

RAPPORT UIT-R M.2050

Résultats d'essais illustrant la vulnérabilité des radars de radionavigation maritime aux émissions des systèmes de communication et des systèmes à impulsions numériques fonctionnant dans les bandes 2 900-3 100 et 9 200-9 500 MHz

(2004)

1 Introduction

Des essais ont été réalisés pour évaluer l'incidence que les émissions de systèmes de communication numériques ont sur trois radars de radionavigation maritime exploités avec une attribution primaire dans la bande 2 900-3 100 MHz et sur deux radars exploités avec une attribution primaire dans la bande 9 200-9 500 MHz. Il s'agissait de radars classés selon la Convention SOLAS¹ de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) dans la catégorie des radars de radionavigation devant respecter certaines prescriptions obligatoires en matière de transport. Les caractéristiques techniques de ces radars – vitesse de balayage, largeur des impulsions, fréquence de répétition des impulsions (FRI), largeur de bande FI, facteur de bruit et ouverture de faisceau d'antenne sont celles définies dans la Recommandation UIT-R M.1313. Ces radars sont représentatifs des types de radar actuellement utilisés par les garde-côtes américains, ainsi que pour les transports maritimes commerciaux ou pour la navigation de plaisance. Dans le présent Rapport les radars fonctionnant dans la bande 2 900-3 100 MHz sont les radars A, B et C et ceux fonctionnant dans la bande 9 200-9 500 MHz sont les radars D et E.

Les radars visés dans la Recommandation UIT-R M.1313 utilisent généralement les techniques de limitation des brouillages et les méthodes de traitement définies dans la Recommandation UIT-R M.1372 pour pouvoir fonctionner en présence d'autres radars de radiolocalisation ou de radionavigation. Ces techniques sont très efficaces pour réduire, voire éliminer les brouillages par impulsions asynchrones à faible rapport cyclique entre radars. Tous les radars qui ont été testés étaient équipés d'un système de rejet des brouillages ou d'un logiciel de traitement, qui était activé par défaut. Les critères de protection applicables aux radars fonctionnant dans le service de radiopérage sont indiqués dans la Recommandation UIT-R M.1461.

Le but de ces essais était de voir dans quelle mesure le circuit ou le logiciel de suppression des brouillages de chacun de ces radars était efficace pour réduire ou éliminer les brouillages causés par un système de communication à modulation numérique. Des essais supplémentaires ont été faits en prenant comme source de brouillage des émissions d'impulsions à faible rapport cyclique.

Les essais ont été réalisés avec le concours de constructeurs de radars et de navigateurs expérimentés. Leur aide a été précieuse pour l'installation et le fonctionnement des radars.

Dans le cadre de ces essais des cibles non fluctuantes ont été injectées dans les récepteurs des radars.

Le présent Rapport rend compte des résultats obtenus à ce jour.

¹ Convention internationale pour la sauvegarde de la vie en mer.

2 Objectifs

Les objectifs des essais étaient les suivants:

- mesurer la capacité du système de rejet des brouillages de chacun des cinq radars de radionavigation maritime, de limiter les émissions brouilleuses rayonnées par systèmes de communication numériques, en fonction de leur niveau de puissance;
- élaborer des critères de protection (rapport I/N) qui permettraient de limiter les brouillages que les systèmes de communications numériques causent aux radars de radionavigation maritime;
- observer et mesurer dans quelle mesure les techniques de rejet des brouillages de chacun des cinq radars de radionavigation maritime permettent de réduire le nombre de fausses cibles, de stries radiales (hachures) et le bruit de fond ou «speckle».

3 Radars soumis à l'essai

3.1 Radar A

Le Radar A de radionavigation maritime, mis en place aux environs de l'an 2000 et toujours en cours de perfectionnement, est conçu pour des applications commerciales. C'est un radar classé dans les catégories de l'OMI qui fonctionne dans la bande 2 900-3 100 MHz. Les valeurs nominales des principaux paramètres de ce radar sont reprises de documents d'homologation de nature réglementaire, de brochures commerciales et de manuels techniques. Ils sont présentés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Paramètres du récepteur et de l'émetteur du radar A

Paramètre	Valeur			
Fréquence (MHz)	3 050 ±30			
Puissance des impulsions (kW)	30			
Portée (milles nautiques) (km)	0,375-1,5 0,7-2,8	3-6 5,6-11,1	12 22,2	24-96 44,5-177,8
Largeur des impulsions (µs)	0,08	0,30	0,60	1,2
Fréquence de répétition des impulsions (Hz)	2 200		1 028	600
Largeur de bande FI (MHz)	28	3	3	3
Rejet des signaux brouilleurs (dB)	60			
Facteur de bruit du système (dB)	4			
Largeur de bande RF (MHz)	Inconnue			
Cadence de balayage de l'antenne (rpm)	26			
Durée de balayage de l'antenne (s)	2,31			
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan horizontal (degrés)	1,9			
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan vertical (degrés)	22			
Polarisation	Horizontale			

Le radar utilise un amplificateur/détecteur FI logarithmique à plusieurs étages. Ce type de récepteur est couramment utilisé dans les radars de radionavigation maritime étant donné que ces radars doivent détecter des cibles qui réfléchissent des signaux en retour de très forte ou de très faible intensité. L'utilisation d'un amplificateur logarithmique permet d'élargir la gamme des signaux réfléchis que le récepteur radar peut traiter sans pour autant être saturé.

La valeur mesurée du facteur de bruit du radar est de 5,3 dB, chiffre qui concorde bien avec la valeur nominale de 4 dB. La largeur de bande FI à 3 dB est d'environ 3 MHz pour l'échelle des portées utilisée pour les essais. Sur la base de ces paramètres, on a calculé que la puissance de bruit du récepteur radar est d'environ -104 dBm.

Le Radar A est doté de fonctions de traitement du signal et de suivi des cibles évoluées, notamment une fonction taux de fausse alarme constant (CFAR, *constant-false-alarm-rate*) et une fonction de corrélation de balayage à balayage. La fonction locale CFAR (active pendant une petite fraction d'un balayage), fonction statistiquement ordonnée, permet d'atténuer ou d'éviter l'effet de désensibilisation des impulsions brouilleuses. Un nombre, que l'on peut choisir, d'échantillons de signaux de fond qui, sinon seraient utilisés pour établir le seuil de détection, est écarté. Sont écartés les signaux ayant la plus forte amplitude. Plus le nombre d'échantillons écartés contenant des impulsions brouilleuses de forte amplitude est grand, plus faible sera leur influence sur la sensibilité de détections de cibles valables.

Le Radar B peut lui aussi opérer une corrélation de balayage à balayage, moyen supplémentaire de faire la différence entre les signaux systématiquement présents, par exemple une cible valable, et les signaux aléatoires, par exemple des impulsions brouilleuses asynchrones.

3.2 Radars B et D

Les Radars B et D sont des radars classés par l'OMI dans la catégorie des radars de radionavigation maritime. Construits par le même fabricant et conçus pour des applications commerciales, le Radar B fonctionne dans la bande 2 900-3 100 MHz et le Radar D dans la bande 9 200-9 500 MHz. L'émetteur/récepteur des Radars B et D est situé sous le pont et utilise un guide d'onde pour envoyer des signaux ou recevoir les signaux en provenance de l'antenne. Les antennes et les têtes radiofréquence sont différentes mais l'écran de visualisation ainsi que certains éléments du récepteur – système de rejet des brouillages et circuit FI – sont les mêmes. Ces radars utilisent un amplificateur FI logarithmique à plusieurs étages et un détecteur vidéo distinct. Dans le cas des Radars B et D il est possible de faire varier la FRI émise pour éviter les échos de seconde récurrence et aussi pour réduire les brouillages causés par d'autres émetteurs situés à proximité. Cette fonction est intégrée automatiquement dans l'émetteur-récepteur et la variation par rapport à la valeur nominale peut aller jusqu'à $\pm 25 \mu\text{s}$.

Les valeurs nominales des principaux paramètres de ces radars sont reprises de documents d'homologation de nature réglementaire, de brochures commerciales ou de manuels techniques. Elles sont données dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Paramètres des émetteurs et des récepteurs des Radars B et D

Paramètre	Valeur			
Fréquence (MHz)	3 050 ±10		9 410 ±30	
Puissance des impulsions (kW)	30			
Portée (milles nautiques)	0,125-1,5	3-24	48	96
Largeur des impulsions (µs)	0,070	0,175	0,85	1,0
FRI (Hz)	3 100	1 550	775	390
Largeur de bande FI (MHz)	22	22	6	6
Rejet des signaux brouilleurs (dB)	Inconnue			
Facteur de bruit du système (dB)	5,5			
Largeur de bande RF (MHz)	Inconnue			
Cadence de balayage de l'antenne (rpm)	24/48			
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan horizontal (degrés)	2,8		1,2	
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan vertical (degrés)	28		25	
Polarisation	Horizontale			

Les valeurs de la largeur des impulsions et de la FRI dans le Tableau 2 sont les valeurs par défaut pour la portée considérée. L'opérateur peut, pour certaines portées, choisir d'autres largeurs d'impulsion et d'autres FRI, inférieures ou supérieures aux valeurs par défaut.

Les Radars B et D utilisent des corrélateurs d'impulsion à impulsion et de balayage à balayage pour limiter les brouillages qui peuvent être occasionnés par d'autres radars fonctionnant à proximité. Dans le cas d'un corrélateur d'impulsion à impulsion, on compare les signaux réfléchis, impulsion par impulsion, pour réduire les brouillages. Un signal n'est affiché que s'il est présent sur deux impulsions consécutives. Cette fonction de rejet des brouillages est très efficace si l'émetteur-récepteur a été réglé de façon à pouvoir faire fluctuer la FRI. Dans le cas d'un corrélateur de balayage à balayage, une cible n'est affichée que si elle est présente pendant deux balayages consécutifs. Ces radars n'ont pas de fonction de traitement CFAR. On trouvera dans la Recommandation UIT-R M.1372 un examen complet des techniques de limitation des brouillages utilisées par ces radars.

3.3 Radars C et E

Les Radars C et E sont des radars classés par l'OMI dans la catégorie des radars de radionavigation maritime. Construits par le même constructeur et conçus pour des applications commerciales, le Radar C fonctionne dans la bande 2 900-3 100 MHz et le Radar E dans la bande 9 200-9 500 MHz. Les Radars C et E sont conçus pour être fixés au sommet du mât. Le récepteur/émetteur est logé dans un coffret métallique situé directement au-dessous de l'antenne rotative. Le signal vidéo provenant de l'unité récepteur/émetteur est envoyé via des câbles sur l'écran radar panoramique situé au-dessous du pont. Les antennes et les têtes radiofréquence sont différentes mais l'écran de visualisation ainsi que certains éléments du récepteur – circuit FI, système de rejet des brouillages – sont les mêmes. Ces deux radars utilisent un amplificateur/détecteur FI logarithmique par approximations successives à huit étages.

Les valeurs nominales des principaux paramètres de ces radars sont reprises de documents d'homologation de nature réglementaire, de brochures commerciales ou de manuels techniques. Elles sont données dans le Tableau 3.

TABLEAU 3
Paramètres des émetteurs et des récepteurs des Radars C et E

Paramètre	Valeur		
Fréquence (MHz)	3 050 ±10	9 410 ±30	
Puissance des impulsions (kW)	30		
Portée (milles nautiques)	0,125-3	6-24	48-96
Largeur des impulsions (µs)	0,050	0,25	0,80
FRI (Hz)	1 800		785
Largeur de bande FI (MHz)	20	20	3
Rejet des signaux brouilleurs (dB)	Inconnue		
Facteur de bruit du système (dB)	4		
Largeur de bande RF (MHz)	Inconnue		
Cadence de balayage de l'antenne (rpm)	25/48		
Durée de balayage de l'antenne (s)	2,31		
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan horizontal (degrés)	2,0		
Ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan vertical (degrés)	30		
Polarisation	Horizontale		

Les valeurs de la largeur des impulsions et de la FRI dans le Tableau 3 sont les valeurs par défaut pour la portée considérée. L'opérateur peut, pour certaines portées, choisir d'autres largeurs d'impulsion et d'autres FRI, inférieures ou supérieures aux valeurs par défaut.

Les Radars C et E utilisent des corrélateurs d'impulsion à impulsion et de balayage à balayage pour limiter les brouillages causés par d'autres radars. Une description de ces techniques est donnée au § 3.2. Ces radars n'ont pas de fonction de traitement CFAR.

3.4 Affichages vidéos des radars

Le Radar A, en raison de ses fonctions de traitement du signal améliorées, peut afficher divers types de cibles dans différentes combinaisons. Sur l'écran il peut afficher des «blips» vidéo bruts amorphes (affichage de l'image) des cibles synthétiques qui apparaissent comme un «o» et/ou des cibles suivies qui apparaissent comme un «x». La luminosité de la cible sur l'image vidéo est fonction du niveau du signal réfléchi par la cible. Plus l'écho lumineux sur l'écran est brillant plus l'intensité du signal réfléchi par la cible est forte. Pour les cibles synthétiques il faut ajouter 2 à 3 dB environ de puissance utile par rapport aux cibles vidéo brutes pour avoir la même probabilité de détection lorsque le radar fonctionne au niveau du signal minimal détectable (MDS, *minimum detectable signal*), mais la luminosité de ces cibles ne change pas en fonction de l'intensité du signal réfléchi.

Les Radars B et D (du même fabricant) utilisent les cibles et d'autres informations concernant le radar pour l'utilisateur, par exemple la FRI, la largeur des impulsions et les cercles de distance, sont affichées sur un tube cathodique couleur. Ces radars ne montrent pas les cibles synthétiques mais uniquement les «blips» vidéo bruts. De même, les Radars C et E (autre fabricant) n'affichent que les

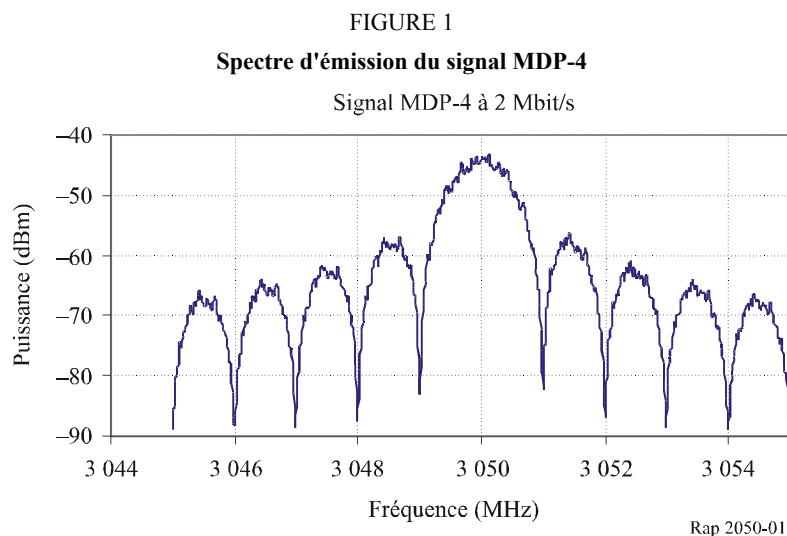
«blips» vidéo bruts. Toutefois, avec les Radars C et E l'affichage est de type à balayage de trame monochromatique. Aucun autre paramètre en dehors des cibles, n'est affiché. Comme dans le cas du Radar A, l'écho lumineux vidéo brut sur l'écran est plus brillant lorsque le signal réfléchi par la cible est de plus forte intensité.

4 Signaux brouilleurs

Pour les essais avec le Radar A on a pris comme signal brouilleur un signal à 2 Mbit/s à modulation MDP-4. Pour les essais avec les Radars B et C on a pris comme signaux brouilleurs des signaux à modulation MAQ-64 ou MAQ-16, des signaux avec accès multiple par répartition en code (AMRC) 2000 (cdma2000) et des signaux AMRC large bande (AMRC-LB). Pour les Radars D et E on a pris uniquement des signaux AMRC-2000 et AMRC large bande. Tous les signaux brouilleurs étaient accordés sur les signaux radars. Le signal MDP-4 fourni au Radar A était un signal continu sur 360 °.

Les signaux AMRC brouilleurs appliqués aux Radars B, C, D et E étaient des signaux commandés par porte de façon à arriver en même temps que la cible générée dans le même azimut. L'intervalle de temps entre chaque signal était égal à la durée pendant laquelle un signal brouilleur fixe se trouverait dans l'ouverture du faisceau de l'antenne à 3 dB pendant que cette antenne tourne dans le plan horizontal. Les signaux MAQ n'étaient pas des signaux commandés par porte.

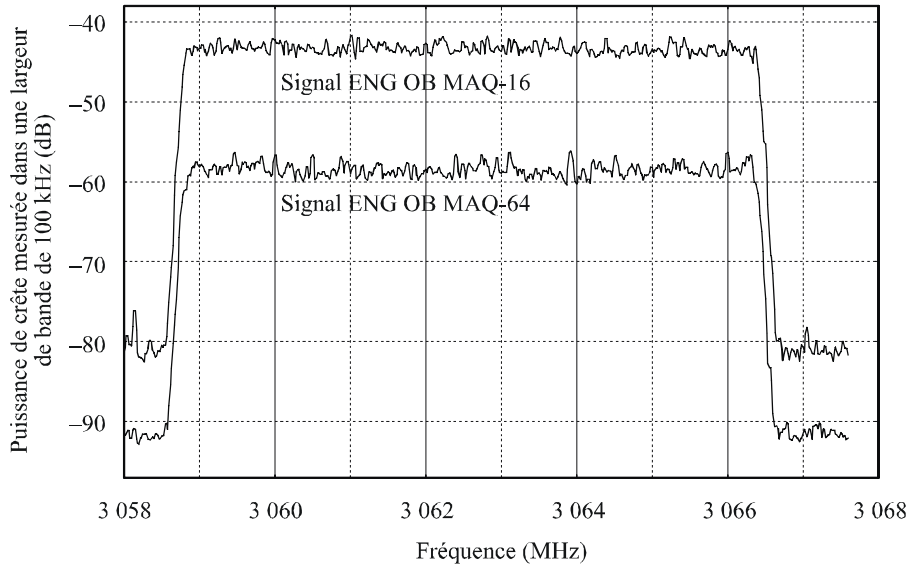
Le spectre d'émission mesuré du signal MDP-4 continu est illustré sur la Fig. 1.



On a utilisé des dispositifs de communication d'essai pour générer les signaux DVB-T MAQ-16, DVB-T MAQ-64, cdma2000 et AMRC-LB. Les spectres de chacun des signaux brouilleurs sont représentés sur les Fig. 2 et 3. Le signal cdma2000 était le signal sur la liaison retour (mobile-base) conformément à la norme IS-95 pour les téléphones mobiles cellulaires. Le signal AMRC-LB était le signal sur la liaison montante conformément au format 3GPP 3.5.

Les signaux DVB-T MAQ-16 DVB-T MAQ-64 (voir la Fig. 2) correspondent au type de schéma de modulation utilisé par les caméras numériques pour le journalisme électronique (ENG OB).

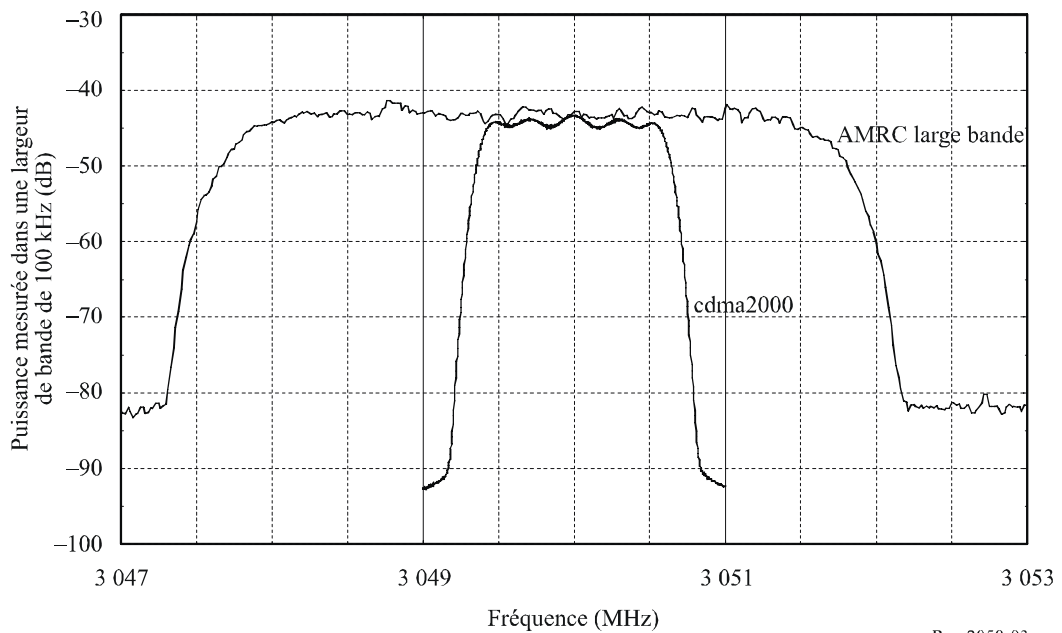
FIGURE 2
Signal MAQ utilisé pour le journalisme électronique (ENG OB)
Spectre des signaux ENG OB



Note 1 – Les courbes du spectre sont décalées en amplitude pour que les graphiques soient clairs

Rap 2050-02

FIGURE 3
Signaux AMRC
Spectres des signaux AMRC-LB large bande et cdma2000

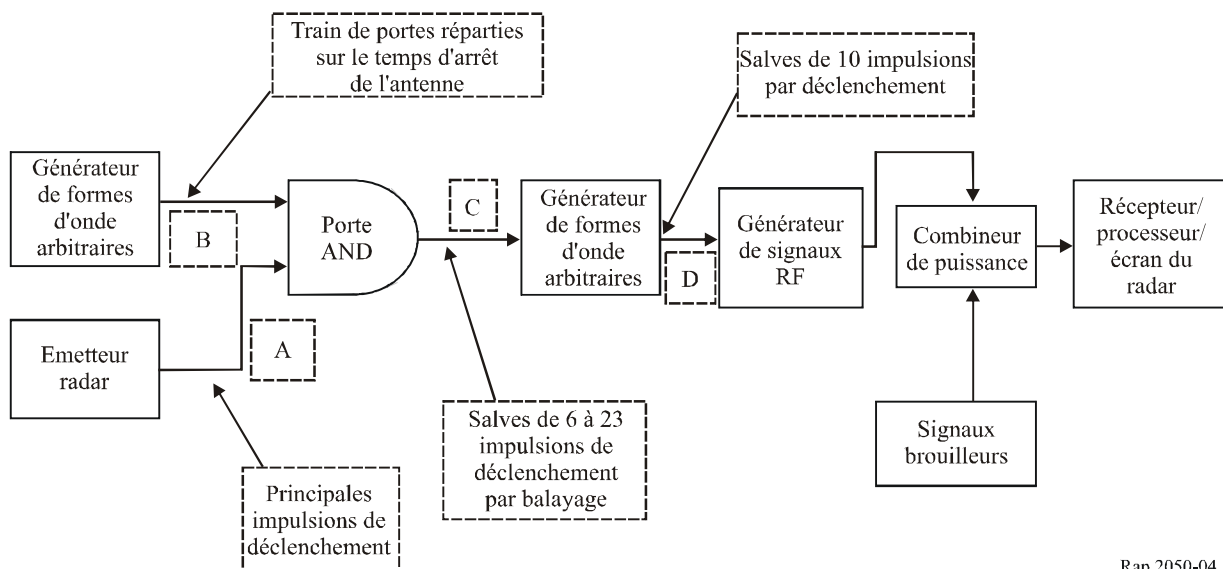


Rap 2050-03

5 Génération de cibles non fluctuantes

Dix cibles simulées équidistantes et de même amplitude ont été générées le long d'une radiale à l'aide de générateurs de signaux RF, de générateurs de formes d'onde arbitraires et de divers équipements RF (combineurs, installations de câbles, atténuateurs, etc.) pour chacun des radars avec une portée de 3 milles nautiques (5,6 km). Les groupes d'impulsions RF générées par le système avaient la bonne largeur et étaient bien synchronisées de sorte que, lorsqu'elles étaient appliquées au récepteur du radar, ces impulsions apparaissaient sur l'écran comme dix cibles distinctes. Ces dix cibles étaient équidistantes les unes des autres le long d'une radiale de 3 milles nautiques de longueur. Pour chacune d'elles, à chaque distance sur cette radiale de 3 milles nautiques, l'intensité du signal appliqué au récepteur radar était la même. On simule ainsi les cibles dont la surface équivalente augmente avec la distance. Le nombre d'impulsions utilisées pour générer chaque cible était fonction de la FRI, de la cadence de rotation de l'antenne et de l'ouverture du faisceau de l'antenne dans le plan horizontal. L'instrumentation utilisée pour générer les cibles est illustrée sur la Fig. 4. Les cibles générées sont des cibles non fluctuantes: à chaque distance, la surface équivalente est constante.

FIGURE 4
Générateur de cibles

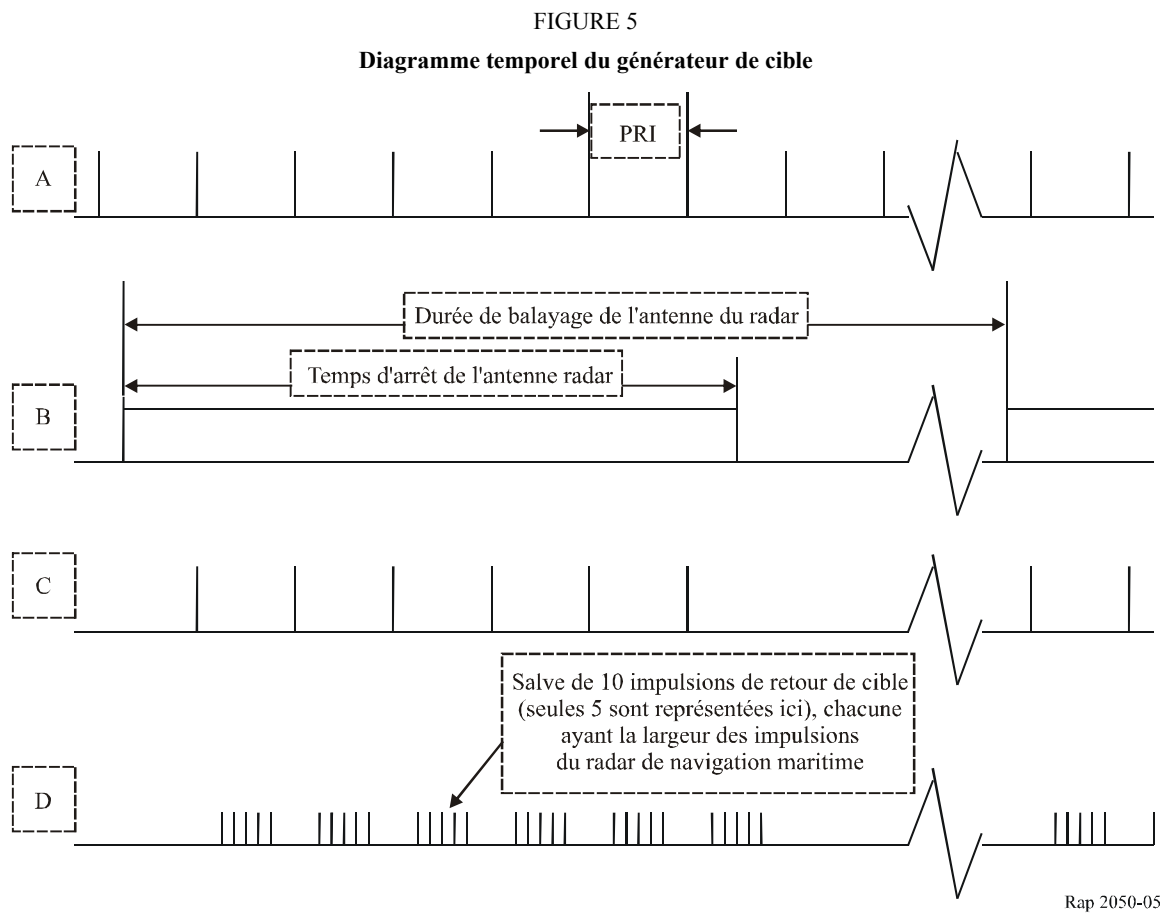


Rap 2050-04

Le train d'impulsions de déclenchement de l'émetteur, (A), a été utilisé pour déclencher le générateur de cibles simulées. Un générateur d'impulsions non synchronisées a été utilisé pour produire des impulsions commandées par porte, (B), représentant la modulation d'amplitude que subit le signal réfléchi par la cible en raison du faisceau de l'antenne. Ces impulsions déclenchaient de façon périodique le train d'impulsions de déclenchement de l'émetteur dans un circuit avec une porte AND, produisant des salves, (C), d'impulsions de déclenchement contenant chacune 6 à 23 impulsions. Chaque impulsion de déclenchement était appliquée à un générateur de formes d'onde arbitraires qui retardait le déclenchement de façon appropriée et générait une salve de dix impulsions, (D), dont chacune avait la même largeur que les impulsions brèves du radar. Ces dix impulsions apparaissaient toutes pendant un «balayage» du radar; c'est-à-dire pendant la fraction affichée d'un intervalle de répétition d'impulsions (PRI, *pulse repetition interval*). Chacune de ces impulsions, à son tour, modulait un générateur de signaux RF réglé sur une fréquence voisine de 3 050 ou de 9 410 MHz afin de produire un train d'impulsions retour de cible simulées. La fréquence spécifique du générateur de signaux RF était réglée de façon à maximiser la réponse du radar.

Les dix impulsions déclenchées par le déclencheur de chaque radar se produisent toutes pendant le temps de retour d'une des échelles de portée (courte portée) du radar, c'est-à-dire un «balayage». Par conséquent, les impulsions simulent dix cibles le long d'une radiale, c'est-à-dire un et un seul relèvement. Pour régler les paramètres de l'écran, la puissance RF du générateur de cible a été réglée de façon à ce que les dix cibles soient toutes visibles le long de la radiale sur l'écran radar panoramique, les commandes vidéo du radar étant mises sur des positions représentatives d'un mode de fonctionnement normal.

La cadence de répétition des impulsions du générateur de cibles (signal B) a été réglée de façon à ce que les cibles apparaissent au même azimut sur des balayages consécutifs de l'écran radar. Le diagramme temporel du générateur de cibles est illustré sur la Fig. 5.



Pour les essais, les niveaux des signaux de toutes les cibles ont été réglés de façon à produire des détections de cibles stationnaires correspondant à une probabilité de détection fixe d'environ 90%. Cette valeur de 90% a été choisie pour tenir compte du fait que la probabilité de détection ne peut jamais être de 100% en raison des effets de la propagation, des brouillages et d'autres facteurs. L'OMI, à l'époque, n'avait pas spécifié de probabilité de détection minimale pour les radars du service de radionavigation maritime. La norme de l'OMI² ne spécifie pas les types de cibles, pas plus que la surface équivalente des cibles radar, ou la portée minimale pour les détecter. L'OMI élabore actuellement une valeur minimale de cette probabilité de détection pour ces types de radar qui sera publiée dans un proche avenir.

² Extrait des Résolutions A222(VII), A278(VIII) et A477(XII) de l'OMI pour les équipements des radars (Règle 12, Chapitre 5 de la Convention SOLAS de l'OMI).

6 Conditions d'essai

Les essais ont été réalisés avec les paramètres suivants pour les radars du service de radionavigation maritime (voir le Tableau 4).

TABLEAU 4
Paramètres des fonctions du radar

Paramètre	Valeur
Régulation de la sensibilité en fonction du temps (STC)	Désactivé
Découpage des échos longs (FTC)	Désactivé (par défaut)
Rejet des brouillages (IR)	Activé (par défaut)
Commande automatique de gain	Activé (par défaut)
Image du radar A sélectionnée	Vidéo brute (image) et/ou cibles synthétiques
Radar B, C, D, E	Vidéo brute
Portée	3 nmi (5,6 km)

Pour tous les radars, les fonctions régulation de gain variable dans le temps (GVT) et découpage des échos longs (FTC, *fast-time-constant*) peuvent être activées à la discrétion de l'opérateur. La fonction GVT permet de supprimer les échos radar provenant des réflexions sur les vagues en affaiblissant fortement le signal reçu à courte distance, d'une quantité qui décroît en fonction de la portée, l'affaiblissement étant nul pour de longues portées. La technique FTC permet de supprimer les échos radar produits par la pluie en différenciant le signal reçu après détection de l'enveloppe.

Pour chacun des radars testés, les valeurs de référence pour les fonctions du logiciel qui commandaient les réglages de brillance de la cible et du signal de fond, des nuances et des contrastes ont été fixés par expérimentation par le personnel des essais, avec l'aide des constructeurs des radars et de marins professionnels qui avaient une expérience du fonctionnement de ces types de radars sur des navires de diverses tailles. Une fois ces valeurs fixées, elles ont été utilisées pendant tout le programme des essais pour le radar considéré.

7 Procédures des essais

Pour chaque radar testé, la puissance en sortie RF du générateur de cibles a été réglée de façon à ce que la probabilité de détection des cibles («blips») soit d'environ 90% en l'absence de signaux brouilleurs, et en prenant les paramètres de référence pour la visualisation des signaux de fond et des cibles sur l'écran radar. Le Tableau 5 donne la liste des valeurs de la puissance de la cible à l'entrée RF de chaque radar nécessaire pour obtenir une probabilité de détection de 90%. Une fois ces valeurs déterminées, elles ont été utilisées pendant tous les essais.

TABLEAU 5
Niveaux de puissance des cibles

Radars testés	Puissance de la cible à l'entrée RF (avant mixeur) pour une probabilité de détection de 0,90 (dBm)
A	-90
B	-89
C	-77
D	-89
E	-86

Dans le cas des Radars A, C et E, on a déterminé le niveau de puissance des signaux brouilleurs nécessaire pour obtenir les niveaux voulus du rapport I/N au niveau des récepteurs radars en utilisant la valeur calculée de la puissance de bruit du récepteur, laquelle a été étalonnée sur le signal fourni à l'entrée du guide d'onde du récepteur. On a calculé la puissance de bruit du récepteur à partir de la largeur de bande FI et du facteur de bruit. Pour fixer les niveaux du rapport I/N , on a tenu compte des éventuelles différences de largeur de bande entre le récepteur du radar et les signaux d'essai.

On a déterminé le niveau de puissance des signaux brouilleurs nécessaire pour obtenir les niveaux voulus du rapport I/N au niveau des récepteurs des Radars B et D en surveillant avec l'analyseur de spectre la sortie du circuit FI en un point de mesure situé à l'entrée du détecteur. On a réglé l'analyseur de spectre sur le mode «zero-span» puis mesuré et enregistré la valeur de la puissance de bruit du récepteur du radar au point de mesure sur le circuit FI, en l'absence de signaux brouilleurs. On a ensuite appliqué à la tête RF du récepteur du radar, un signal brouilleur dont on a fait varier l'intensité, et on a fait augmenter de 3 dB la puissance de bruit du récepteur au point de mesure sur le circuit FI. Une augmentation de 3 dB de la puissance de bruit du récepteur correspond à un rapport I/N de 0 dB. Une fois trouvée la valeur du signal brouilleur correspondant à un rapport I/N de 0 dB, il a été facile de déterminer les niveaux de puissance des signaux brouilleurs correspondant aux autres valeurs du rapport I/N . On a régulé les niveaux de puissance des signaux brouilleurs à l'aide d'affaiblisseurs à plots ou de l'écran du dispositif d'essai.

Pour les Radars B et D, on a compté le nombre de cibles sur chaque radiale pour 50 rotations simulées de l'antenne, pour chaque niveau du rapport brouillage/bruit et chaque type de signal brouilleur. On a calculé la probabilité de détection en divisant le nombre de cibles comptées par le nombre total de cibles générées.

Pour les Radars A, C et E, on a observé l'intensité ou la brillance des cibles affichées sur l'écran radar, pour les différents niveaux du rapport I/N . Dans le cas des Radars A, C et E, en raison de la nature des effets du brouillage sur les cibles affichées il a été impossible de «compter» le nombre effectif de cibles car, en général, toutes «faiblissaient» au même rythme. L'intensité lumineuse de certaines cibles baissait, le nombre de fausses cibles augmentait, les hachures et l'intensité du bruit de fond «speckle» augmentaient aussi.

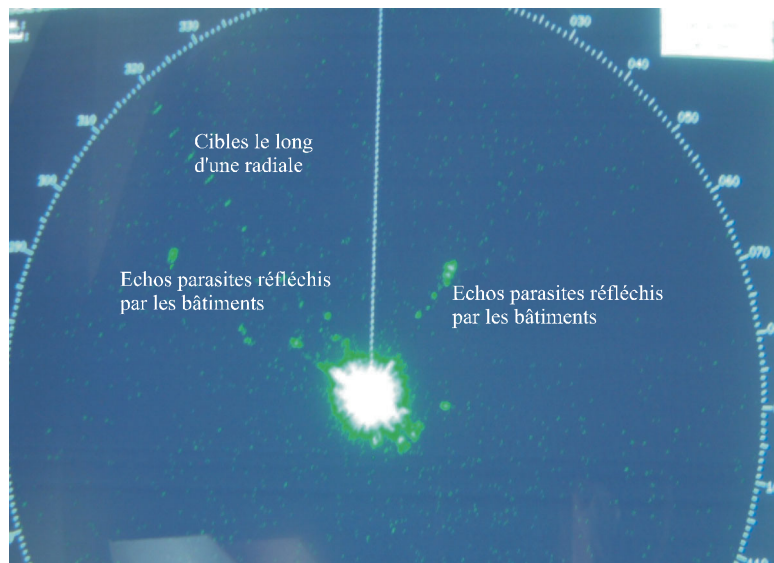
8 Résultats des essais

8.1 Radar A (3 GHz)

La Fig. 6 montre une photographie numérique de l'écran panoramique du Radar A en mode de base (pas de signal brouilleur). On notera que les cibles vidéo brutes apparaissent le long d'une radiale sur environ 320 °. Les échos parasites (clutter) réfléchis par les bâtiments locaux et un léger speckle sont également visibles sur l'écran radar.

FIGURE 6

Radar A fonctionnant en mode de base avec images vidéo des cibles



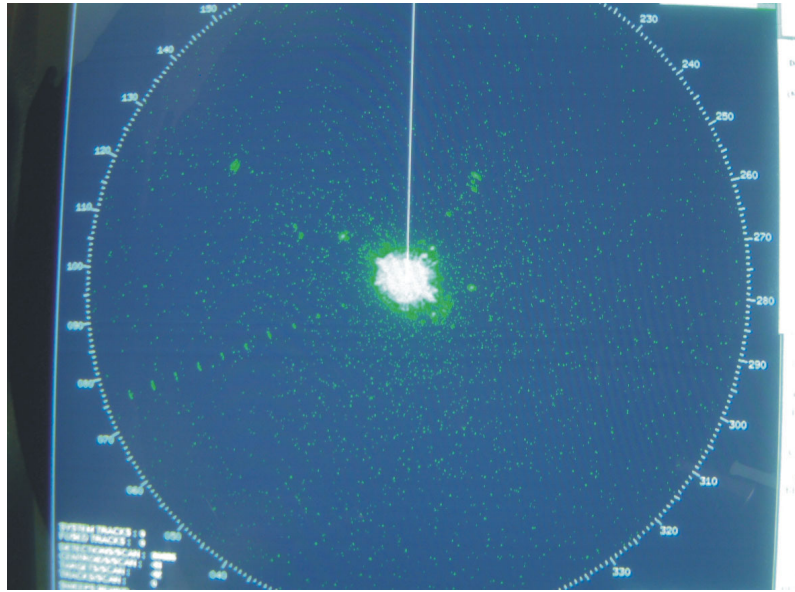
Rap 2050-06

On a effectué sur l'écran radar les images vidéo des cibles lorsque des signaux MDP-4 étaient appliqués au récepteur. Le niveau de puissance de ces signaux MDP-4 a été réglé jusqu'à ce que l'écran radar soit en mode de base.

On a fait varier l'intensité des signaux MDP-4 à l'intérieur d'une plage de valeurs afin de trouver le niveau auquel les signaux MDP-4 n'affectaient pas le fonctionnement du radar pour ce qui est de l'affichage des cibles vidéo. Les Fig. 7 et 8 sont des photographies de l'écran panoramique du radar qui montrent les effets d'un signal MDP-4, respectivement pour un niveau de puissance de -112 dBm et de -102 dBm (mesuré dans une largeur de bande de 3 MHz). La puissance de bruit du récepteur du radar est d'environ -104 dBm. Les valeurs correspondantes du rapport I/N sont de -8 et $+2$ dB.

FIGURE 7

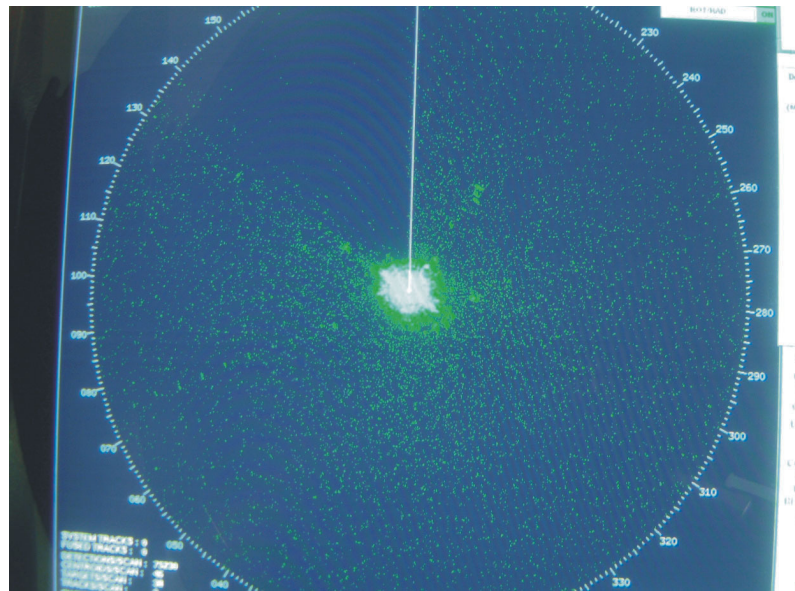
Signal brouilleur MDP-4 pour un rapport σ/N de -8 dB



Rap 2050-07

FIGURE 8

Signal brouilleur MDP-4 pour un rapport σ/N de $+2$ dB



Rap 2050-08

Les photographies font apparaître que les signaux MDP-4 émis ont fait augmenter le bruit de fond (speckle). En comparant la Fig. 6 qui représente l'état de base du radar sans signaux brouilleurs et la Fig. 7 (pour laquelle le rapport I/N est de -8 dB), on constate que le bruit de fond a augmenté mais que les cibles sont toujours détectées et affichées. Dans la Fig. 8, le rapport I/N est de $+2$ dB et les signaux MDP-4 ont fait augmenter le bruit de fond au point qu'il est impossible de distinguer certaines des cibles du «speckle».

L'intensité des signaux MDP-4 a été réglée de façon à trouver le point où l'image vidéo des cibles reste clairement visible et où le niveau du «speckle» (granularité lumineuse) de fond est analogue au niveau de référence. Pour un rapport I/N d'environ -7 dB, l'intensité du signal à l'entrée du récepteur est de -111 dBm.

Il est important de noter que les cibles d'essai sur la radiale sont plus visibles que des cibles «réelles» qui seraient réparties n'importe où sur l'écran panoramique du radar. Par conséquent, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on interprète des images radars en présence de bruit.

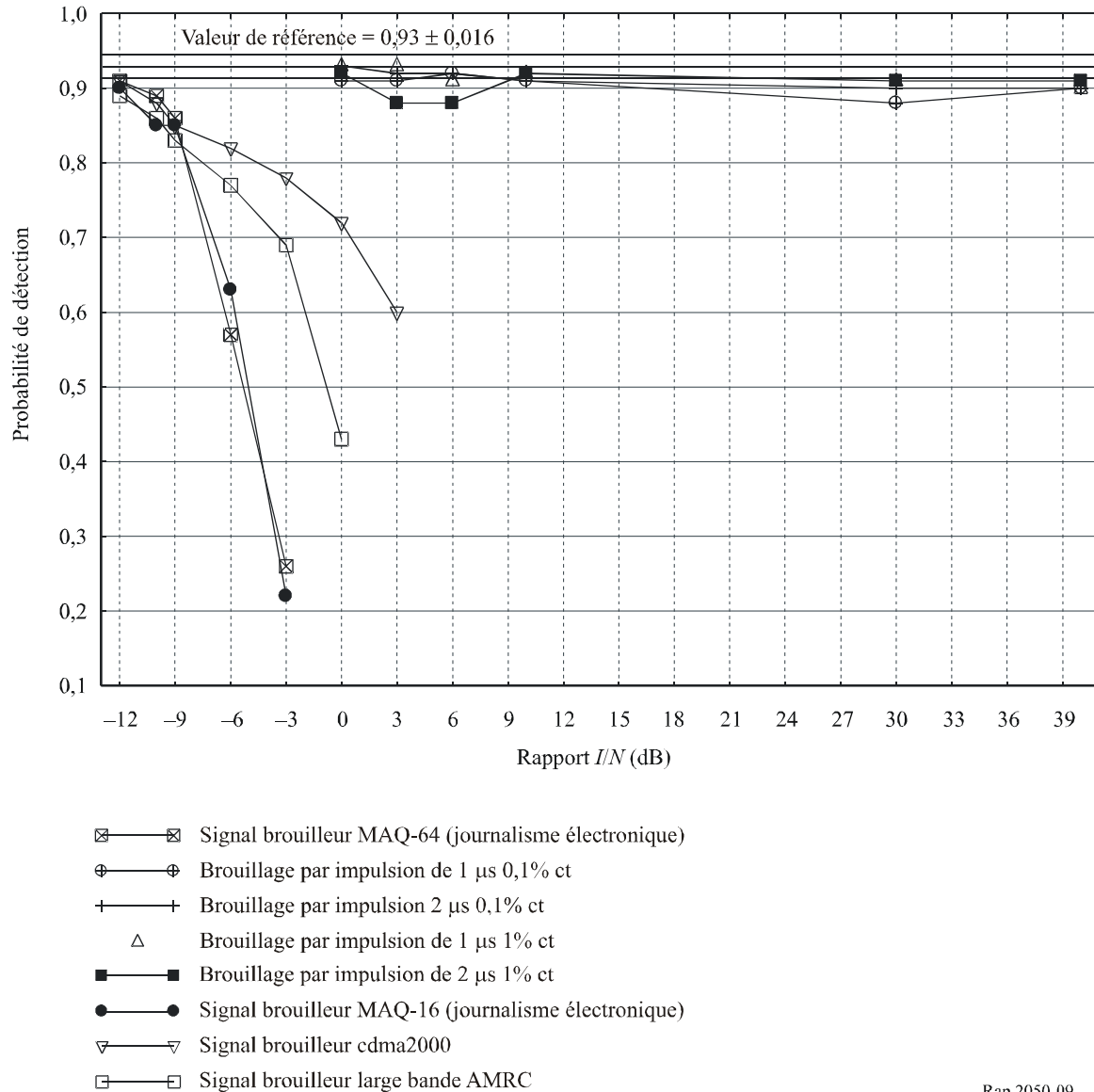
Les valeurs du rapport I/N n'étaient pas basées sur une photographie particulière. Les photographies données dans le présent rapport sont représentatives des conditions de brouillage. Dans certains cas, le balayage de l'écran radar peut faire apparaître une situation défavorable (speckle dense/cibles fausses) et dans d'autres, la situation peut être meilleure (écran plus clair) pour un même niveau du rapport I/N . On a observé environ 20 balayages pour chaque niveau du rapport I/N et on a choisi pour ce rapport les valeurs indiquées dans les Fig. 6 à 8.

8.2 Radar B (3 GHz)

Pour le Radar B, il a été possible d'observer les effets que les signaux brouilleurs avaient sur chaque cible. Pour chaque signal brouilleur, on a pu mesurer la diminution du nombre de cibles visibles sur l'écran radar en fonction de l'augmentation du niveau du rapport I/N . On a compté le nombre de cibles pour chaque niveau du rapport I/N et pour chaque type de brouillage. On a mesuré avant le début de chaque essai la valeur de référence de la probabilité de détection des cibles. Les résultats pour le Radar C sont indiqués dans la Fig. 9: les courbes représentent la probabilité de détection des cibles en fonction du niveau du rapport I/N , pour chaque type de brouillage. La valeur de référence est de $0,93 \pm 0,016$. On notera que chaque point sur cette figure représente un total de 500 cibles utiles.

La Fig. 9 fait apparaître que, sauf dans le cas d'un brouillage par impulsion, la valeur de la probabilité de détection des cibles est tombée au-dessous de la valeur de référence utilisée dans ces essais, valeur à laquelle on a retranché l'écart type pour les valeurs du rapport I/N supérieures à -12 dB, pour tous les signaux brouilleurs utilisant une modulation numérique. C'est avec un signal brouilleur MAQ que la valeur de la probabilité de détection a chuté le plus vite avec l'augmentation du rapport I/N . Aucune mesure n'a été faite pour des valeurs du rapport I/N supérieures à -3 dB dans le cas de signaux brouilleurs MAQ car les cibles avaient toutes disparu de l'écran radar, au-dessus de ce niveau. Ce sont les signaux brouilleurs cdma2000 qui ont eu le moins d'effet sur la probabilité de détection des cibles mais ils ont tout de même fait chuter la valeur de ce paramètre lorsque le rapport I/N était supérieur à -12 dB.

FIGURE 9
 Courbes de la probabilité de détection des cibles pour le Radar B
 Radar B



Rap 2050-09

8.3 Radar C (3 GHz)

Pour le Radar C, il a été difficile de mesurer la chute de la valeur de la probabilité de détection des cibles lorsque le signal brouilleur était appliqué au récepteur du radar. En effet, en présence d'un signal brouilleur l'intensité lumineuse de toutes les cibles faiblissait au même rythme, indépendamment de l'endroit où elles étaient situées dans la chaîne des cibles. Il n'a pas été possible de faire «disparaître» telle ou telle cible en faisant augmenter l'intensité du signal brouilleur ni de calculer le nombre de cibles perdues pour évaluer la probabilité de détection des cibles. Par conséquent, les données de mesure pour le Radar C indiquent si toutes les cibles sont apparues ou non sur l'écran pour chaque niveau du rapport I/N et chaque type de brouillage. Les données concernant le Radar C sont résumées dans les Tableaux 6 et 7.

TABLEAU 6
Radar C avec un signal brouilleur ENG OB continu

Rapport I/N (dB)	Signal MAQ-64	Signal MAQ-16
-12	Aucun effet	Aucun effet
-10	Aucun effet	Aucun effet
-9	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible
-6	L'intensité lumineuse de la cible est très faible	L'intensité lumineuse de la cible est très faible
-3	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
0	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
3	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
6	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible

Les données dans le Tableau 7 montrent que dans le cas du Radar E les signaux brouilleurs MAQ ont eu des effets sur la visibilité des cibles sur l'écran lorsque le rapport I/N était de -9 dB. A ce niveau, l'intensité lumineuse des cibles sur l'écran radar était légèrement plus faible que dans la situation de référence. Pour un rapport I/N de -6 dB, l'écho lumineux sur l'écran radar était encore plus faible et au-dessus de -3 dB l'intensité lumineuse était si faible que la cible n'était plus visible sur l'écran.

TABLEAU 7
Radar C avec signaux brouilleurs AMRC commandés par porte

Rapport I/N (dB)	Signal brouilleur AMRC-LB	Signal brouilleur cdma2000
-12	Aucun effet	Aucun effet
-10	Aucun effet	Aucun effet
-9	Aucun effet	Aucun effet
-6	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible
-3	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
0	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
3	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
6	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible

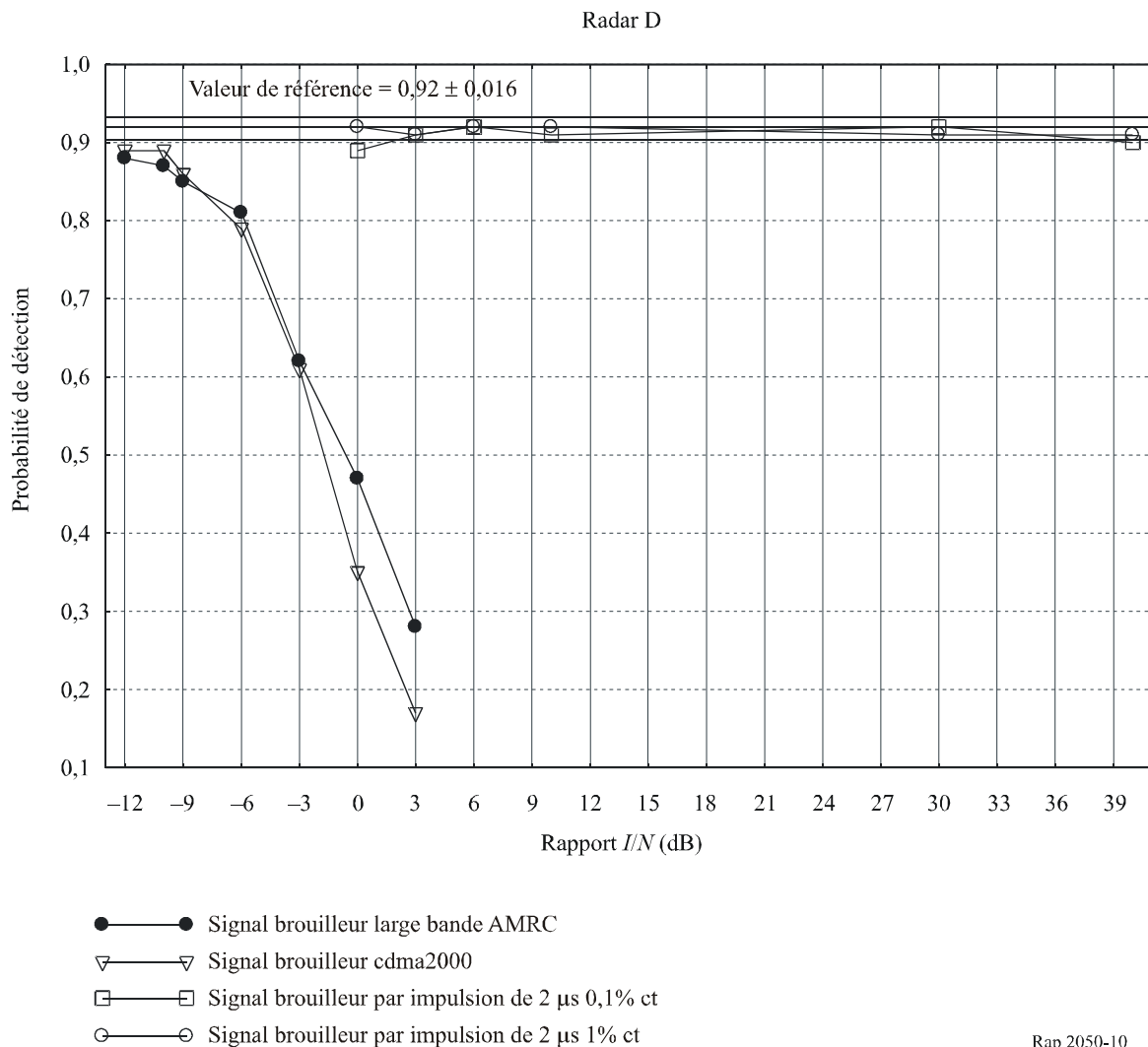
Les données du Tableau 6 montrent que dans le cas du Radar C les signaux AMRC ont eu des effets sur la visibilité des cibles sur l'écran lorsque le rapport I/N était de -6 dB. A ce niveau en effet, l'écho lumineux sur l'écran était notablement plus faible que dans la situation de référence. Pour un rapport I/N de -3 dB ou plus, l'écho lumineux était si faible que les cibles n'étaient plus visibles sur l'écran.

Dans le cas du Radar C, les signaux brouilleurs par impulsion de 2,0 et 1,0 μ s commandés par porte, avec des rapports cycliques de 0,1 et 1,0%, n'ont pas eu d'effet sur la visibilité des cibles sur l'écran lorsque le rapport I/N était très élevé, à savoir de 40 dB.

8.4 Radar D (9 GHz)

Pour le Radar D, il a été possible d'observer les effets que les signaux brouilleurs avaient sur chaque cible. Pour chaque signal brouilleur, on a pu mesurer la diminution du nombre de cibles avec l'augmentation du niveau du rapport I/N . On a compté le nombre de cibles pour chaque niveau du rapport I/N et pour chaque type de brouillage. On a mesuré avant le début de chaque essai la valeur de référence de la probabilité de détection des cibles. Les résultats pour le Radar D sont indiqués dans la Fig. 10: les courbes représentent la probabilité de détection des cibles en fonction du niveau du rapport I/N , pour chaque type de brouillage. La valeur de référence est de $0,92 \pm 0,016$. On notera que chaque point dans la Fig. 10 représente un total de 500 cibles utiles.

FIGURE 10
Courbes de la probabilité de détection des cibles pour le Radar D



La Fig. 10 montre que, sauf dans le cas d'un brouillage par impulsion, la valeur de la probabilité de détection des cibles est tombée au-dessous de la valeur de référence utilisée dans ces tests, valeur à laquelle on a retranché l'écart type pour les valeurs du rapport I/N supérieures à -12 dB dans le cas d'un signal brouilleur AMRC.

8.5 Radar E (9 GHz)

Comme dans le cas du Radar C, il a été difficile, pour le Radar E, de mesurer la chute de la valeur de la probabilité de détection des cibles lorsqu'un signal brouilleur était appliqué au récepteur du radar. En effet, en présence d'un signal brouilleur, l'intensité lumineuse de toutes les cibles faiblissait au même rythme, indépendamment de l'endroit où elles étaient situées dans la chaîne des cibles. Il n'a pas été possible de faire «disparaître» telle ou telle cible en faisant augmenter l'intensité du signal brouilleur. Par conséquent, les données mesurées pour le radar C indiquent si toutes les cibles sont apparues ou non pour chaque niveau du rapport I/N . Les données pour le Radar E sont résumées dans le Tableau 8.

TABLEAU 8

Radar E avec signaux brouilleurs AMRC commandés par porte

Rapport I/N (dB)	Signal AMRC-LB	Signal cdma2000
-12	Pas d'effet	Pas d'effet
-10	Pas d'effet	Pas d'effet
-9	Pas d'effet	Pas d'effet
-6	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible
-3	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible	L'intensité lumineuse de la cible est légèrement plus faible
0	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
3	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible
6	La cible n'est plus visible	La cible n'est plus visible

Les données du Tableau 8 montrent que, dans le cas du Radar E, les signaux AMRC brouilleurs ont eu des effets sur la visibilité des cibles sur l'écran lorsque le rapport I/N était de -6 dB. A ce niveau en effet, l'intensité lumineuse des cibles sur l'écran radar était notablement plus faible que dans la situation de référence. Pour un rapport I/N de 0 dB ou plus, l'écho lumineux était si faible que les cibles n'étaient plus visibles sur l'écran.

Dans le cas du Radar E, les signaux brouilleurs par impulsion de 2,0 et 1,0 μ s commandés par porte, avec des rapports cycliques de 0,1 et 1,0% n'ont pas eu d'effet sur la visibilité des cibles sur l'écran radar lorsque le rapport I/N était très élevé, à savoir de 40 dB.

9 Conclusions

Les résultats de ces essais montrent que lorsque les signaux émis par des dispositifs à modulation numérique en direction d'un radar du type de ceux testés ici dépassent un rapport I/N de -6 dB, on constate que, pour certains de ces radars, l'intensité lumineuse des cibles diminue, certaines cibles sont perdues ou de fausses cibles sont générées. Pour d'autres radars, à ce niveau du rapport I/N ces effets ont déjà été constatés. Avec des radars utilisant un amplificateur/détecteur FI logarithmique (Radars A, C et E), comme indiqué dans les Tableaux 6, 7 et 8, soit les cibles n'étaient pas visibles, soit leur intensité lumineuse était plus faible lorsque le rapport I/N était de -3 dB et de -6 dB. Selon le type de signal brouilleur appliqué aux Radars A, C et E, les effets du brouillage étaient très forts (les cibles avaient disparu de l'écran radar ou aucun autre effet n'était visible) lorsque le rapport I/N se situait entre 0 et -10 dB. Dans le cas des Radars B et D (qui utilisent un amplificateur logarithmique et un détecteur vidéo distinct) pour un rapport I/N de -6 dB, la valeur de la

probabilité de détection des cibles a chuté en dessous de la valeur de référence. Les résultats de ces essais montrent que, pour un rapport I/N de -10 dB, dans le cas des Radars A, C et E, les échos lumineux ne sont plus affaiblis et dans le cas des Radars B et D, les valeurs de la probabilité de détection des cibles sont légèrement inférieures à la valeur de référence. Toutefois, on notera (voir le § 3.4), que pour le Radar A il a fallu ajouter, dans le cas des cibles synthétiques, 2 à 3 dB d'intensité supplémentaire pour le signal utile par rapport aux cibles vidéo brutes pour obtenir la même probabilité de détection, lorsque le radar fonctionnait au niveau minimum de détection du signal mais que l'écho lumineux des cibles sur l'écran radar n'était pas plus brillant.

Les essais montrent que les radars peuvent supporter des signaux brouilleurs par impulsion à faible rapport cyclique lorsque le rapport I/N est élevé, en raison de la présence d'un circuit de limitation des brouillages entre radars et/ou d'un dispositif de traitement du signal. Les techniques de limitation des brouillages entre radars (corrélateurs de balayage à balayage ou d'impulsion à impulsion et traitement CFAR) décrites dans la Recommandation UIT-R M.1372 donnent de bons résultats. Toutefois ces mêmes techniques ne permettent pas de limiter des émissions continues assimilables à du bruit ou à des émissions en ondes entretenues au niveau du récepteur radar.

Etant donné que la plupart des radars du service de radionavigation maritime exploités dans les bandes 2 900-3 100 et 9 200-9 500 MHz sont très semblables tant au niveau de la conception que de l'exploitation, les critères de protection qui ont été calculés pour les radars utilisés pour ces essais ne devraient pas beaucoup varier. Par conséquent, les résultats de ces essais devraient pouvoir s'appliquer à d'autres radars analogues fonctionnant dans les bandes 2 900-3 100 et 9 200-9 500 MHz.

La détermination de la quantité de brouillage acceptable pour ces types de radar peut être quelque peu subjective en raison de la vue, plus ou moins bonne, et de l'expérience de l'opérateur du radar qui regarde l'écran pour compter les cibles et évaluer leur intensité lumineuse. Toutefois, en raison de la conception du radar, la seule façon de réaliser ces essais est que l'opérateur du radar ou celui qui réalise l'essai observe les cibles sur l'écran radar.

L'expérience acquise dans le fonctionnement des radars est un élément important pour déterminer exactement ce qu'est une cible sur l'écran et la dégradation que les cibles peuvent subir. Un opérateur de radars expérimenté et/ou ayant reçu une formation pourra mieux qu'un opérateur non expérimenté faire la différence entre des cibles réelles et des cibles fausses et déterminer les brouillages et/les échos parasites (clutter). Pour participer à ces essais, les constructeurs ont fourni les services d'ingénieurs concepteurs de radars et les garde-côtes britanniques (UK Maritime Coast Guard Agency (MCA)) ont fourni des opérateurs de radars et des instructeurs expérimentés. Les résultats et les conclusions de ces essais ont été vérifiés.

Les conclusions ci-dessus ont été basées sur des essais utilisant des cibles non fluctuantes. D'autres essais, utilisant des cibles fluctuantes, pourraient donner des résultats différents et donc des conclusions différentes.
