligne	Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire gauche
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 balayage horizontal de l'antenne	degrés/s	75			90	75	90 60 ⁽⁴⁾
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)		360°					
Vitesse de balayage vertical de l'antenne	degrés/s	Sans objet					
Type de balayage vertical de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, 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 lobes latéraux éloignés)	dBi		+7,3	+9,5 3,5			+7,5 0 à -3
Hauteur de l'antenne	m	8					8-24
Largeur de bande FI du récepteur à 3 dB	MHz	13	0,7	1,1		1,2	4
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	-4	-6	-14			-10
Niveau de saturation du récepteur syntonisé	dBm		-45				
Largeur de bande RF du récepteur à 3 dB	MHz	13	12	345			400 ⁽¹⁾
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 ⁽⁵⁾		Circuit d'amélioration à contre-réaction	⁽⁶⁾				
Distribution géographique		Monde entier					

Caractéristiques	Unités	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Polarisation de l'antenne		Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire ou rectiligne	Verticale ou circulaire gauche	Verticale ou circulaire droite	Circulaire gauche
Gain du faisceau principal de l'antenne	dBi	33,5		34	32,8	34,3 faisceau inférieur 33 faisceau supérieur	33,5
Fraction du temps d'utilisation	%	100					

TABLEAU 1 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar F1	Radar F2
Type de plate-forme (aéroportée, de navire, au sol)		Sol, ATC	Sol, ATC
Plage de syntonisation	MHz	2 700-2 900 ⁽⁷⁾	2 700-2 900 ⁽⁷⁾
Modulation		P0N, Q3N	P0N, Q3N
Puissance d'émission délivrée à l'antenne ⁽²⁾	kW	40	160
Largeur d'impulsion	µs	1,0 (impulsion brève) 60,0 (impulsion longue)	1,0 (impulsion brève) ≤ 250,0 (impulsion longue)
Temps de montée/de descente des impulsions	µs	0,2 (impulsion brève) 3 (impulsion longue)	0,2 (impulsion brève) 3 (impulsion longue)
FRI	pps	320-6 100 (impulsion brève) 320-1 300 (impulsion longue) (8)	320-4 300 (impulsion brève) 320-1 500 (impulsion longue) (8)
Coefficient d'utilisation	%	0,2 ⁽⁹⁾ -0,6 (impulsion brève) ≤ 12,0 ⁽¹⁰⁾ (impulsion longue)	0,2 ⁽⁹⁾ -0,4 (impulsion brève) ≤ 12,0 ⁽¹⁰⁾ (impulsion longue)
Largeur de bande de modulation	MHz	3	3
Largeur de sous-impulsion codée en phase		Sans objet	Sans objet
Rapport de compression		180	≤ 750
Largeur de bande d'émission RF: -20 dB -3 dB	MHz	3,2 (impulsion brève) / 5,0 (impulsion longue) 0,6 (impulsion brève) / 1,2 (impulsion longue) (11)	3,2 (impulsion brève) / 5,0 (impulsion longue) 0,6 (impulsion brève) / 1,2 (impulsion longue) (11)
Dispositif de sortie		Semi-conducteur	Semi-conducteur
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Faisceau-crayon couvrant jusqu'à 70 000 pieds	Faisceau-crayon couvrant jusqu'à 100 000 pieds
Type d'antenne (à réflecteur, à commande de phase, à fentes, etc.)		Commande de phase, 4 panneaux (de 4 mètres de diamètre chacun)	Commande de phase, 4 panneaux (de 8 mètres de diamètre chacun)
Polarisation de l'antenne		Rectiligne horizontale et verticale; circulaire	Rectiligne horizontale et verticale; circulaire
Gain du faisceau principal de l'antenne	dBi	41	46
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne	degrés	1,6-2,7	0,9-1,5

TABLEAU 1 (*fin*)

Ouverture angulaire en azimut du faisceau de l'antenne	degrés	1,6-2,7	0,9-1,4
Vitesse de balayage horizontal de l'antenne	degrés/s	Sans objet	Sans objet
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)		Irrégulier pour couvrir 360°	Irrégulier pour couvrir 360°
Vitesse de balayage vertical de l'antenne	degrés/s	Sans objet	Sans objet
Type de balayage vertical de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)		Irrégulier pour couvrir le volume requis	Irrégulier pour couvrir le volume requis
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux éloignés)	dB	17 en émission, 25 en réception	17 en émission, 25 en réception
Hauteur de l'antenne	m	Variable	Variable
Largeur de bande FI du récepteur à 3 dB	MHz	1,2 à -6 dB (impulsion brève) 1,8 à -6 dB (impulsion longue)	1,2 à -6 dB (impulsion brève) 1,6 à -6 dB (impulsion longue)
Facteur de bruit du récepteur	dB	< 6	< 6
Signal minimum perceptible	dBm/MHz	-110	-110
Point de compression à 1 dB des étages d'entrée du récepteur	dBm	10	10
Niveau de saturation du récepteur syntonisé	dBm	Non communiqué	Non communiqué
Largeur de bande RF du récepteur à 3 dB	MHz	200	300
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et IF du récepteur		< 500 ns, 13 dBm	< 500 ns, 13 dBm
Largeur de bande de filtrage Doppler	Hz		
Fraction du temps d'utilisation	%	100	100

- (1) Certains fonctionnent dans la bande de fréquences 2 700-3 100 MHz. Beaucoup de ces systèmes ont besoin de plus d'une fréquence porteuse dans la gamme de syntonisation pour fonctionner correctement.
- (2) Les systèmes fixes présentent une puissance pouvant atteindre 750 kW ou 1 MW.
- (3) Ce radar utilise deux porteuses fondamentales avec un espacement d'au moins 30 MHz.
- (4) Dépend de la portée.
- (5) 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), rejet des impulsions asynchrones, suppression des impulsions saturées.
- (6) Les caractéristiques suivantes sont présentes dans certains systèmes radar: FRI sélectionnables, filtrage Doppler.
- (7) La plage de syntonisation est 2,7-3,0 GHz lorsqu'on remplace un radar météorologique par un système polyvalent assurant à la fois les fonctions de radar de radionavigation aéronautique et de radar météorologique. Les caractéristiques et les critères de protection des radars météorologiques se trouvent dans la Recommandation UIT-R M.1849.
- (8) Les FRI très élevées ne sont utilisées que pour des angles d'élévation élevés.
- (9) Le coefficient d'utilisation pour les impulsions brèves est de 0,2% lors d'un balayage avec l'angle d'élévation le plus faible (horizon).
- (10) La largeur d'impulsion et la FRI seront adaptées afin que le coefficient d'utilisation reste en dessous de 12%.
- (11) Largeurs de bande d'émission RF à -6/-40 dB: 1,3/10,4 MHz pour les impulsions brèves; 2,0/6,2 MHz pour les impulsions longues.

TABLEAU 2

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

Caractéristiques	Unités	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
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	Navire, sol
Plage de syntonisation	MHz	2 700-3 400	2 700-3 100	2 700 à 3 100 2 900 à 3 400	Totalité de la bande de fréquences jusqu'à 25% de la largeur de bande	2 700-3 400
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	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	P0N, Q3N
Puissance de l'émetteur fournie à l'antenne	kW	60 (valeur type)	60 à 200	1 000 (valeur type)	30 à 100	60 à 1 000
Largeur d'impulsion	µs	0,4 ⁽¹⁾ à 40	0,1 ⁽¹⁾ à 200	> 100	Jusqu'à 2	0,1 à 1 000
Temps de montée/de descente des impulsions	µs	10 à 30 (valeur type)	10 à 30 (valeur type)	Non communiqué	Non communiqué	> 50 0,05-1,00 ⁽⁶⁾
FRI		550 à 1 100 Hz	300 Hz à 10 kHz	< 300 Hz	Jusqu'à 20 kHz	300 Hz à 10 kHz
Coefficient d'utilisation	%	2,5 maximum	10 maximum	Jusqu'à 3	30 maximum	20 maximum
Largeur de bande de modulation	MHz	2,5	Jusqu'à 10	> 100	Dépend de la modulation	Jusqu'à 20

TABLEAU 2 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
Rapport de compression		Jusqu'à 100	Jusqu'à 300	Sans objet	Non communiqué	Jusqu'à 20 000
Largeur de bande d'émission RF: -20 dB -3 dB	MHz	3,5 2,5	15 10	> 100	Non communiqué	25
Dispositif de sortie		TOP	TOP ou semi-conducteur	Klystron ACC	Eléments actifs	Semi-conducteur
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		En cosécante carrée	Faisceau-crayon 3D ou cosécante carrée 2D	Faisceau étroit à balayage	Faisceau-crayon	Faisceau-crayon 3D ou cosécante carrée 2D
Type d'antenne (à réflecteur, à commande de phase, à fentes, etc.)		Réflecteur conformé	Réseau plan ou réflecteur conformé	Réseau plan avec balayage de fréquence ou réflecteur	Réseau actif	Réseau actif
Ouverture du faisceau en azimut	degrés	1,5	1,1 à 2	En général 1,2	Dépend du nombre d'éléments	Dépend du nombre d'éléments En général entre 1,1 et 5
Polarisation de l'antenne		Rectiligne ou circulaire ou commutée	Rectiligne ou circulaire ou commutée	Rectiligne ou circulaire fixe	Rectiligne fixe	Mixte
Gain du faisceau principal de l'antenne	dBi	33,5 (valeur type)	Jusqu'à 40	> 40	Jusqu'à 43	Jusqu'à 40
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne	degrés	4,8	1,5 à 30	Valeur type 1	Dépend du nombre d'éléments	Dépend du nombre d'éléments En général entre 1 et 30
Vitesse de balayage horizontal de l'antenne	degrés/s	45 à 90	30 à 180	Valeur type 36	Balayage sectorielle balayage par rotation instantanée jusqu'à 360	30 à 360
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	Continu 360	Continu 360 + balayage sectoriel	Continu 360 + balayage sectoriel actif	Balayage sectoriel aléatoire, balayage sectoriel + rotation	Continu 360 + balayage sectoriel + Balayage sectoriel aléatoire
Vitesse de balayage verticale de l'antenne	degrés/s	Sans objet	Instantanée	Instantanée	Instantanée	Instantanée
Type de balayage vertical de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	Sans objet	0 à 45	0 à 30	0 à 90	0 à 90
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux éloignés)	dB dBi	26 35	> 32 valeur type < -10	> 26 valeur type < 0	Non communiqué	> 32 valeur type < -10
Hauteur de l'antenne au-dessus du sol	m	4 à 30	4 à 20	5	4 à 20	4 à 50

TABLEAU 2 (*fin*)

Caractéristiques	Unités	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
Largeur de bande FI du récepteur à 3 dB	MHz	1,5 impulsion longue 3,5 impulsion brève	10	Non communiqué	Non communiqué	10-30
Facteur de bruit du récepteur ⁽²⁾	dB	2,0 maximum	1,5 maximum	Non communiqué	Non communiqué	1,5 maximum
Signal minimum perceptible	dBm	-123 impulsion longue -104 impulsion brève	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Point de compression à 1 dB des étages d'entrée du récepteur Densité de puissance au niveau de l'antenne	W/m ²	$1,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-3}	5×10^{-5}
Niveau de saturation du récepteur syntonisé. Densité de puissance au niveau de l'antenne	W/m ²	$4,0 \times 10^{-10}$	1×10^{-10}	Non communiqué	Non communiqué	1×10^{-10}
Largeur de bande RF du récepteur à 3 dB	MHz	400	400	150 à 500	Jusqu'à la totalité de la bande de fréquences	400
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et IF du récepteur		Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Largeur de bande de filtrage Doppler		Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué
Caractéristiques d'affaiblissement du brouillage ⁽³⁾		⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ et ⁽⁵⁾	⁽⁴⁾ et ⁽⁵⁾	Synthèse de faisceau adaptative ⁽⁴⁾ et ⁽⁵⁾	Non communiqué
Distribution géographique		Monde entier site fixe transportable	Monde entier site fixe naval transportable	Monde entier site fixe transportable	Monde entier site fixe naval transportable	Zones littorales ou au large des côtes Monde entier site fixe transportable
Fraction du temps d'utilisation	%	100	Dépend de la mission	Dépend de la mission	Dépend de la mission	100

⁽¹⁾ Impulsion non comprimée.

⁽²⁾ Inclut les pertes dans la ligne d'alimentation.

⁽³⁾ Les caractéristiques suivantes sont présentes dans la plupart des systèmes radar et font partie de leurs fonctions normales: GVT, CFAR, rejet des impulsions asynchrones, suppression des impulsions saturées.

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

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

⁽⁶⁾ Ce temps de montée/de descente correspond à des impulsions brèves ayant une largeur comprise entre 0,1 μ s et 100 μ s.

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 le renforcement et l'identification des cibles utiles permettent également de supprimer le brouillage à faible coefficient d'utilisation (moins de 5%), asynchrone par rapport au signal utile.

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 des signaux brouilleurs.

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 brouilleurs faibles 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.

2.3 Antennes

Des antennes de type réflecteur parabolique sont utilisées sur les radars fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz. Les radars d'ATC possèdent une antenne à faisceau en cosécante carrée ou à faisceau-crayon, ou les deux. Etant donné que les radars fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 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.

Deux principaux types de systèmes d'antennes à commande de phase sont utilisés pour des applications terrestres et maritimes. Il s'agit des antennes réseau passives à balayage électronique (PESA) et des antennes réseau actives à balayage électronique (AESA). Les antennes PESA utilisent des émetteurs à forte puissance pour générer les signaux émis, qui sont transmis ou réfléchis par l'antenne réseau PESA. Lors de cette émission ou de cette réflexion, les faisceaux sont formés et orientés de façon à répondre aux besoins opérationnels pour chaque émission.

Les temps d'exposition des faisceaux sont typiquement de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millisecondes. Une antenne AESA comprend un grand nombre d'émetteurs à puissance de crête plus faible au niveau de chacun de ses éléments rayonnants. Elle utilise des dispositifs à semi-conducteurs, chacun présentant un niveau de puissance pouvant généralement aller de quelques watts à plusieurs centaines de watts. Au total, les niveaux de puissance rayonnée obtenus sont élevés, chaque élément contribuant de façon cohérente à la formation des faisceaux. La plupart des antennes réseau à balayage électronique (ESA) présentent des ouvertures allant de moins d'un mètre carré à 20 mètres carrés. Les antennes sur site fixe ont tendance à être plus grandes. La plupart des antennes

ESA utilisent un système d'orientation électronique à la fois en azimut et en élévation. Une sous-catégorie d'antennes ESA utilise un système de balayage mécanique dans le plan de l'azimut et électronique en élévation. Ce type de systèmes est très répandu pour les applications maritimes et terrestres.

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.

Les systèmes qui utilisent la compression d'impulsion ont une largeur de bande FI adaptée à l'impulsion comprimée et agisse comme un filtre adapté afin que la dégradation du rapport S/N soit minimale. Les filtres de compression d'impulsions peuvent être partiellement adaptés et ainsi accroître les effets du brouillage de type bruit. En pareil cas, des études plus approfondies ou des mesures de compatibilité peuvent être nécessaires afin d'évaluer l'impact opérationnel du brouillage sur les performances du radar.

4 Caractéristiques d'exploitation

4.1 Radars de radionavigation aéronautique

Dans le monde entier, les radars de surveillance d'aéroport fonctionnent dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz. Le Tableau 1 décrit huit types représentatifs de radars d'ATC, notés de A à F, F1 et F2. 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 à F, F1 et F2 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. Les radars F1 et F2 sont des radars météorologiques et de surveillance d'aéroport. Ils sont conçus pour être conformes aux spécifications en matière de surveillance aéronautique afin d'atténuer le fouillis radar causé par des éoliennes, d'assurer une surveillance des systèmes d'aéronef sans pilote et de fournir de meilleurs produits météorologiques pour l'aviation.

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 de fréquences 2 700-2 900 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 dans la bande de fréquences 2 700-2 900 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 radiodiffusion en extérieur/reportages électroniques d'actualités dans la bande de fréquences 2 700-2 900 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 1/16^{ème} de mille marin (116 m environ) et l'azimut en 256 intervalles de 1,4° environ, il y a donc au total 249 088 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.

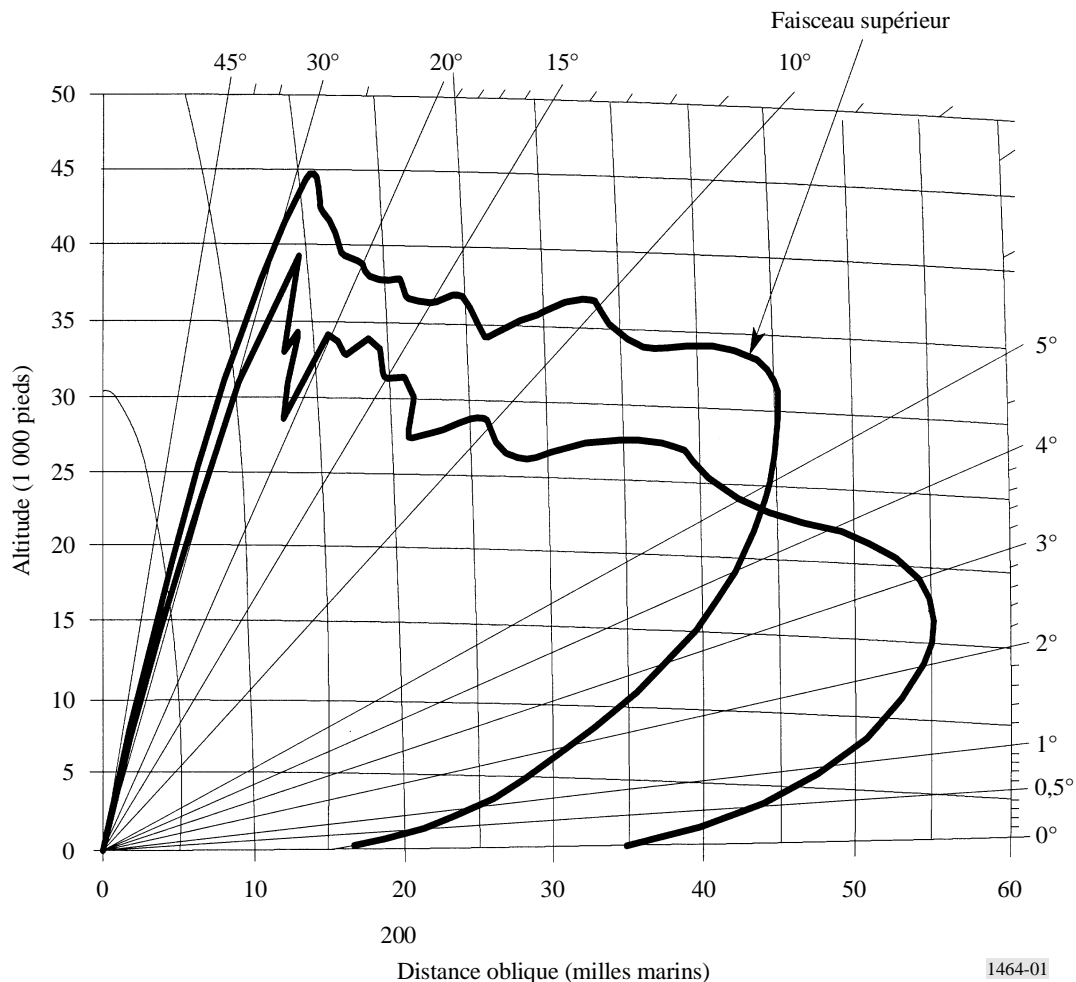
2.3 Caractéristiques de traitement du signal du radar B

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'antennes 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 m² 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 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

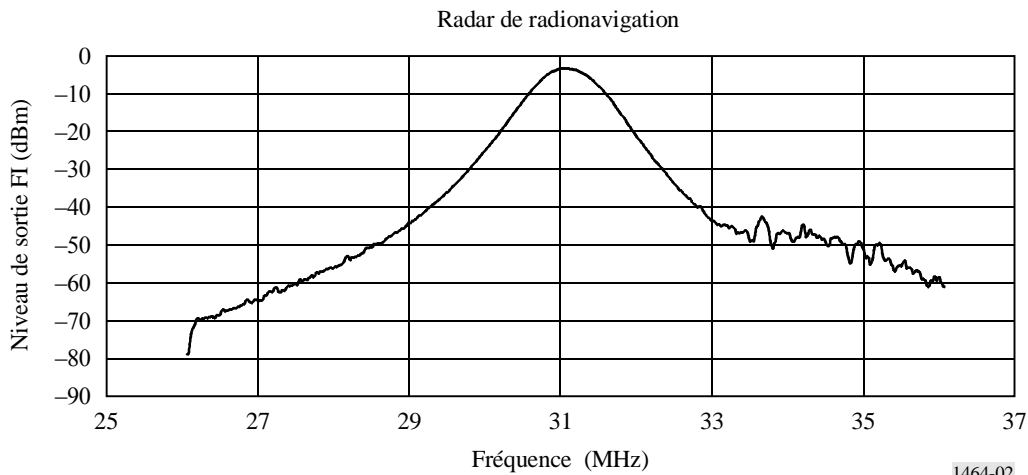
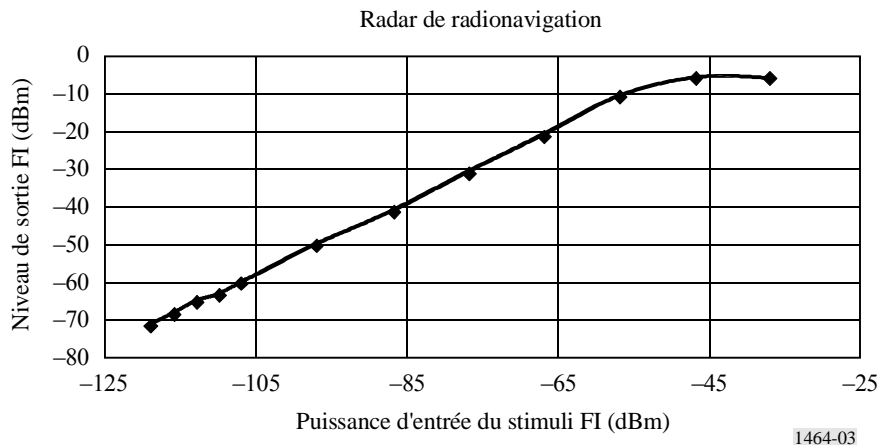


FIGURE 3

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°) entre eux. Comme les réponses des détecteurs de phase I et Q sont des fonctions sinusoïdales et cosinusoidales, 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 Taux de fausse alarme constant

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.

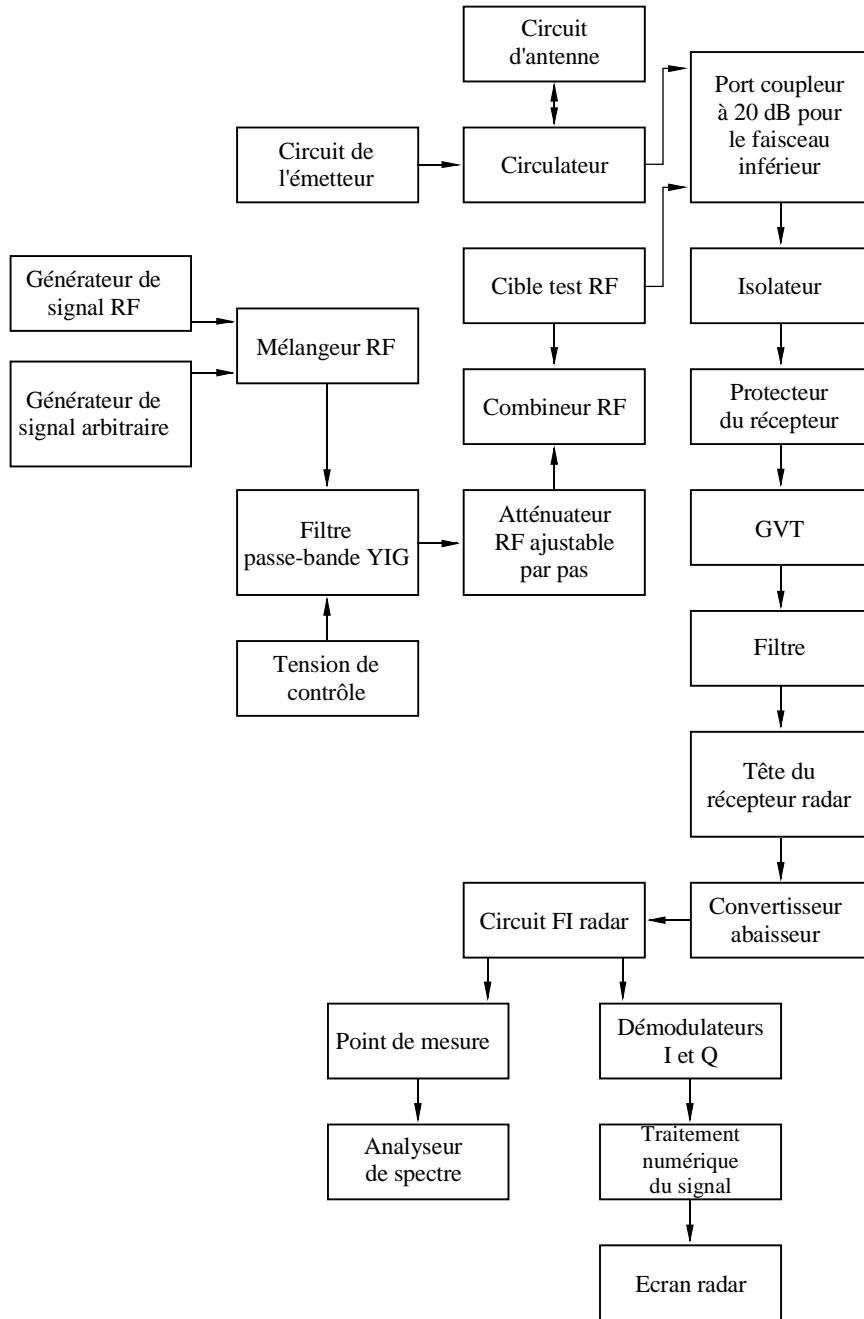
Le bruit aléatoire dépassera parfois le seuil MLT et le détecteur indiquera faussement la présence d'une cible. La probabilité de fausse alarme sera d'autant plus faible que le seuil de détection par rapport au niveau moyen de l'énergie de bruit sera grand et inversement. Si le seuil de détection est 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 de fréquences 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 μ 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 3.

TABLEAU 3
Réglage des commandes du radar

Paramètre	Réglage
GVT	Désactivé
Rejet 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 m^2 à 55 milles marins avec une probabilité de fausse alarme, P_{fa} de 1×10^{-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 de fréquences 2 700-2 900 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 balayages pour fixer la P_d de base. En raison du traitement CFAR, il fallait au radar huit à dix balayages 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 balayages aient eu lieu après activation des brouillages. Après 20 balayages en présence de brouillages et comptage des cibles, les brouillages étaient désactivés et dix autres balayages étaient exécutés avant de tester le niveau I/N suivant. Le fait d'attendre dix balayages 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.

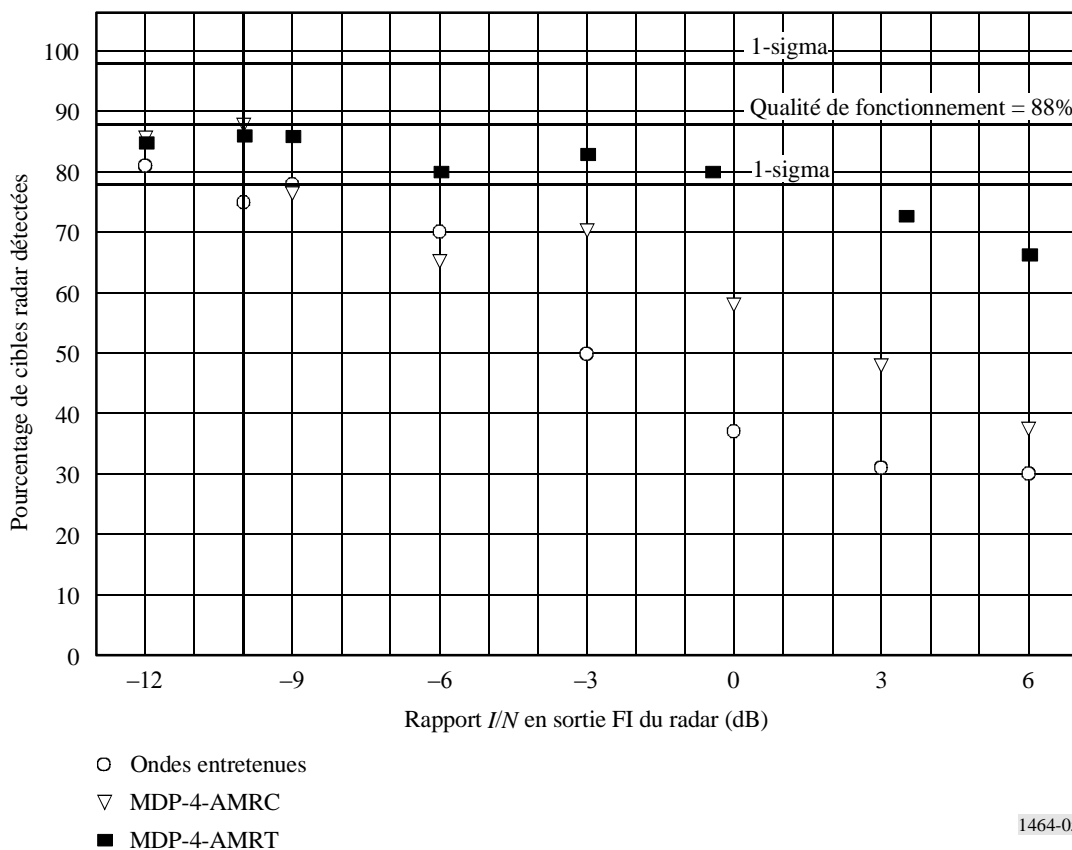
Pour les essais de base (pas de brouillage injecté dans le radar), le radar présentait une valeur moyenne de 8,8 cibles observées par rotation, sur les dix cibles simulées par rotation. On a observé vingt rotations par test. La P_d réelle de base de détection d'une cible était alors de $175/200$, soit 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



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 avions 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).

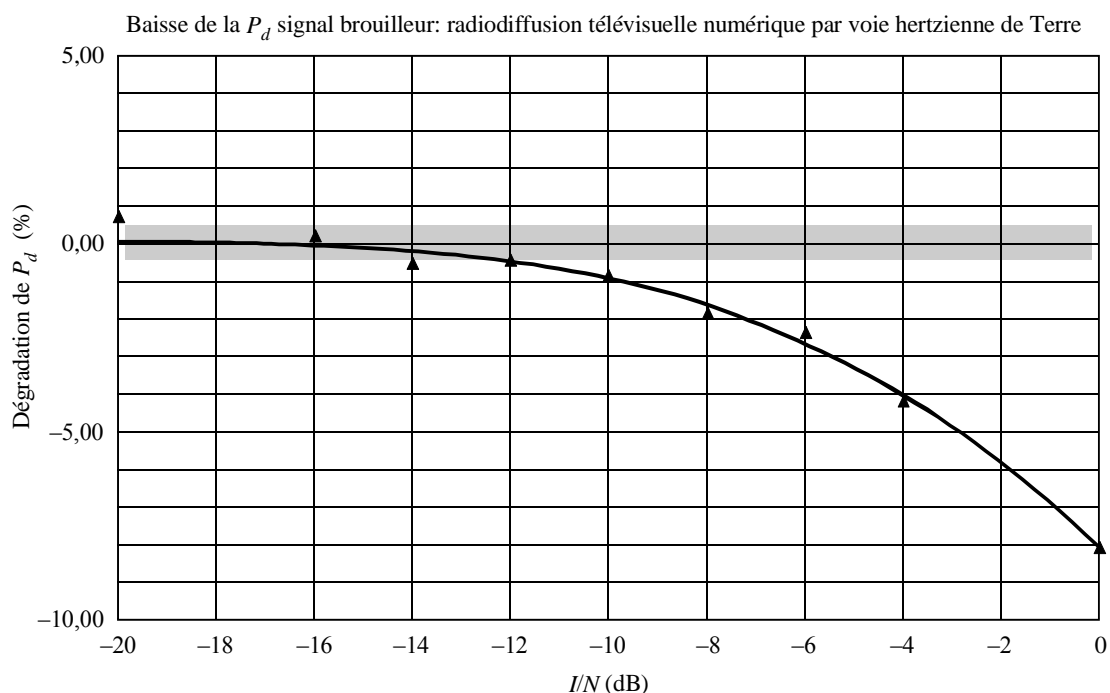
Il convient de mentionner que bien qu'il s'agisse d'un scénario où la dégradation de la qualité de fonctionnement est naturellement plus forte que celle que l'on constate au voisinage du radar, il existe d'autres circonstances où les effets peuvent être encore plus graves:

- 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

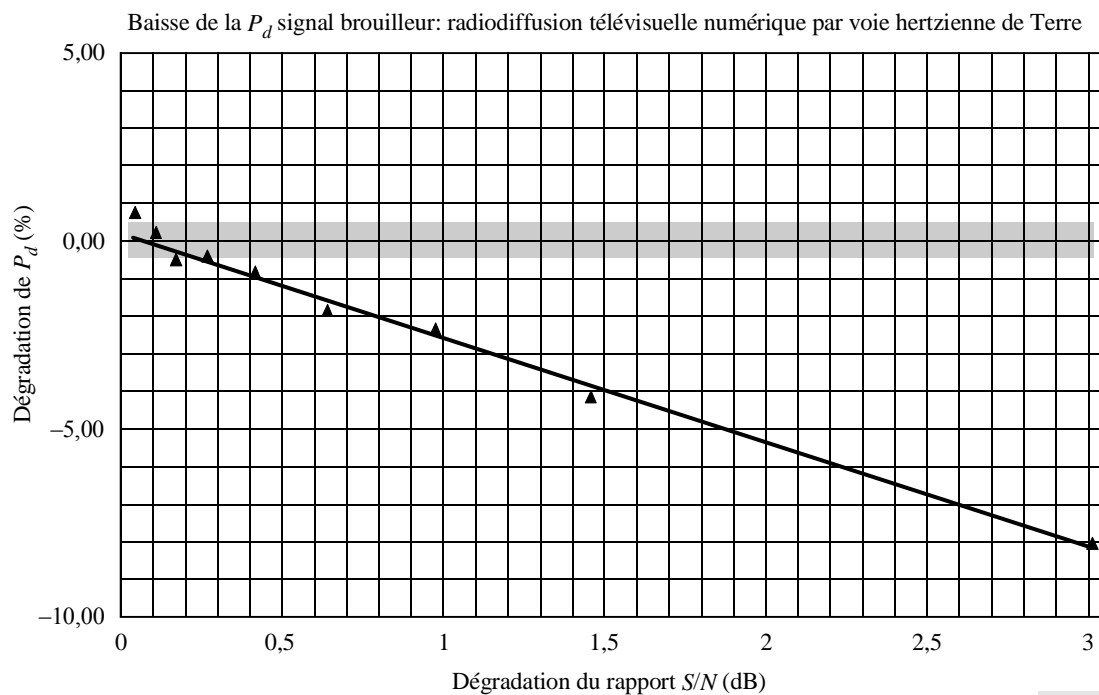


Pour une valeur du rapport $I/N = -6$ dB, il y a déjà une dégradation de 2,5% de la probabilité de détection et, à -10 dB, cette dégradation est de 0,8%, ce qui se trouve encore en dehors de la marge d'erreur. La courbe d'interpolation montre que la baisse de P_d commence à environ -14 dB et devient 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



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 de fréquences 2 700-2 900 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 de fréquences 2 700-2 900 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.