

RAPPORT UIT-R M.2032*

Essais illustrant la compatibilité entre les radars de radionavigation maritime et les émissions de radars de radiolocalisation dans la bande 2 900-3 100 MHz

(2003)

1 Introduction

Des essais ont été réalisés pour évaluer l'incidence d'émissions types de radars de radiolocalisation ayant une attribution à titre secondaire dans la bande 2 900-3 100 MHz sur le fonctionnement de deux radars de radionavigation maritime types ayant une attribution à titre primaire dans cette bande. Les radars de radionavigation maritime utilisés pour ces essais sont identifiés par les lettres A et B¹ dans le présent Rapport. Les essais ont été effectués en deux temps. On a commencé par simuler des émissions de radiolocalisation grâce à des générateurs de signaux utilisant des impulsions sans modulation intra-impulsions, à peu près représentatives des émissions de radars de radiolocalisation de type P0N décrites dans la Recommandation UIT-R M.1460 – Caractéristiques techniques et d'exploitation et critères de protection des radars météorologiques et de radiorepérage fonctionnant dans la bande des fréquences 2 900-3 100 MHz.

Ensuite, on a fait des essais avec des émissions de type P0N dont la largeur d'impulsion et le coefficient d'utilisation étaient plus grands que ceux généralement utilisés pour les radars identifiés dans la Recommandation UIT-R M.1460. Des reconstitutions analogiques d'émissions enregistrées numériquement et provenant d'un radar de radiolocalisation à fréquences échelonnées, dont les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement sont similaires à ceux du radar 2 décrit dans la Recommandation UIT-R M.1460, ont par ailleurs servi de stimuli brouilleurs pour l'un des radars maritimes.

La conduite de ces deux phases d'essais et les résultats obtenus sont décrits dans le présent Rapport.

2 Objectifs

Les objectifs des essais étaient les suivants:

- quantifier la mesure dans laquelle un traitement d'élimination des brouillages de radars de radionavigation maritime types permet de diminuer les impulsions P0N asynchrones brouilleuses dues aux émissions des radars de radiolocalisation, en fonction de leur coefficient d'utilisation, de la largeur de leurs impulsions et de leur niveau de puissance;

* Le présent Rapport est à utiliser conjointement avec un document de la Réunion de préparation à la Conférence relatif au point 1.17 de l'ordre du jour de la CMR-03.

¹ Ces essais portent sur des radars de radionavigation maritime à impulsions dont les valeurs types de largeur d'impulsion, de fréquence de répétition des impulsions (FRI), de largeur de bande, de facteur de bruit et d'ouverture de faisceau d'antenne sont conformes à celles identifiées dans la Recommandation UIT-R M.1313. On applique généralement à ces radars les techniques de réduction/les méthodes de traitement des brouillages identifiées dans la Recommandation UIT-R M.1372 afin qu'ils puissent fonctionner en présence d'autres radars de radionavigation ou de radiolocalisation. Les techniques de réduction des brouillages de ce type sont relativement peu onéreuses à mettre en oeuvre maintenant qu'il existe des circuits puissants de traitement numérique du signal à faible coût et fréquemment utilisés pour d'autres fonctions des radars de navigation. Des radars de radionavigation maritime plus anciens et moins sophistiqués risquent de présenter des capacités de suppression des brouillages inférieures à celles qu'offrent généralement les radars de l'Organisation maritime internationale (OMI) identifiés dans la Recommandation UIT-R M.1313 – Caractéristiques techniques des radars du service de radionavigation maritime.

- quantifier la mesure dans laquelle un traitement d'élimination des brouillages de radars de radionavigation maritime types permet de diminuer les ondes brouilleuses d'un radar de radiolocalisation à fréquences échelonnées;
- observer et quantifier la mesure dans laquelle des techniques d'élimination des brouillages de radars de radionavigation maritime types permettent de réduire le nombre de fausses cibles, qu'elles apparaissent sous forme de raies radiales (de type stroboscopique) ou des granularités ponctuelles ("speckle");
- observer et quantifier l'incidence, en termes de réduction des brouillages, de l'application des techniques de modulation du diagramme d'antenne aux émissions d'un radar de radiolocalisation.

3 Radars utilisés pour les essais

Le radar A est un système ancien alors que le radar B est récent (il date de 2000). Les valeurs nominales de leurs principaux paramètres sont tirées de documents réglementaires d'homologation, de brochures commerciales ou de manuels techniques. Elles figurent dans les Tableaux 1 et 2.

TABLEAU 1

Paramètres d'émission et de réception du radar A

Paramètres	Radar A (radar le plus ancien)		
Fréquence (MHz)	3 050 ± 30		
Puissance des impulsions (kW)	60		
Portée (milles marins)	0,25-3	6-12	24-64
Largeur d'impulsion (µs)	0,06	0,50	1,0
FRI (Hz)	3 600	1 800	900
Largeur de bande FI (MHz)	22	4	4
Affaiblissement de la réponse parasite (dB)	40		
Facteur de bruit du système (dB)	10		
Largeur de bande RF (MHz)	100		
Vitesse de balayage de l'antenne (tours/min)	33		
Temps de balayage de l'antenne (s)	1,8		
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan horizontal (degrés)	1,25		
Polarisation	Horizontale		

D'autres grandeurs intéressantes sont le temps sur cible du faisceau principal de l'antenne ainsi que le nombre correspondant d'impulsions sur cible durant le temps d'illumination dudit faisceau (voir le Tableau 3). Pour chaque fréquence de répétition des impulsions, ils sont déduits des paramètres figurant dans les Tableaux 1 et 2.

Les techniciens ont procédé à un réglage des radars avant les essais, afin de garantir une qualité de fonctionnement optimale.

TABLEAU 2

Paramètres d'émission et de réception du radar B

Paramètres	Radar B (radar le plus récent)			
Fréquence (MHz)	3 050 ± 30			
Puissance des impulsions (kW)	30			
Portée (milles marins)	0,375-1,5	3-6	12	24-96
Largeur des impulsions (µs)	0,08	0,30	0,60	1,2
FRI (Hz)	2 200		1 028	600
Largeur de bande FI (MHz)	28	3	3	3
Affaiblissement de la réponse parasite (dB)	60 ⁽¹⁾			
Facteur de bruit du système (dB)	4			
Largeur de bande RF (MHz)	Inconnue			
Vitesse de balayage de l'antenne (tours/min)	26			
Temps de balayage de l'antenne (s)	2,31			
Largeur de faisceau de l'antenne dans le plan horizontal (degrés)	1,9			
Polarisation	Horizontale			

⁽¹⁾ On a mesuré un affaiblissement de la réponse parasite de 44 dB.

TABLEAU 3

Paramètres déduits des radars de navigation maritime testés

Paramètres	Radar A	Radar B
Temps sur cible (ms)	6,3	12
Nombre d'impulsions sur cible	23 11 6	23 13,4 7,3

3.1 Caractéristiques communes aux radars

Les deux radars maritimes sont pratiquement identiques. Ils sont tous deux dotés d'un émetteur à magnétron, peuvent transmettre des impulsions dont la largeur varie entre 0,06 (ou 0,08) µs et 1.0 (ou 1,2) µs. Ils utilisent un certain nombre de largeurs de bandes FI dont chacune correspond à une largeur d'impulsion différente. Leur portée peut varier entre une fraction de mille marin et une distance comprise entre 64 et 96 milles marins (soit entre 118 et 178 km environ). Leur fréquence nominale d'exploitation est de 3 050 MHz. Leur temps de balayage d'antenne est proche de 2 s et leur ouverture de faisceau dans le plan horizontal est comprise entre 1° et 2°. Ils ne disposent pas, ni de la fonction d'indication de cible en mouvement, ni d'aucun autre type de traitement fondé sur l'effet Doppler. Ils sont tous deux dotés d'une fonction d'élimination des brouillages causés par des impulsions asynchrones.

Les deux radars sont équipés d'amplificateurs FI logarithmiques et d'un couplage alternatif de leurs trajets de signal vidéo, ce qui est pratiquement toujours le cas pour les radars de navigation maritime. Ces choix de conception reposent apparemment sur la découverte, faite en 1956, selon laquelle les fluctuations de l'enveloppe détectée du signal, dues à l'écho de fouillis radar à distribution de Rayleigh, sont pour l'essentiel indépendantes de l'intensité du fouillis (ou de la

distance), si le signal est traité dans un amplificateur logarithmique suivi d'un couplage alternatif². Dans la pratique, les fluctuations du signal d'écho de fouillis de mer et de pluie diffèrent quelque peu du modèle de Rayleigh: la valeur quadratique moyenne de ces fluctuations dépend en réalité de l'intensité du fouillis et de la distance, mais de façon moindre qu'en cas d'utilisation conjointe d'un récepteur linéaire ou logarithmique avec un couplage continu.

Il est très intéressant de noter que les deux radars disposent d'une fonction d'élimination des impulsions brouilleuses asynchrones, qui n'est pas identique, mais repose sur le même principe. Dans le radar A, le contenu d'une cellule de distance donnée de chaque intervalle de répétition des impulsions (PRI, *pulse-repetition interval*) est comparé avec celui de la même cellule de l'intervalle PRI précédent; une tâche ("blip") apparaît sur l'écran radar uniquement si les deux cellules détectent un signal. Dans le radar B, les niveaux du signal sont relevés pour trois balayages consécutifs au lieu de deux. Si l'amplitude de l'impulsion pour une cellule de distance donnée dépasse de manière excessive celle des cellules correspondantes dans la PRI précédente et dans la PRI suivante, elle est remplacée par une moyenne pondérée de ces deux dernières valeurs. Pour les essais concernant le radar B (première phase des essais), il était possible de régler l'écart acceptable entre l'amplitude d'un signal donné et celles de signaux correspondants dans les PRI précédente et suivante. Dans la seconde phase des essais, le logiciel commandant la fonction d'élimination des brouillages avait été modifié et ne pouvait qu'être désactivé par l'opérateur. L'activation de la commande d'élimination des brouillages est la configuration par défaut du système radar considéré.

La Fig. 1 illustre des occurrences types d'impulsions asynchrones dont la durée (2 μ s) est celle utilisée pour les essais; ces occurrences apparaissent pour des balayages en distance successifs d'un radar de radionavigation similaire au radar A ou B exploité aux distances utilisées pour les essais. On indique également certaines des impulsions qui seraient renvoyées par une cible réelle située à une distance (2,37 milles marins ou 4,39 km) équivalente à un temps de propagation de 29,25 μ s (la longueur des impulsions représentées est beaucoup trop grande, en raison de limitations inhérentes au logiciel graphique utilisé; en réalité, leur longueur est égale à un huitième seulement de la longueur représentée). Dans les conditions d'essai choisies, un point cible renvoie en principe des échos pour 23 balayages du faisceau principal de l'antenne, dont 12 seulement apparaissent sur le diagramme. L'écho de cible réel étant synchrone, tous les échos apparaissent dans la même cellule de distance.

Les radars A et B disposent chacun d'une fonction de gain variable dans le temps sélectionnable par l'utilisateur et destinée à affaiblir les valeurs importantes d'écho de fouillis de mer grâce à la «désensibilisation» du récepteur, aux courtes distances uniquement. Ils sont également équipés d'une fonction de découpage des échos longs servant à différencier les signaux vidéo et à s'affranchir du fouillis de pluie.

3.2 Caractéristiques différenciant les radars A et B

3.2.1 Différences majeures

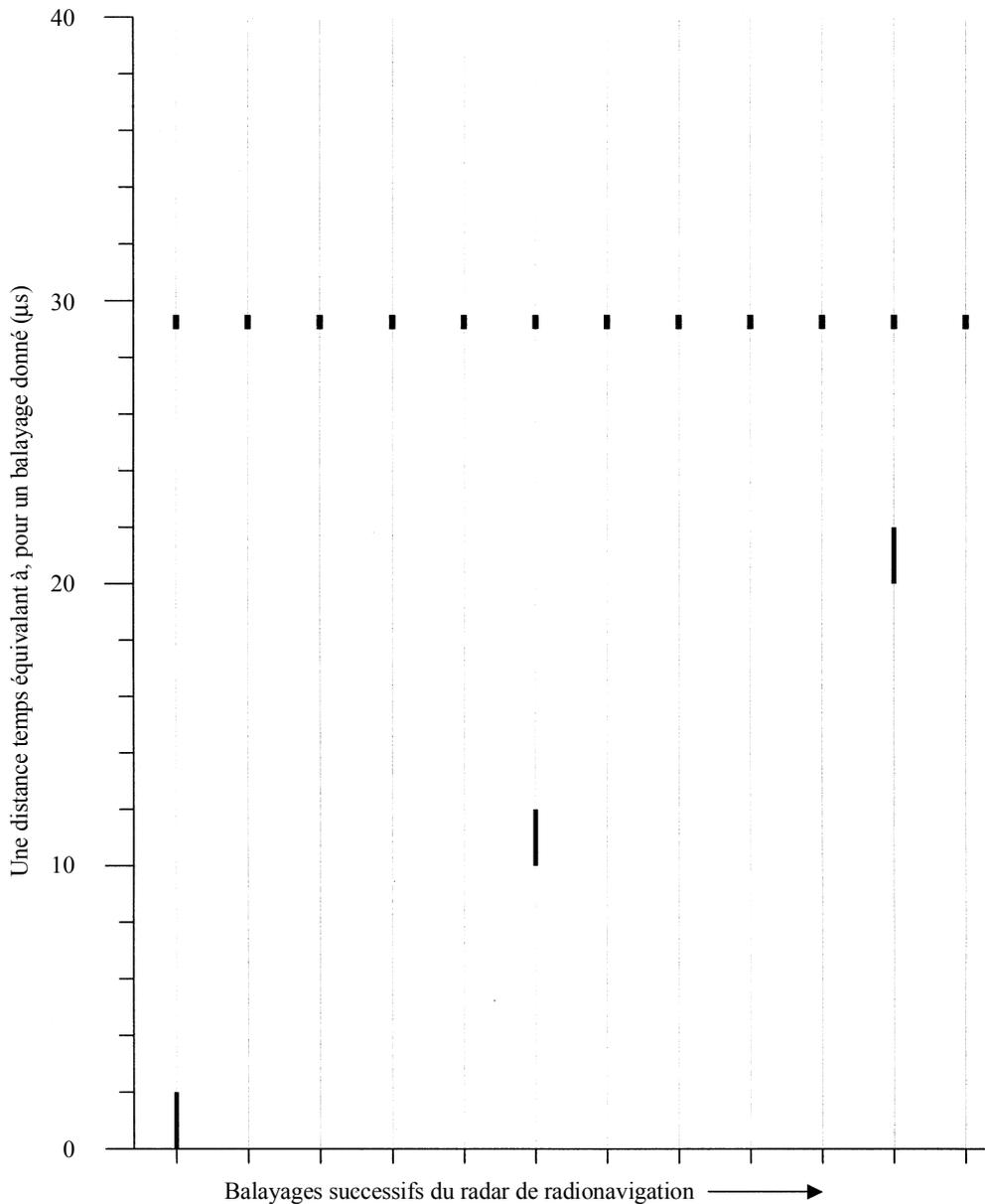
Le radar B comprend un préamplificateur RF et présente un facteur de bruit nominal de 4 dB. Le radar A n'a pas a priori de préamplificateur RF et son facteur de bruit se situe entre 9,3 et 11 dB. Le radar B offre davantage de possibilités en termes de traitement du signal et de poursuite de la cible; il dispose en particulier d'une fonction de taux de fausses alarmes prolongées (CFAR, *constant false alarm rate*) locale adaptative et d'une capacité de corrélation balayage à balayage. Le taux CFAR

² CRONEY J. [avril 1956], Clutter on radar displays. *Wireless Eng.*, p. 83-96.

local (relatif à une petite fraction d'un balayage en distance) est une technique du type connu sous le terme de CFAR ordonné statistiquement, qui permet de diminuer ou d'éviter l'effet de désensibilisation des impulsions brouilleuses. Avec ce type de technique, on peut éliminer un nombre sélectionnable d'échantillons de signaux de bruit de fond (contenus dans les cellules de distance), de telle façon que seuls ceux qui restent (et en particulier les échantillons de plus forte intensité) puissent être utilisés pour déterminer le seuil de détection. Le processus élimine les échantillons ayant la plus forte amplitude, de sorte que plus on élimine d'échantillons, plus l'incidence des impulsions de forte amplitude sur le degré de sensibilité du processus de détection des cibles réelles devrait être faible.

FIGURE 1

Occurrence d'impulsions asynchrones de 2 μ s apparaissant pour des balayages radar et certaines cellules de distance



Le radar B peut également déclencher un processus de corrélation balayage à balayage, ce qui constitue un moyen supplémentaire de différenciation entre des signaux présents constamment (tels que ceux provenant d'une cible réelle) et des signaux aléatoires (brouillages causés par des impulsions asynchrones par exemple).

La sophistication plus grande du traitement du signal offert par le radar B tient aux progrès réalisés dans le domaine des microcircuits numériques (réduction des coûts comprise) depuis l'époque où le radar A a été conçu. La mise en œuvre de ce traitement local CFAR nécessite beaucoup de mémoire numérique, ce qui n'était pas possible lorsque le radar A a été développé. Ces caractéristiques devraient également être améliorées dans les futurs radars de radionavigation maritime.

3.2.2 Différences mineures

Il existe également d'autres différences, plus subtiles, entre les deux radars. S'ils disposent tous deux d'amplificateurs FI logarithmiques, le radar A utilise des réseaux de diodes pour réaliser la mise en forme logarithmique dans l'amplificateur FI, alors que le radar B met en œuvre des étages amplificateur logarithmique/détecteur d'enveloppe (utilisation de plusieurs étages à gain FI logarithmique associés chacun à un détecteur d'enveloppe). Les sorties de ces étages amplificateur FI/détecteur sont sommées pour fournir un signal vidéo aux caractéristiques logarithmiques.

Les similitudes et les différences entre les radars de radionavigation maritime A et B sont récapitulées dans le Tableau 4.

TABLEAU 4

Similitudes et différences entre les radars de radionavigation maritime A et B

Caractéristiques	Radar A	Radar B
Localisation des circuits d'émission et de réception	Sous le pont	Au pied de l'antenne
Type d'amplificateur FI	Amplificateur logarithmique	Amplificateur logarithmique /détecteur
Couplage vidéo	Alternatif	Alternatif
Fonction de gain variable dans le temps	Oui (réglable par l'opérateur)	Oui (réglable par l'opérateur)
Fonction de découpage des échos longs	Oui (réglable par l'opérateur)	Oui (réglable par l'opérateur)
Elimination des impulsions asynchrones (élimination des brouillages)	Comparaison entre deux impulsions	Comparaison entre trois impulsions avec remplacement éventuel (voir le texte)
Commande automatique de gain	Oui (réglable)	Oui (réglable)
Autoréglage	Non	Oui
Préamplificateur RF	Non	Oui
Commande du taux de fausses alarmes	Manuelle	CFAR local adaptatif (pour les cibles synthétisées uniquement)
Corrélation de balayage à balayage	Non	Active sur les symboles de cibles synthétisées
Intensité d'affichage	2 niveaux non nuls	Jusqu'à 15 niveaux non nuls
Type d'affichage	Balayage radial en temps réel	Balayage récurrent
Persistance	Constante sur l'écran cathodique phosphorescent	Variable

3.3 Mesures de la largeur de bande FI et du facteur de bruit pour les récepteurs des radars A et B

Le seuil de bruit d'un récepteur radar a été calculé en sommant kTB (B étant la largeur de bande FI à 3 dB) et le facteur de bruit.

3.3.1 Radar A

La largeur de bande FI mesurée à 3 dB est de 21,3 MHz lorsque les paramètres du radar sont réglés pour une exploitation à courte distance (de 0,25 à 3 milles marins, c'est-à-dire de 0,46 à 5,56 km environ), ce qui est très proche des spécifications indiquées dans les manuels techniques.

Le facteur de bruit mesuré pour le récepteur du radar A est de 11 dB, ce qui est supérieur de 1 dB à la spécification indiquée dans un manuel technique (10 dB) et de 1,7 dB à celle indiquée dans un autre manuel (9,3 dB). On a calculé pour ce radar un seuil de bruit égal à -90 dBm.

3.3.2 Radar B

De nouvelles mesures ont été effectuées pour le radar B afin de mieux caractériser sa réponse FI. Il s'agissait en particulier de déterminer sa réponse entrée-sortie, sa sélectivité FI (pour une distance de 3 milles marins) ainsi que son facteur de bruit.

Comme on l'a indiqué plus haut, le radar utilise plusieurs étages d'amplification FI logarithmique/de détection. Les essais ont montré une élimination allant jusqu'à 70 dB aux fréquences hors syntonisation dans la bande 2 900-3 100 MHz ainsi qu'une forte dynamique. La dynamique du radar est illustrée sur la Fig. 2 et on trouvera sur la Figure 3 la réponse du circuit FI en un point de test de la sortie vidéo du radar réglé pour une portée de 3 milles marins (5,56 km).

FIGURE 2
Dynamique du radar B

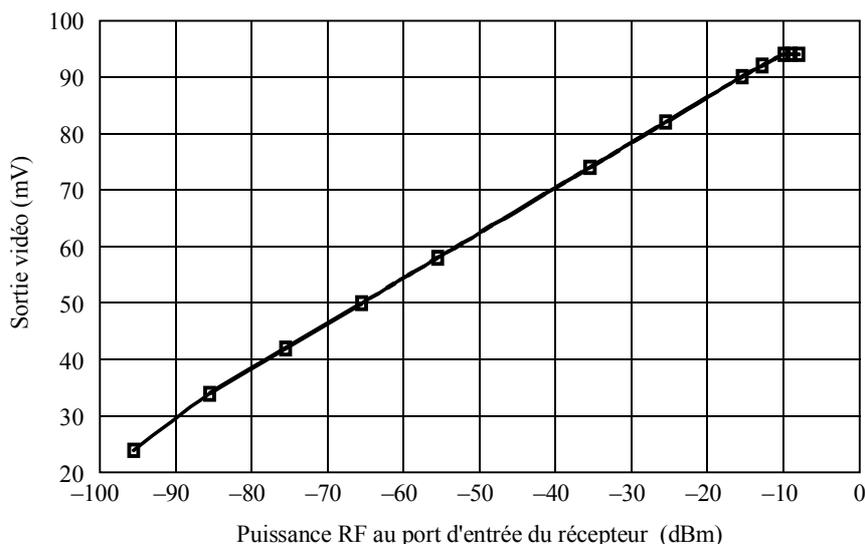
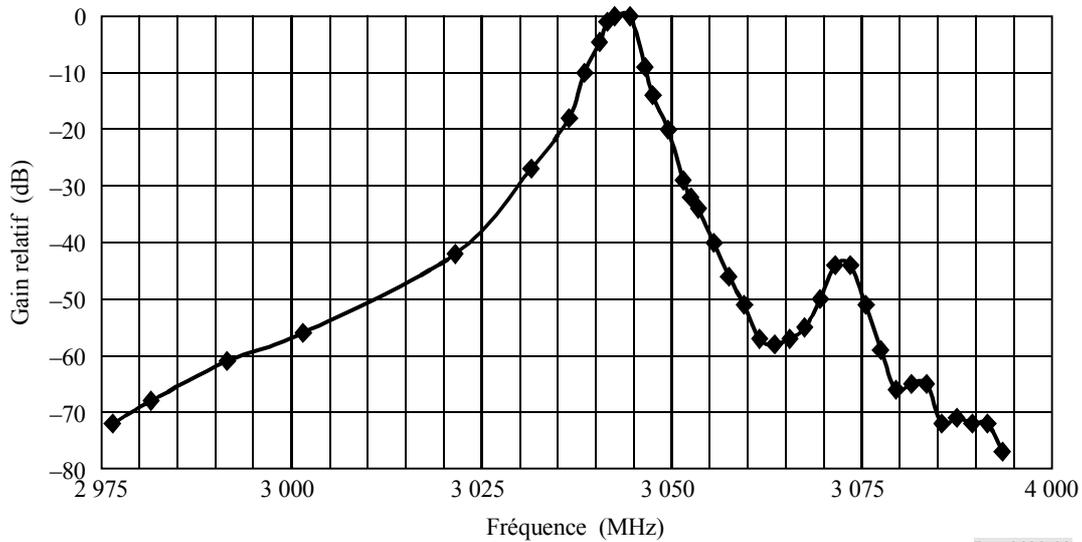


FIGURE 3
Sélectivité FI du radar B



Rap 2032-03

Des mesures pour un niveau de signal vidéo légèrement supérieur au niveau minimal du signal visible à mi-impulsion font apparaître une réponse parasite (voir la Fig. 3) qui a été atténuée de 44 dB environ à 30 MHz au-dessus de la fréquence de syntonisation. Il n'y a aucune raison de supposer que cette réponse parasite ait eu une incidence quelconque sur les résultats des essais. Toutefois, des radars de radionavigation présentant des réponses parasites risquent de détecter des formes d'onde continues aux fréquences hors syntonisation.

On a obtenu pour le facteur de bruit du radar B une valeur mesurée de 5,3 dB, ce qui est cohérent avec la valeur nominale de 4 dB. Le seuil de bruit calculé pour ce radar est de -104 dBm.

3.4 Affichage des cibles et du signal vidéo pour les radars A et B

Le radar A a deux niveaux non nuls d'intensité pour l'affichage à l'écran des détections, alors que le radar B en a 3 ou 15, selon le choix de l'opérateur. Le radar A est équipé d'un écran panoramique à balayage radial sur lequel les cibles apparaissent sous forme de tâches ("blips") amorphes vidéo brutes (affichage image). L'affichage de l'«image» radar se fait donc en temps réel; les résultats des nouveaux balayages apparaissent à l'écran alors que persistent ceux des balayages précédents, toutefois affaiblis en intensité. La persistance visuelle à l'écran du radar A est liée aux caractéristiques de phosphorescence (noter toutefois que le réglage de la luminosité risque de modifier le niveau de persistance visuelle perçue). Les symboles vidéo des cibles synthétisées n'apparaissent pas à l'écran, mais les impulsions d'écho provenant de cibles situées au-delà de la portée radar choisie sont renforcées pour que leur visibilité soit meilleure.

Le radar B dispose, quant à lui, d'un écran à balayage par points. Les signaux obtenus après traitement des échos radar numérisés sont mis en mémoire, et l'affichage sur l'écran à points synthétisés se fait sur la base de ces valeurs mémorisées. L'écran n'est rafraîchi qu'après plusieurs balayages consécutifs à la réception de l'écho radar. Le rafraîchissement se fait par secteurs consécutifs d'environ 15°, plutôt que par pas radiaux continus, balayage après balayage. Le degré de persistance de l'affichage est réglable par l'opérateur.

Différents types de cibles, associées de diverses manières, peuvent être affichés à l'écran du radar B. On peut observer des «tâches» amorphes, des cibles synthétisées signalées par un «o» et/ou des cibles poursuivies marquées d'un «x». La luminosité d'une cible sur l'image vidéo correspond au

niveau d'écho renvoyé par cette cible. Plus la «tâche» à l'écran est lumineuse, plus l'écho renvoyé est fort. Il faut pour les cibles synthétisées environ 2 à 3 dB de puissance supplémentaire par rapport au cas des cibles vidéo brutes si l'on veut obtenir la même probabilité de détection qu'en exploitation de signal minimal détectable; la luminosité à l'écran des cibles synthétisées ne dépend par contre pas de l'intensité du signal réfléchi.

4 Mesures de la qualité de fonctionnement

4.1 Résumé des essais relatifs aux émissions brouilleuses

Ces essais avaient essentiellement pour objet de déterminer l'incidence des impulsions asynchrones d'un radar de radiolocalisation sur l'occurrence des fausses alarmes, sur la probabilité de détection de cibles réelles et sur le degré de visibilité de cibles réelles détectées parmi de fausses alarmes. La simulation des cibles réelles est décrite au § 4.2. On a d'abord réglé la puissance de sortie RF du générateur de cibles simulées de manière à obtenir des détections de cibles stationnaires avec une probabilité de détection constante. Outre les signaux des cibles simulées, des formes d'onde d'impulsions asynchrones ont ensuite été introduites dans le radar avant que les effets de ces impulsions sur la visibilité des cibles affichées soient observés et photographiés par un appareil numérique. Les signaux simulant les cibles et les signaux brouilleurs du radar de radiolocalisation ont été injectés directement dans le récepteur de navigation maritime, et non via un couplage au niveau de l'antenne.

Les résultats des essais sont exprimés sous la forme d'un rapport entre la puissance des formes d'onde brouilleuses et la puissance de bruit du système (rapport I/N). Des observations ont été faites pour de nombreux rapports I/N relatifs aux émissions P0N brouilleuses et aux formes d'onde à fréquences échelonnées. Les observations concernant les émissions P0N se rapportent à divers coefficients d'utilisation.

4.2 Génération de cibles

La Fig. 4 présente les équipements ayant permis de simuler des cibles. Les sorties en divers points du générateur de cibles sont indiquées sur la Fig. 5.

FIGURE 4

Equipements utilisés lors des essais pour simuler des échos de cibles et insérer des signaux brouilleurs

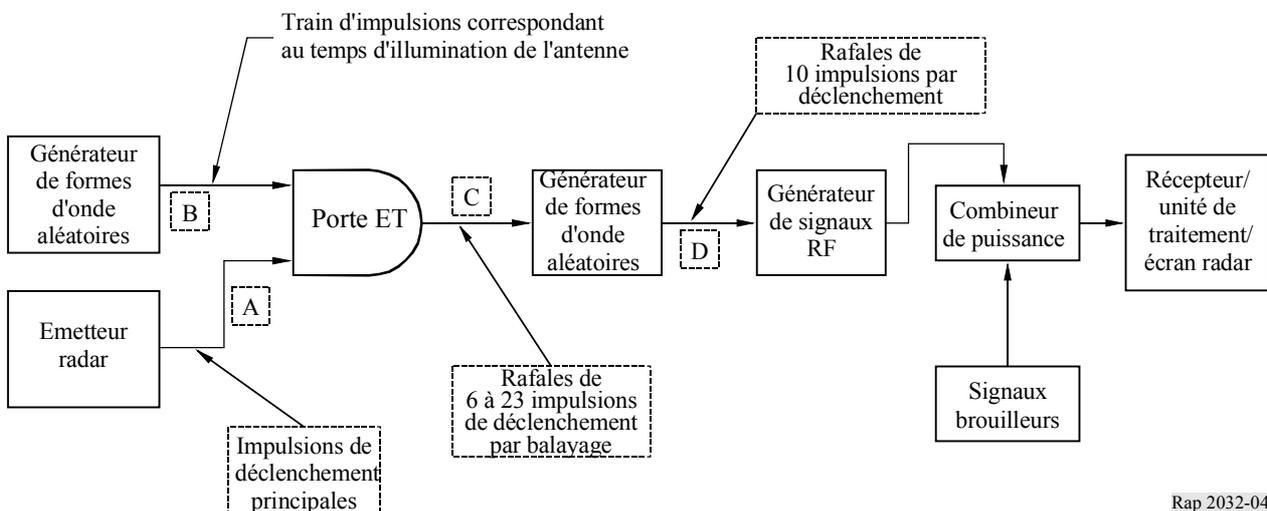
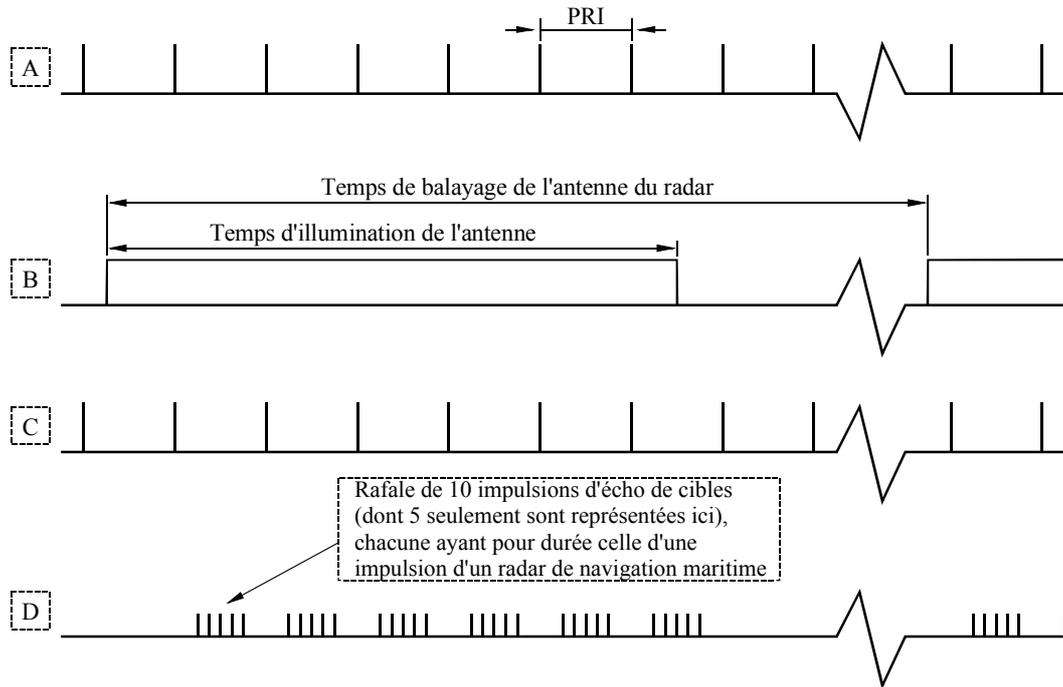


FIGURE 5

Formes d'onde types aux points A, B, C et D de la Fig. 2



Rap 2032-05

Le train (A) d'impulsions de déclenchement de l'émetteur a servi à initier le fonctionnement du générateur de cibles simulées. Un générateur d'impulsions fonctionnant en continu a été utilisé pour émettre des impulsions de gâchette (B) traduisant l'effet de modulation d'amplitude des échos de cibles dû au faisceau d'antenne. Les impulsions (A) et (B) constituent les entrées d'une porte ET, qui génère des salves (C) d'impulsions de déclenchement, contenant chacune de 6 à 23 impulsions. Chaque impulsion de déclenchement a été appliquée à un générateur de formes d'onde aléatoires, qui a permis de générer avec le retard approprié une salve de neuf à dix impulsions (D), ayant chacune pour durée celle des impulsions courtes ou des impulsions longues du radar considéré (généralement 0,06 ou 1 μ s pour le radar A et 0,08 ou 1,2 μ s pour le radar B). Le nombre des impulsions générées n'était que de neuf pour certains des essais à fréquences échelonnées, alors qu'il était de dix dans les autres cas (pour lesquels on parlera de «dix impulsions» ou «dix cibles»). Ces dix impulsions sont toutes renvoyées pour un seul et même «balayage» du radar, c'est-à-dire pour un affichage écran pendant la fraction de temps correspondant à un PRI. Chacune de ces impulsions module à son tour un générateur de signaux RF réglé à une fréquence proche de 3 050 MHz, ce qui génère un train d'impulsions correspondant aux échos des cibles simulées. La fréquence du générateur de signaux RF a été choisie de façon à optimiser la réponse du radar, ce qui permet de simuler des impulsions d'échos provenant des cibles réelles lorsque l'oscillateur local du récepteur est réglé sur la bonne fréquence.

Les dix impulsions d'écho de cibles déclenchées par une impulsion radar se produisent toutes durant le temps de propagation aller-retour associé à la portée du radar. Elles simulent donc dix cibles placées le long d'un axe radial, qui sont détectables en un seul relèvement.

On a simulé les dix cibles (neuf pour certains essais à fréquences échelonnées) équidistantes le long d'un axe radial, le radar étant exploité pour une portée de 3 milles marins (5,56 km). Pour cette distance, la largeur des impulsions émises par le radar A (respectivement le radar B) est automatiquement fixée à 0,06 μ s (respectivement 0,30 μ s) avec une FRI de 3 600 impulsions/s (respectivement 2 200 impulsions/s), la largeur de bande utilisée étant de 22 MHz (respectivement 3 MHz – bande FI). Le radar B a en outre fait l'objet d'un certain nombre d'autres essais pour

lesquels on a sélectionné manuellement une largeur d'impulsion de 80 ns, ce qui a conduit à l'utilisation d'une plus grande largeur de bande FI.

La puissance RF de la cible (c'est-à-dire le niveau de signal des échos de cibles simulées) a été réglée de telle façon qu'en l'absence de tout signal brouilleur, les dix cibles soient toutes à peine décelables et apparaissent sur l'écran radar panoramique sous forme de «tâches» régulièrement espacées lorsque les commandes vidéo du radar sont réglées en mode opérationnel normal. Après une vingtaine de balayages consécutifs, environ neuf cibles sur dix en moyenne étaient visibles le long de l'axe radial. Les cibles apparaissaient à l'écran sous forme de «tâches», comme on peut le voir sur les photographies figurant aux § 4.3 à 5 du présent Rapport. Le taux de répétitions des impulsions du générateur de cibles a été réglé de telle manière que l'azimut d'une cible à l'écran soit constant balayage après balayage. Pour certains essais concernant le radar B, des cibles ont également été générées de façon à apparaître à l'écran sous forme d'anneau sans découpage du train d'impulsions.

4.3 Signaux brouilleurs

Deux types de signaux de radiolocalisation ont servi de formes d'onde brouilleuses pour ces essais: une émission P0N générique syntonisée et une forme d'onde à fréquences échelonnées. Le signal brouilleur P0N a été utilisé pour les radars A et B, alors que la forme d'onde à fréquences échelonnées n'a servi que pour le radar B.

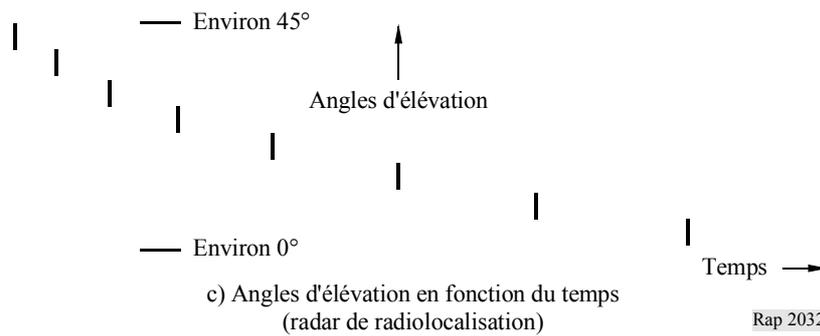
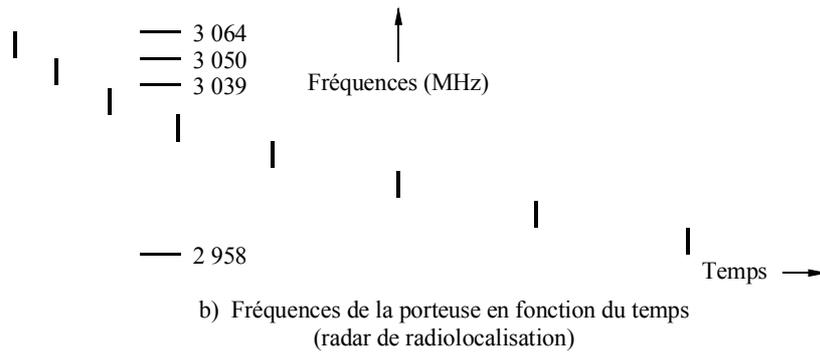
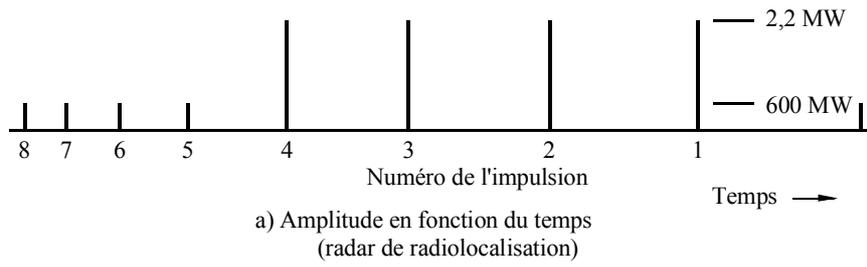
Les impulsions de type P0N syntonisées avaient une durée de 2 ou 10 μ s pour un coefficient d'utilisation de 0,1, 1, 5 ou 10%. Elles étaient asynchrones vis-à-vis des impulsions de cibles générées. Deux méthodes ont été appliquées pour insérer ces impulsions P0N. Suivant la première méthode, les impulsions P0N formaient un train continu d'impulsions simulant le signal brouilleur présent à chaque instant et pour tous les angles d'azimut. Il s'agit là de la modélisation d'un environnement très contraignant. Suivant la seconde méthode, le signal P0N était inséré de telle sorte que des impulsions apparaissent uniquement dans la largeur de faisceau horizontal du radar maritime suivant l'angle d'azimut de la génération de cibles. L'adjonction d'un signal P0N simule le cas plus réaliste où le radar maritime «voit» un radar de radiolocalisation dans son faisceau principal.

Le second signal de radiolocalisation correspond à une reconstitution analogique d'enregistrements numériques des formes d'onde émises par un radar générant des impulsions à fréquences échelonnées de 27 μ s dont les caractéristiques et paramètres d'exploitation sont semblables à ceux du radar 2 de la Recommandation UIT-R M.1460. On le désignera dans le présent Rapport sous le terme de radar RL 2 (radar de radiolocalisation 2). Les schémas de la Fig. 6 ci-dessous présentent les évolutions temporelles de la puissance, de la fréquence et de l'angle d'élévation des impulsions émises par le radar RL 2. A noter qu'il existe des fréquences échelonnées dans chaque impulsion (on a représenté sur la Fig. 6 des bandes de fréquences continues, pour plus de simplicité) ainsi qu'entre les impulsions successives.

Deux diagrammes d'antenne dans le plan horizontal ont également été mesurés pour le radar RL 2, grâce aux données enregistrées. Un diagramme a été mesuré à 3 050 MHz, qui est la fréquence nominale en bande S des radars de radionavigation maritime. L'angle d'élévation du faisceau principal étant grand à cette fréquence, le diagramme horizontal correspond à une coupe à travers un lobe latéral (celui de plus forte amplitude ayant à peu près le même angle d'azimut que le faisceau principal). Le second diagramme a été mesuré à 2 957 MHz, fréquence pour laquelle le faisceau principal du radar est dans le plan de l'horizon.

Des essais précédents ont permis de mesurer le diagramme d'antenne du radar B dans le plan horizontal. Des diagrammes de gain mutuel d'antenne à 2 957 et 3 050 MHz ont été élaborés à partir des diagrammes des radars RL 2 et B; ils indiquent l'intensité du couplage d'antenne entre ces deux radars. On trouvera ces diagrammes aux Fig. 7 et 8, respectivement pour les fréquences 2 957 MHz et 3 050 MHz.

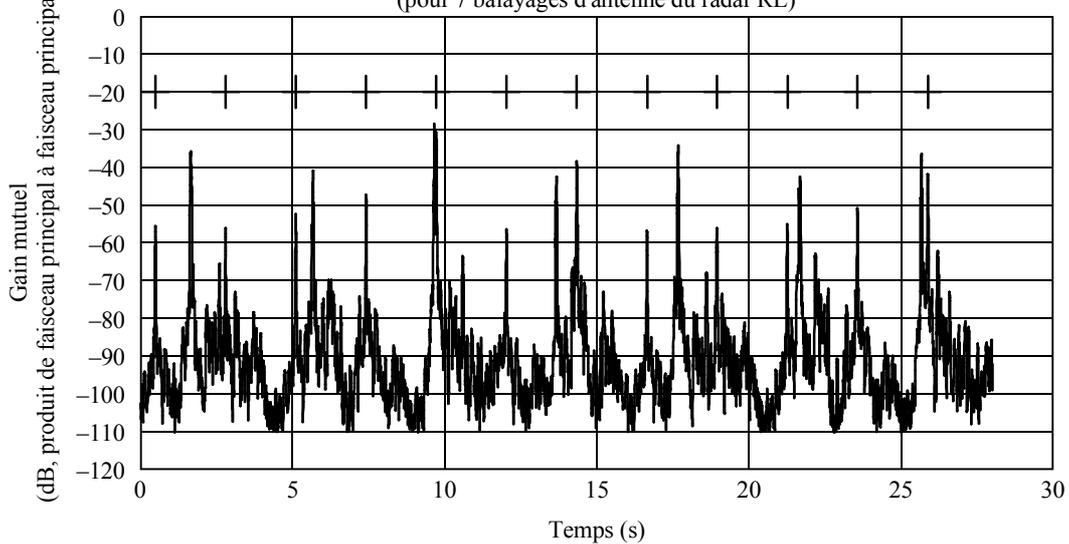
FIGURE 6
Chronogramme du radar RL 2



Rap 2032-06

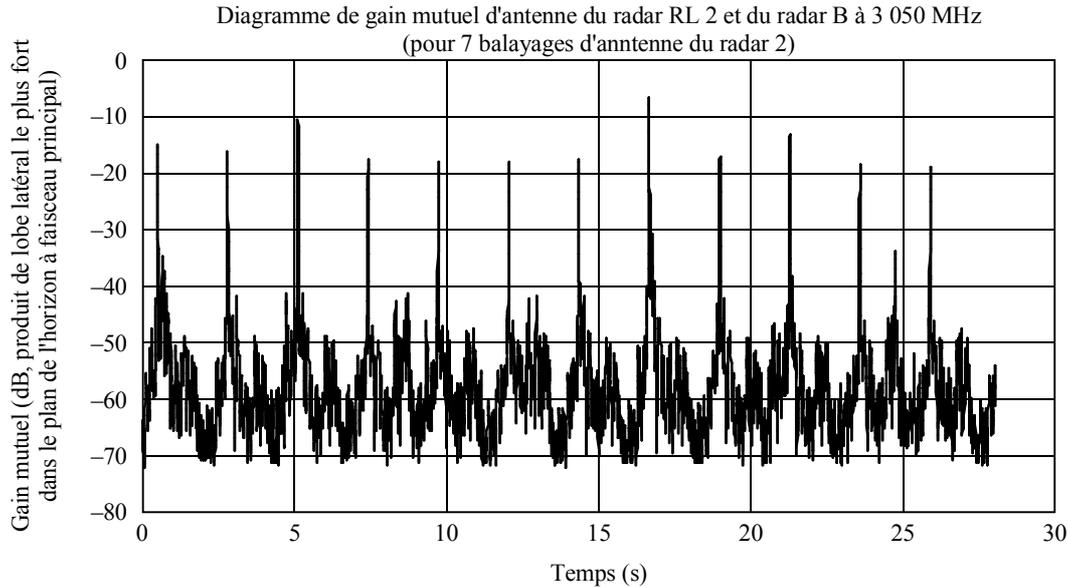
FIGURE 7
Diagramme de gain mutuel d'antenne à 2 957 MHz

Diagramme de gain mutuel d'antenne du radar RL 2 et du radar B à 2 957 MHz
(pour 7 balayages d'antenne du radar RL)



Rap 2032-07

FIGURE 8

Diagramme de gain mutuel à 3 050 MHz

Sur la Fig. 7, le signe + indique les valeurs crêtes du faisceau principal du radar RL 2: une observation attentive nous montre qu'elles ne coïncident jamais avec les autres valeurs crêtes, dues au faisceau principal du radar maritime B. Le couplage faisceau principal à faisceau principal ne se produit donc que rarement. Ce diagramme et celui à 3 050 MHz (voir la Fig. 8) ont été utilisés dans certains essais pour moduler les trains d'impulsions brouilleuses à fréquences échelonnées.

A noter que sur les Fig. 7 et 8, les niveaux de référence à 0 dB correspondent aux gains mutuels maximaux possibles aux fréquences considérées. A 2957 MHz (Fig. 7), le niveau à 0 dB correspond au produit des gains des faisceaux principaux des deux radars puisque à cette fréquence, le faisceau principal de chaque radar se trouve dans le plan de l'horizon. A 3 050 MHz par contre, le niveau à 0 dB correspond au produit du gain du lobe latéral le plus fort dans le plan de l'horizon par le gain du faisceau principal du radar de navigation maritime. Chacune de ces configurations à 0 dB ne se produit qu'extrêmement rarement, comme le suggèrent les Fig. 7 et 8.

4.4 Récapitulatif des conditions d'essai

Les essais ont été réalisés avec comme paramètres des radars de radionavigation maritime les valeurs indiquées dans le Tableau 5.

TABLEAU 5

Réglage des paramètres de commande des radars A et B

Paramètres	Réglages
Largeur d'impulsion (ns)	60 (radar A), 300 (radar B)
Fonction de gain variable dans le temps	Désactivé
Fonction de découpage des échos longs	Désactivé (réglage par défaut)
Elimination des brouillages	Activé (réglage par défaut) ou désactivé
Commande automatique de gain	Activé (réglage par défaut)
Image sélectionnée	Données vidéo brutes («image») et/ou cibles synthétisées ⁽¹⁾
Portée	3 milles marins

⁽¹⁾ La synthèse de cibles n'était possible que pour le radar B.

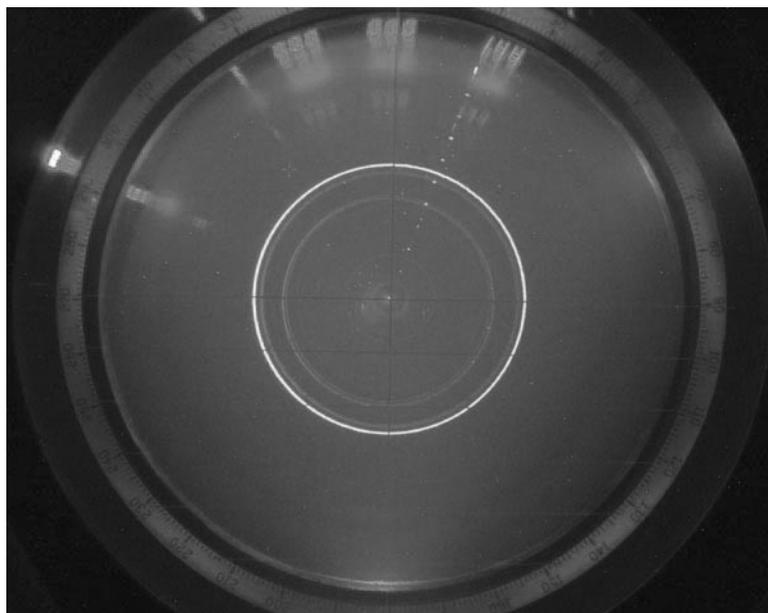
Puisqu'elle est activée par défaut sur les deux radars, la fonction d'élimination des brouillages a été mise en œuvre pour la plupart des essais. Elle a cependant été désactivée pour certains essais pour que son efficacité puisse être mieux évaluée. On a choisi une portée de 3 milles marins (5,56 km), car c'est celle qui est généralement utilisée pour éviter les collisions dans les ports et pour la navigation en eaux intérieures.

4.5 Procédures d'essai

La puissance de sortie RF du système générateur de cibles a été réglée de telle sorte que la probabilité de détection d'une cible soit de 90% en l'absence de signal de radiolocalisation. Pour le radar A, cette valeur était d'environ -81 dBm au port de réception du circulateur. Elle était pour le radar B d'environ -90 dBm à l'entrée du guide d'onde du récepteur, placée après l'antenne mais avant le circuit RF de mélange. On trouvera respectivement sur les Fig. 9 et 10 des photographies numériques des écrans panoramiques des radars A et B en configuration de base (pas d'insertion de signaux de radiolocalisation). Remarquer que les données brutes vidéo des cibles apparaissent le long d'un rayon situé à environ 20° pour le radar A et 320° pour le radar B. On distingue également sur l'écran du radar B des échos de fouillis local dus à des bâtiments ainsi qu'un léger "speckle".

FIGURE 9

Configuration de base du radar A avec affichage de cibles vidéo à 20°

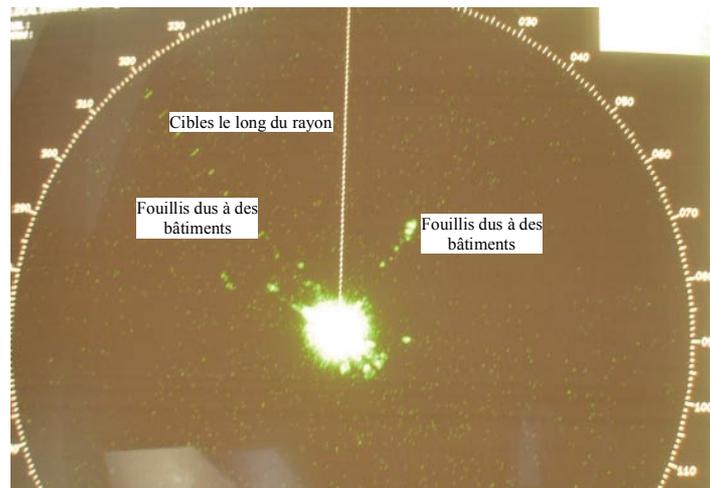


Rap 2032-09

Après que les radars ont été réglés à leur configuration de base, des émissions brouilleuses de radiolocalisation ont été introduites dans les récepteurs radar. On a fait varier le niveau de puissance du signal brouilleur de radiolocalisation tout en maintenant à un niveau constant la puissance renvoyée par les cibles. A mesure que variait le niveau de puissance du signal de radiolocalisation, on a observé l'évolution de l'affichage radar, en termes de décroissance de la probabilité de détection des cibles et d'accroissement du nombre de fausses alarmes. Ces dernières se sont traduites dans certains cas par l'apparition de raies radiales («stroboscopiques») et dans d'autres cas par un accroissement de nombre de «tâches» ponctuelles distribuées ou "speckle".

FIGURE 10

Configuration de base du radar B avec affichage de cibles vidéo à 320°



Rap 2032-10

5 Résultats des essais

5.1 Radar A avec signal de radiolocalisation P0N brouilleur

On a observé les images cibles vidéo à l'écran du radar A après insertion dans le récepteur du radar d'émissions P0N syntonisées de $2 \mu\text{s}$ avec coefficient d'utilisation de 0,1 à 1%, les rapports I/N étant compris entre 20 et plus de 80 dB. Les impulsions ont été insérées de manière asynchrone sous forme d'un train continu d'impulsions. La fonction d'élimination des brouillages a été activée puis désactivée. Les rapports I/N ont été calculés en soustrayant les valeurs de seuil de bruit du § 3.3 aux niveaux des signaux de radiolocalisation appliqués.

En dépit de la faible puissance des échos de cibles, ces impulsions asynchrones n'ont pratiquement pas eu d'incidence sur la probabilité de détection des cibles, même pour des valeurs élevées du rapport entre la puissance des impulsions brouilleuses et la puissance de bruit du système, que la fonction d'élimination des brouillages soit activée ou non. La détection des cibles risque cependant d'être «masquée» (obscurcissement à l'écran) par de fausses alarmes en cas de désactivation volontaire de la fonction d'élimination des brouillages (cette fonction est activée par défaut).

Ces essais montrent que la commande de cette fonction d'élimination des brouillages est très importante pour permettre l'exploitation du radar en présence d'impulsions brouilleuses. En cas d'activation de cette fonction, l'écran affiche très peu de «tâches» de bruit de fond isolées réparties aléatoirement, appelées "speckle". Au contraire, en cas d'inactivation volontaire de cette fonction, un speckle du bruit de fond important apparaît, même si aucune impulsion brouilleuse n'a été insérée. Surtout, on ne détecte aucune impulsion brouilleuse tant que la fonction d'élimination des brouillages est activée, et ce même pour des valeurs très importantes du rapport I/N .

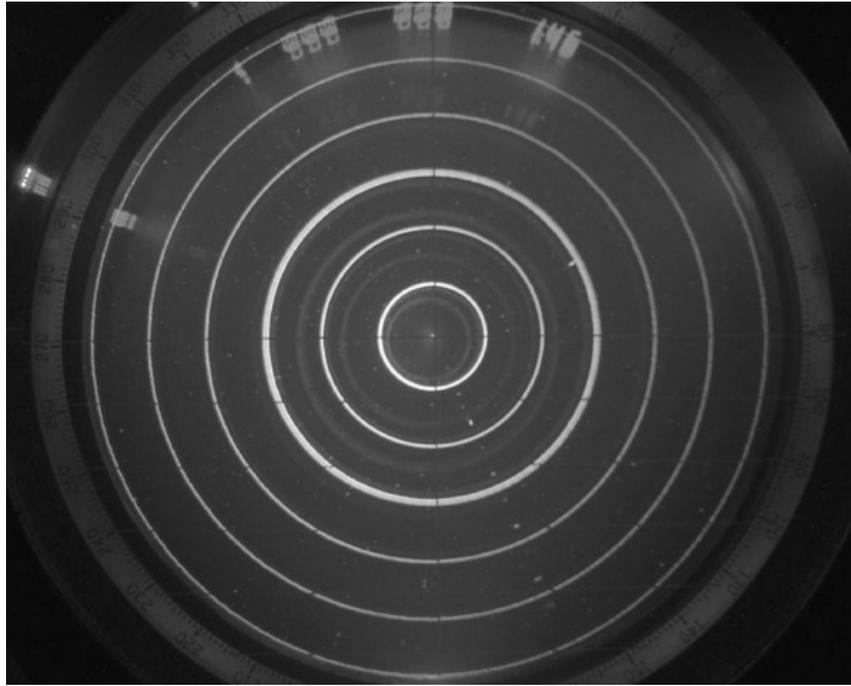
5.1.1 Radar A: impulsions P0N de $2 \mu\text{s}$ à 0,1% de coefficient d'utilisation

Le cas d'un coefficient d'utilisation du train d'impulsions de 0,1 %, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages lorsque le rapport I/N est de 80 dB, est illustré sur la Fig. 11. Les cibles sont distinctement visibles sur l'écran radar panoramique et seules quelques tâches aléatoires de speckle sont également présentes. Au contraire, en cas de désactivation de la fonction

d'élimination des brouillages, des impulsions P0N brouilleuses sont détectées et apparaissent à l'écran à un angle relatif d'environ 160° en cas d'insertion suivant des valeurs beaucoup plus faibles du rapport I/N (26 dB par exemple). Ce cas est illustré sur la Fig. 12, où des impulsions de relativement longue durée ($2 \mu\text{s}$) apparaissent sous forme de rayons pointillés alors que l'on peut à peine discerner les cibles (situées à un angle relatif d'environ 165°) parmi les brouillages.

FIGURE 11

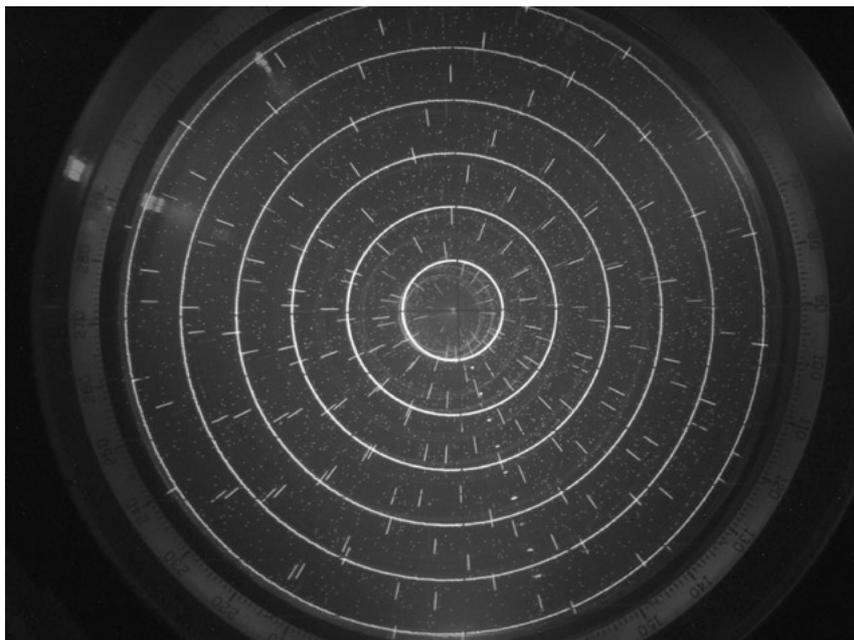
Radar A: impulsions brouilleuses de $2 \mu\text{s}$ à 0,1% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 80 \text{ dB}$)



Rap 2032-11

FIGURE 12

Radar A: impulsions brouilleuses de $2 \mu\text{s}$ à 0,1% de coefficient d'utilisation, avec désactivation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 26 \text{ dB}$)



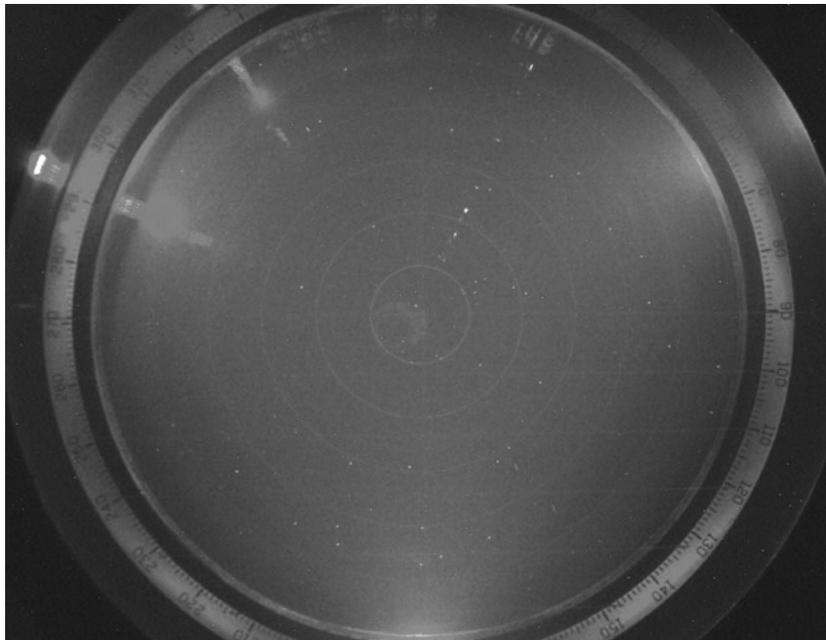
Rap 2032-12

5.1.2 Radar A: impulsions P0N de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation

La Fig. 13 illustre le cas d'un train d'impulsions de coefficient d'utilisation de 1% avec activation de la fonction d'élimination des brouillages, pour lequel on observe une absence de speckle de bruit de fond et l'absence de «fausses alarmes» (c'est-à-dire d'impulsions brouilleuses détectées). Le rapport I/N était de 62 dB mais les cibles étaient facilement visibles à un angle relatif d'environ 20°. Mais après désactivation de la fonction d'élimination des impulsions, des impulsions brouilleuses ont à nouveau été détectées et sont apparues à l'écran pour des valeurs beaucoup plus petites du rapport I/N , comme lorsque le coefficient d'utilisation était de 0,1%. L'image fortement brouillée de la Fig. 14 a ainsi été observée pour un rapport I/N de 23 dB, lorsque la fonction de réduction des brouillages était désactivée. Les cibles étaient situées à un angle relatif d'environ 120°.

FIGURE 13

Radar A: impulsions brouilleuses de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 62$ dB)



Rap 2032-13

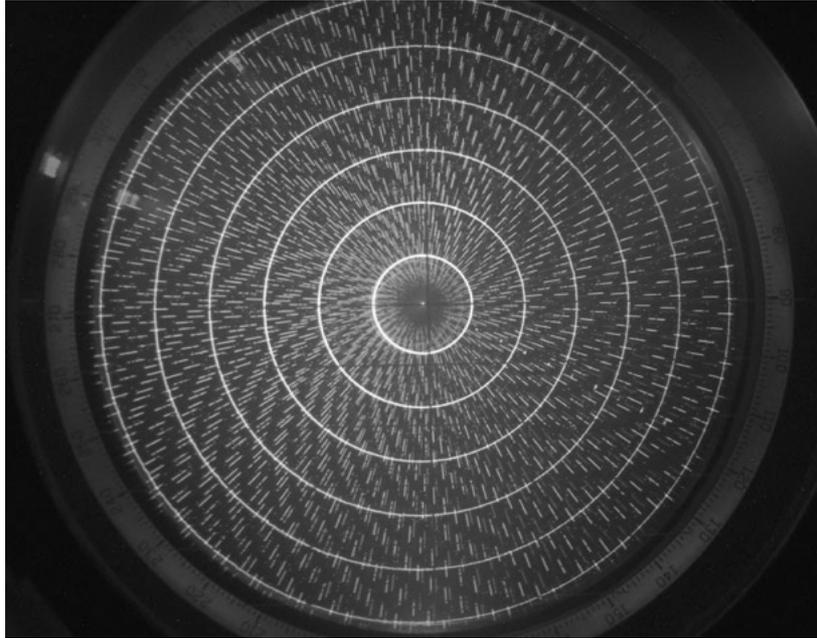
5.2 Radar B brouillé par un signal de radiolocalisation P0N

Des images cibles vidéo ont été observées à l'écran du radar B après insertion dans le récepteur d'émissions P0N syntonisées de 2 ou 10 μ s ayant des coefficients d'utilisation de 0,1, 1,5 ou 10%. Les impulsions ont été insérées de manière asynchrone. Pour certains essais, cette insertion a été faite avec utilisation de la porte ET (voir la Fig. 4) afin d'encadrer l'azimut de la cible; pour d'autres essais, les impulsions ont été insérées sans utilisation de la porte ET. La fonction d'élimination des brouillages était activée pour certains essais et désactivée pour d'autres.

Comme pour le radar A, les essais ont montré pour le radar B qu'en dépit d'une très faible puissance des échos de cibles, les impulsions brouilleuses asynchrones n'avaient pratiquement pas d'effet sur la probabilité de détection des cibles, même pour les valeurs élevées du rapport puissance des impulsions brouilleuses sur puissance de bruit du système. Ces observations étaient indépendantes de l'activation ou de la désactivation de la fonction d'élimination des brouillages. La détection des cibles pouvait toutefois être masquée par les fausses alarmes en cas de désactivation de la fonction d'élimination des brouillages (cette fonction est activée par défaut).

FIGURE 14

Radar A: impulsions brouilleuses de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation, avec désactivation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 23$ dB)



Rap 2032-14

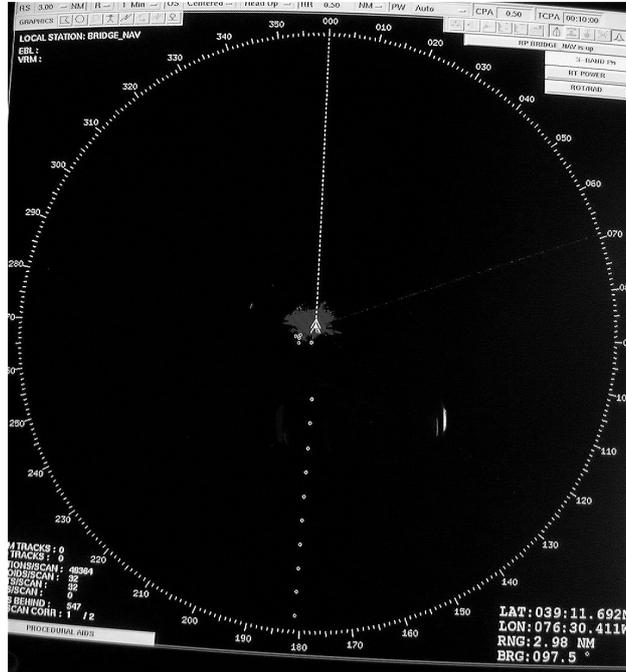
5.2.1 Radar B: impulsions P0N de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation

Des impulsions P0N de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation ont été insérées dans le radar maritime avec des niveaux de puissance tels que le rapport I/N soit de 80 dB en cas d'activation totale de la fonction d'élimination des brouillages et de 57 dB en cas de désactivation de cette fonction. Il convient de noter que, pour ces essais, le logiciel commandant la fonction d'élimination des brouillages était réglable. Le rapport I/N était de 80 dB (activation de la fonction d'élimination des brouillages) pour la Fig. 15 et de 57 dB pour la Fig. 16. On constate sur ces figures que le système radar était à même de compenser les effets dus aux impulsions P0N brouilleuses lorsque la fonction d'élimination des brouillages était activée (réglée à 100%). Dans les cas précités, le signal P0N brouilleur était inséré sans utilisation de la porte ET.

Pour la configuration de la Fig. 16, la commande IR était désactivée (réglée à 0%). On observe que des impulsions brouilleuses apparaissent sous forme de nombreux points détectés non traités, comme c'était le cas pour le radar A lorsque le coefficient d'utilisation était de 1%. Ces impulsions ne s'apparentent cependant à aucun des symboles (cibles synthétisées) obtenus après détection et traitement de données cibles, sauf éventuellement à proximité de la cible effective simulée. La raison en est peut-être l'utilisation sur le radar B d'un traitement CFAR local adaptatif lors de la génération de symboles de cibles synthétisées et de la mise en œuvre de la poursuite de cibles. Les impulsions à 2 μ s utilisées sont beaucoup plus longues que celles du radar B et couvrent 33 cellules de distance du radar B lorsque celui-ci est exploité à une portée de 3 milles marins (5,56 km). Grâce au CFAR local, on peut donc augmenter le seuil de détection des impulsions brouilleuses et empêcher qu'elles soient détectées. Le traitement local CFAR offre donc une forme de discrimination des largeurs d'impulsions, qui dépend des réglages CFAR choisis en usine et qui n'est généralement pas du ressort de l'opérateur de la console radar.

FIGURE 15

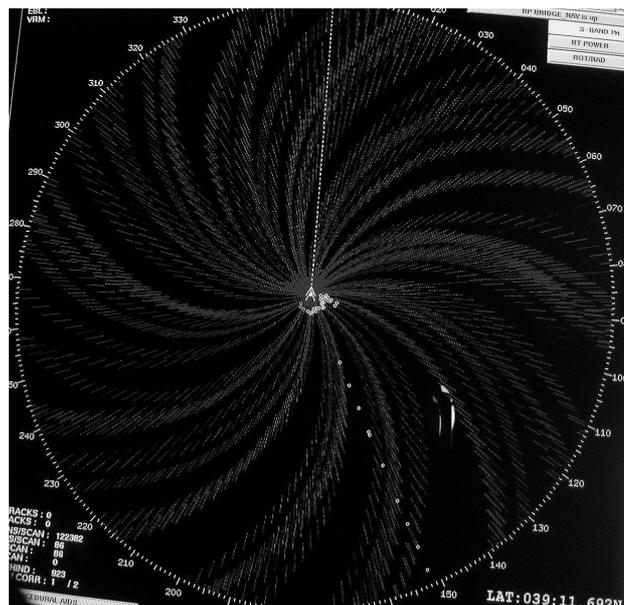
Radar B: impulsions brouilleuses de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 80$ dB)



Rap 2032-15

FIGURE 16

Radar B: impulsions brouilleuses de 2 μ s à 1% de coefficient d'utilisation, avec désactivation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 57$ dB)



Rap 2032-16

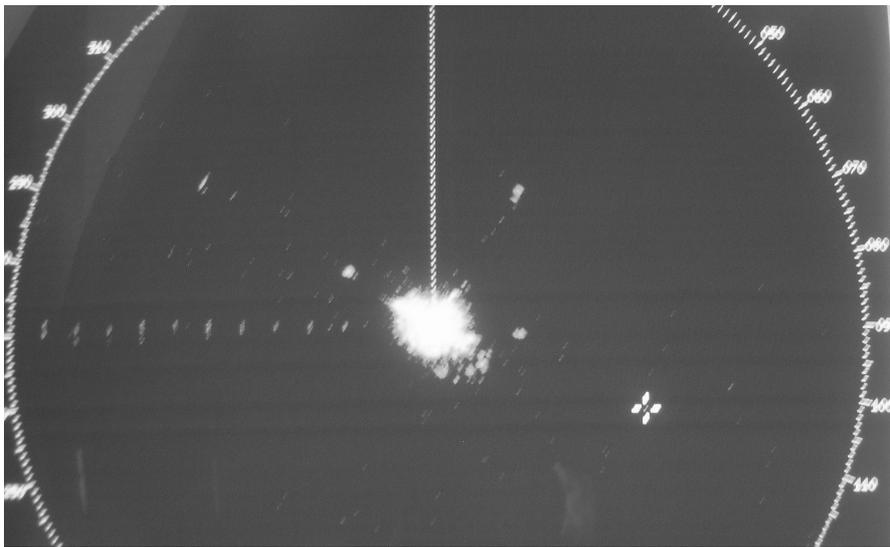
5.2.2 Radar B: impulsions P0N de 2 μ s à 5 ou 10% de coefficient d'utilisation

Des impulsions P0N de 2 μ s à 5 ou 10% de coefficient d'utilisation ont été insérées dans le radar maritime avec des niveaux de puissance tels que le rapport I/N soit de 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60 ou 80 dB.

L'introduction avec utilisation de la porte ET d'impulsions P0N de 2 μ s à 5% de coefficient d'utilisation n'a pas eu d'incidence à l'écran du radar B pour des valeurs de I/N allant jusqu'à 60 dB, en cas d'activation de la fonction d'élimination des brouillages. La Fig. 17 ci-dessous illustre cette configuration, lorsque les cibles sont placées à un angle relatif de 270°.

FIGURE 17

Impulsions (insérées avec utilisation de la porte ET) de 2 μ s à 5% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 60$ dB)



Rap 2032-17

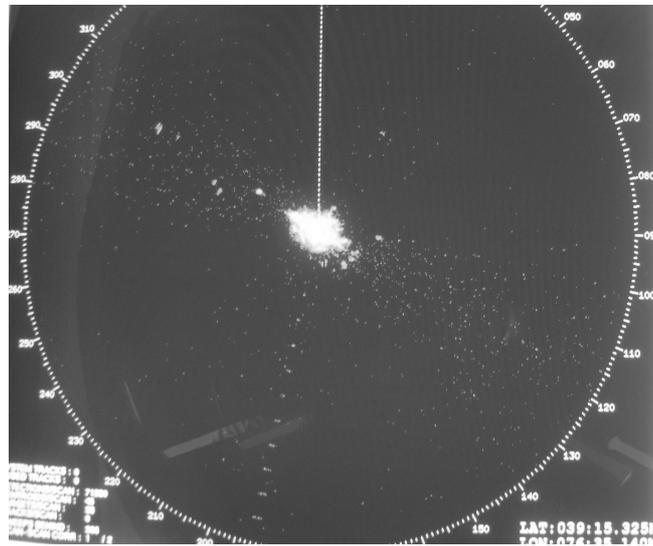
La fonction d'élimination des brouillages a à nouveau permis de s'affranchir des brouillages dans le cas d'une forme d'onde d'impulsions (insérées sans utilisation de la porte ET) de 2 μ s à 5% de coefficient d'utilisation, pour un rapport I/N de 60 dB. Ce cas est illustré sur la Fig. 18 ci-dessous, où l'on observe distinctement les cibles le long d'un axe radial à 190°, ainsi qu'un léger accroissement du speckle de bruit de fond.

On a commencé à observer à l'écran du radar maritime des effets dus aux impulsions (insérées avec utilisation de la porte ET) de 2 μ s à 10% de coefficient d'utilisation, dans le cas d'une activation de la fonction d'élimination des brouillages et d'un rapport I/N égal à 15 dB. Ce cas fait l'objet de la Fig. 19 ci-dessous, où l'on constate que les cibles sont situées suivant un angle relatif de 190°, mais sont fortement obscurcies.

Ce résultat peut sembler contredire les autres résultats d'essais relatifs aux brouillages P0N. Il s'agit d'un cas unique où l'entité de traitement/les circuits du radar B ne semblent pas être à même de compenser les brouillages, en raison de la durée et de la FRI de radiolocalisation. Il convient toutefois de noter qu'aucun radar de radiolocalisation fonctionnant en bande S et émettant des impulsions de 2 μ s à 10% de coefficient d'utilisation n'a été identifié à ce jour. Il est en outre probable que les radars de radiolocalisation à coefficient d'utilisation élevé actuellement susceptibles d'être identifiés sont agiles en fréquence et/ou émettent des impulsions fortement comprimées ("chirps") dont l'énergie est répartie sur une bande de fréquences plus large que la bande passante d'un radar de navigation. La FRI en bande S est presque toujours beaucoup plus petite que la valeur utilisée ici (50 kHz).

FIGURE 18

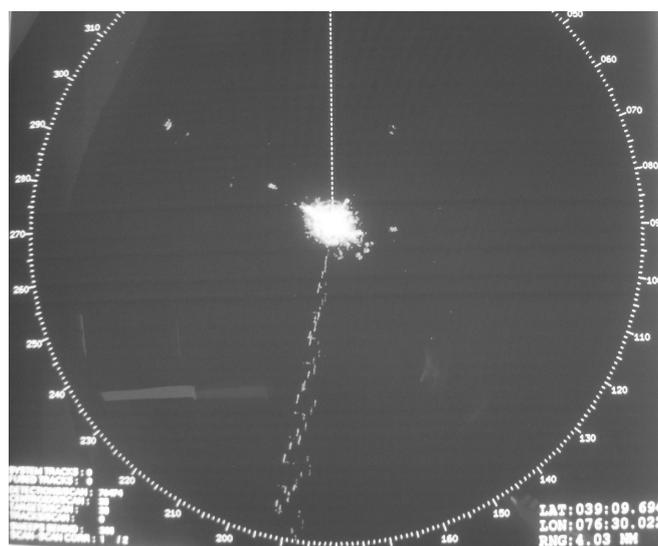
Impulsions (insérées sans utilisation de la porte ET) de 2 μ s à 5% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 60$ dB)



Rap 2032-18

FIGURE 19

Impulsions (insérées avec utilisation de la porte ET) de 2 μ s à 10% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 15$ dB)



Rap 2032-19

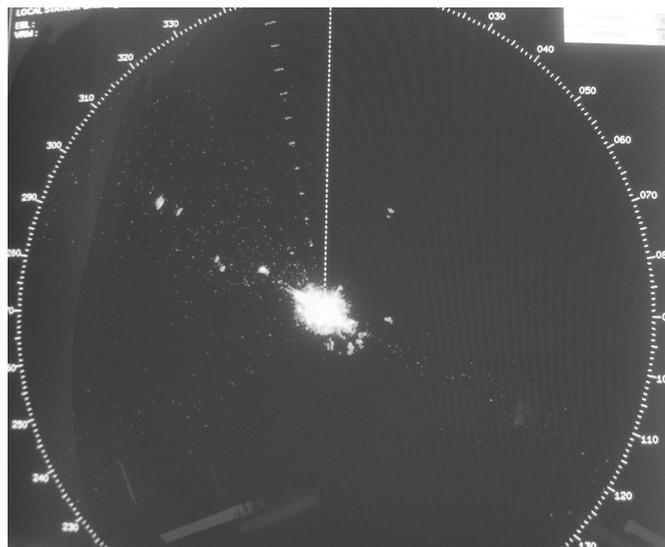
5.2.3 Radar B: impulsions P0N de 10 μ s

On a inséré dans le radar maritime des impulsions P0N 10 μ s à coefficient d'utilisation de 0,1, 1, 5, ou 10%, avec des niveaux de puissance tels que le rapport I/N soit égal à 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60 ou 80 dB.

Les essais montrent que le logiciel/les circuits d'élimination des brouillages du radar maritime permettent de traiter les effets des impulsions P0N (insérées avec utilisation de la porte ET) de 10 μ s présentant un coefficient d'utilisation allant jusqu'à 10% lorsque le rapport I/N est de 60 dB. La Fig. 20 correspond au cas d'un rapport I/N égal à 60 dB, avec insertion d'impulsions brouilleuses conjointement à celles des cibles simulées (utilisation de la porte ET) et activation de la fonction d'élimination des brouillages. Les cibles sont toujours distinctement visibles le long d'un rayon à 350°, de même que le fouillis de bruit de fond habituel. Le speckle de bruit de fond est à peu près à son seuil plancher.

FIGURE 20

Impulsions (insérées avec utilisation de la porte ET) de 10 μ s à 10% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 60$ dB)



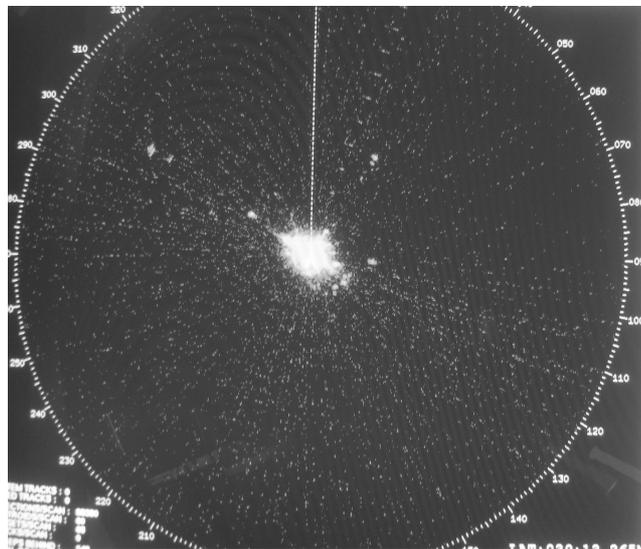
Rap 2032-20

La Fig. 21 illustre le cas d'impulsions P0N brouilleuses (insérées sans utilisation de la porte ET) lorsque la fonction d'élimination des brouillages est activée, pour un coefficient d'utilisation de 10% et un rapport I/N de 60 dB. Les cibles restent visibles suivant un rayon à environ 30°, mais le fond d'écran présente des lignes radiales de "speckle".

L'examen des différences entre les Fig. 20 et 21 concernant la présence de speckle de bruit de fond et la présence de fausses cibles indique que, dans le cas d'impulsions de brouillage insérées avec utilisation de la porte ET, le traitement/le circuit associé à la fonction d'élimination des brouillages permet d'améliorer très fortement la visibilité des informations présentes à l'écran radar, lorsque I/N est égal à 60 dB. Lorsque I/N est fixé à 80 dB, l'écran s'éclaircit et les cibles apparaissent moins nettement.

FIGURE 21

Impulsions (insérées sans utilisation de la porte ET) de 10 μ s à 10% de coefficient d'utilisation, avec activation de la fonction d'élimination des brouillages ($I/N = 60$ dB)



Rap 2032-21

5.2.4 Signaux de radiolocalisation à fréquences échelonnées (radar B uniquement)

On a observé les données brutes vidéo de cibles à l'affichage du radar B après insertion au niveau de son récepteur d'impulsions syntonisées ou non (par rapport au radar B), émises par le radar RL 2. Les émissions syntonisées étaient formées de trains périodiques de deux impulsions à fréquences échelonnées, pour lesquelles les fréquences de porteuse des sous-impulsions étaient comprises entre environ 3038 et 3064 MHz. Ces fréquences couvraient la largeur de la bande passante du radar B lorsque ce dernier était exploité pour une portée de 3 milles marins, pour des valeurs par défaut de la largeur d'impulsions et de la largeur de bande FI. A ces fréquences d'émission, le faisceau principal de l'antenne du radar de radiolocalisation avait un angle d'élévation élevé, et le couplage avec le radar B ne se produisait donc que pour ses lobes latéraux.

Les émissions non syntonisées étaient formées de trains périodiques de deux impulsions longues à fréquences échelonnées, pour lesquelles les fréquences de porteuse des sous-impulsions étaient comprises entre 2957 MHz et 2970 MHz. A ces fréquences d'émission, le faisceau principal de l'antenne du radar RL 2 était orienté suivant l'horizon ou à proximité de celui-ci. La directivité était donc maximale en direction des systèmes à la surface de la Terre, en particulier en direction des radars de navigation maritime.

Les émissions syntonisées ou non syntonisées contenaient toutes deux impulsions par période, chaque impulsion ayant une durée de 27 μ s et comprenant 9 sous-impulsions dont les porteuses étaient décalées de 1,5 MHz. Les fréquences de porteuses de chaque impulsion couvraient donc 12 MHz, et celles des formes d'onde syntonisées ou non syntonisées couvraient chacune environ 25,5 MHz. La période de la forme d'onde composite était d'environ 97 impulsions/s, qui est celle des émissions du radar de radiolocalisation pour le mode relatif aux impulsions syntonisées par rapport à celles des radars de navigation maritime. Les évolutions temporelles de la puissance, de la fréquence et de l'angle d'élévation des impulsions émises sont illustrées qualitativement sur la Fig. 3.

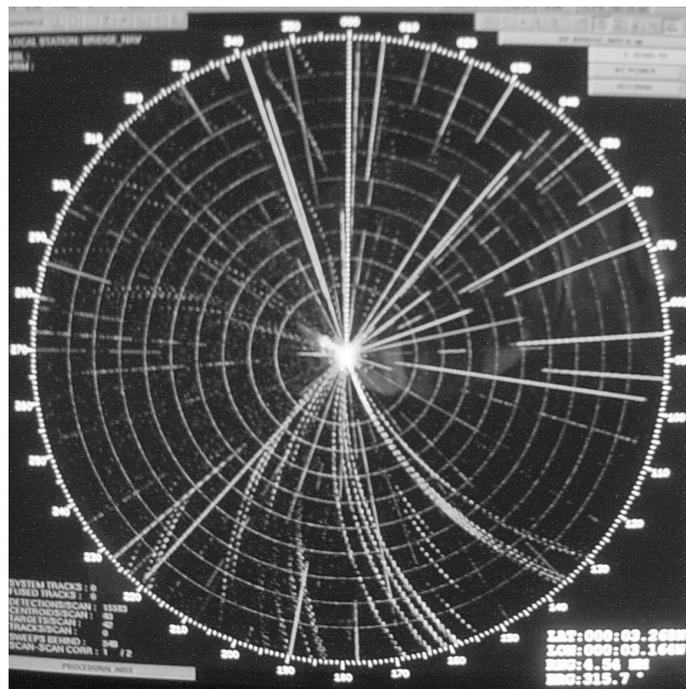
5.2.4.1 Signaux brouilleurs syntonisés

Dans le cas où les impulsions à fréquences syntonisées du radar RL 2 sont insérées sans simulation de la modulation du diagramme d'antenne (c'est-à-dire avec amplitude maximale durant la période de balayage du radar de radionavigation) et lorsque la fonction d'élimination des brouillages est désactivée, on observe des «images» des brouillages apparaissant sous la forme de raies radiales (stroboscopiques) réparties de manière dense sur les 360° de l'écran radar panoramique.

On a parfois appliqué au train d'impulsions syntonisées un diagramme de gain mutuel d'antenne déterminé à 3 050 MHz. Ce diagramme a été appliqué toutes les 4,9 s pour certaines observations, sa valeur crête maximale étant alors inférieure de 15 dB à la valeur maximale possible du gain mutuel d'antenne à cette fréquence (produit du lobe latéral le plus fort du radar RL 2 dans le plan horizontal par le gain du faisceau principal du radar de radionavigation maritime). Pour d'autres observations, on a appliqué ce gain toutes les 15 s, auquel cas la valeur crête maximale du gain mutuel était inférieure de 10,3 dB au gain mutuel le plus élevé possible. La valeur maximale de la puissance du signal brouilleur appliquée au radar B était la même quelle que soit la fréquence à laquelle ce diagramme de gain mutuel était utilisé; les seules différences concernaient l'interprétation des résultats en termes d'affaiblissement de propagation requis. Lorsque les modulations du diagramme d'antenne étaient appliquées à la forme d'onde du signal brouilleur alors que la fonction d'élimination des brouillages était toujours désactivée, les raies étaient plus rares et couvraient moins de 360° de l'écran radar panoramique, sauf en cas d'accroissement des valeurs crêtes du signal brouilleur tel que le rapport I/N devienne supérieur à 60 dB. Ces considérations sont illustrées par la Fig. 22 ci-après.

FIGURE 22

Radar B dans le cas de formes d'onde à fréquences échelonnées et syntonisées vis-à-vis des émissions de radionavigation, avec désactivation de la fonction d'élimination des brouillages

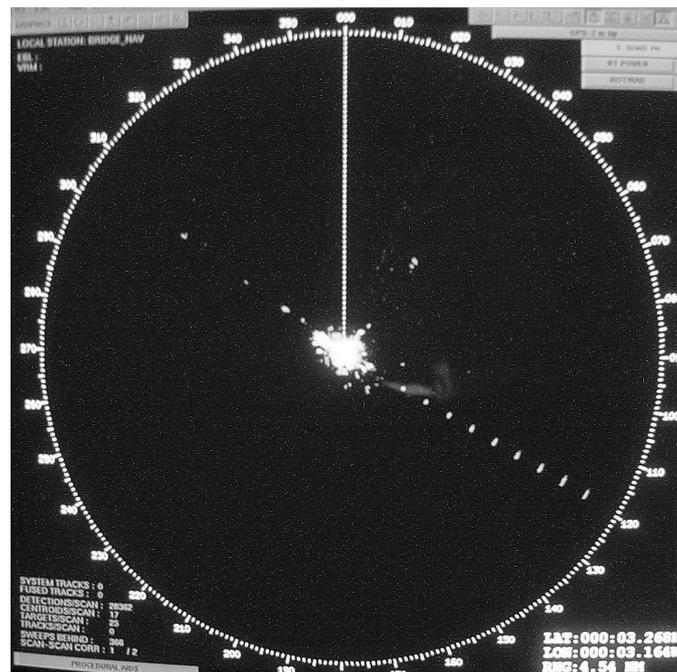


Les lignes radiales continues de type «stroboscopique» sont dues aux émissions de radiolocalisation à fréquences échelonnées générées par le radar RL 2. Les lignes spirales pointillées correspondent aux émissions (bien que l'antenne et le récepteur soient déconnectés) d'un radar de radionavigation exploité à proximité. Dans ce cas, les cibles apparaissent suivant un anneau de 360° (sans utilisation de la porte ET).

En cas d'application de la modulation de diagramme d'antenne sur le signal brouilleur syntonisé et d'activation de la fonction d'élimination des brouillages, les raies avaient pratiquement disparu ainsi que les spirales dues à l'autre radar de radionavigation maritime. Hormis un certain fouillis résiduel causé par les échos de structures avoisinantes, seules les cibles simulées étaient visibles sur l'écran radar panoramique, même lorsque les valeurs crêtes des impulsions brouilleuses observées pour les lobes de gain mutuel les plus forts utilisées pour les essais étaient supérieures d'environ 90 dB au seuil de bruit du récepteur. Concernant les statistiques des diagrammes de gain mutuel d'antenne, la valeur médiane du rapport I/N pour ces impulsions était d'environ 49 dB lorsque ce diagramme était appliqué toutes les 4,9 s, et d'environ 44 dB lorsque ce diagramme était appliqué toutes les 15 s. Ces considérations sont illustrées sur la photographie de la Fig. 23, prise quand le diagramme de gain mutuel était appliqué toutes les 4,9 s.

FIGURE 23

Radar B avec formes d'onde syntonisées à fréquences échelonnées et activation de la fonction d'élimination des brouillages



Rap 2032-23

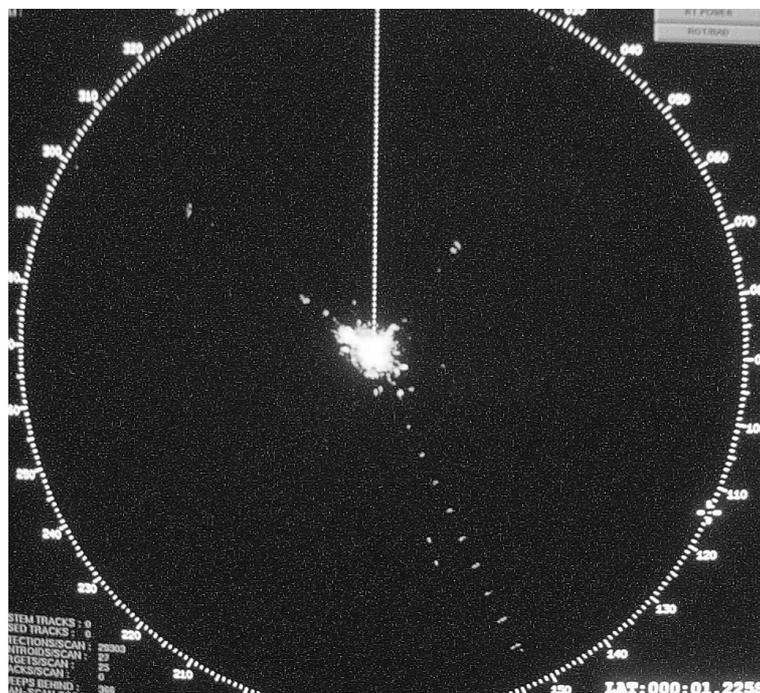
Le signal brouilleur n'a pratiquement eu aucune incidence sur la sensibilité de l'affichage à l'écran du radar de navigation maritime, qui présentait une probabilité de détection élevée (de pratiquement 100%) et des «tâches» cibles qui étaient donc bien visibles, pour un rapport S/N d'environ 15 dB. L'évanouissement constituait un facteur limitatif plus contraignant que la probabilité de détection. Il convient de noter que la fonction d'élimination des brouillages n'a pas eu d'incidence sur la sensibilité de détection des signaux utiles.

5.2.4.2 Signal brouilleur désynchronisé

Les résultats obtenus après application au radar B d'impulsions désynchronisées émises par le radar RL 2 étaient très proches de ceux observés pour des signaux brouilleurs désynchronisés. Un diagramme de gain mutuel d'antenne a constamment été appliqué au train d'impulsions brouilleuses, ce qui est un cas plus réaliste qu'une utilisation continue à pleine intensité de ces signaux. Ce diagramme, déterminé à 2957 MHz, a été appliqué à la partie à 2957 MHz du train d'impulsions émis par le radar RL 2, et ce, périodiquement toutes les 4,9 s (la Fig. 7 correspond à la première application de ce diagramme). Sa valeur crête maximale correspondait ainsi à un gain mutuel inférieur de 35,8 dB au produit des gains des faisceaux principaux des radars RL 2 et B (0 dB sur la Fig. 7). En cas d'application de la modulation du diagramme d'antenne à la forme d'onde du signal brouilleur alors que la fonction d'élimination des brouillages était désactivée, des rayons apparaissaient sur les 360° de l'écran radar panoramique lorsque les valeurs crêtes du signal brouilleur étaient supérieures d'environ 90 dB au seuil de bruit du récepteur (il n'a pas été fait d'observations pour des signaux brouilleurs moins forts). Lorsque la modulation du diagramme d'antenne était appliquée et la fonction d'élimination des brouillages activée, l'écran radar ne faisait apparaître que des «tâches» de cibles, des échos de fouillis et pratiquement aucune raie ou spirale due au signal brouilleur, pour les valeurs susmentionnées de ce signal (voir la Fig. 24). On peut observer sur la Fig. 7 que le gain mutuel médian utilisé pour les essais était inférieur d'environ 50 dB à la valeur crête maximale atteinte; la valeur médiane du rapport I/N était donc environ de $90 - 50 = 40$ dB pour les impulsions considérées.

FIGURE 24

Radar B avec formes d'onde désynchronisées à fréquences échelonnées
et activation de la fonction d'élimination des brouillages



5.2.5 Signaux brouilleurs causés par des radars de navigation maritime

Le radar B a subi au cours des essais des brouillages involontaires causés par plusieurs radars de navigation maritime; on savait que l'un d'entre eux était exploité à environ 1/3 de mille marin (620 m) du lieu des essais (voir la Fig. 22). La puissance d'émission du radar brouilleur connu était comprise entre environ 20 et 30 kW. La fonction d'élimination des brouillages a permis de supprimer ces brouillages de l'écran radar, ainsi que ceux induits par les formes d'onde du radar de radiolocalisation³.

6 Discussion

6.1 Facteurs ayant une incidence sur l'affichage des cibles

Il convient de noter qu'étant régulièrement espacées le long d'un rayon sur l'écran radar, les cibles simulées étaient plus visibles que ne le seraient des cibles réelles, qui pourraient apparaître n'importe où à l'écran en conditions réelles d'exploitation. Il faut donc être prudent avant d'appliquer les résultats des essais aux conditions réelles d'exploitation, car les valeurs de I/N pour lesquelles on parvient à observer des cibles simulées en présence d'impulsions brouilleuses sont supérieures à celles applicables à des cibles réelles aléatoirement distribuées. Par ailleurs, les photographies du présent rapport ne rendent pas compte de l'amélioration de visibilité due aux balayages multiples, durant lesquels les positions des fausses alarmes varient aléatoirement alors que celles des cibles réelles détectées restent fixes. Les impulsions réelles détectées issues d'autres radars se limitent en principe à un ou quelques secteurs azimutaux, et le secteur affichant la plus forte densité de ces fausses alarmes verrait son intensité varier et son angle d'azimut fluctuer, ce qui constitue de nouvelles possibilités de différenciation entre détection de cibles réelles et détection de fausses alarmes.

Il convient également de noter qu'aux courtes distances utilisées pour les essais décrits dans le présent Rapport, un opérateur de radar de radionavigation maritime parvient généralement à différencier une cible réelle détectée d'une fausse alarme due au fouillis de mer.

6.2 Impulsions de radiolocalisation P0N brouilleuses subies par les radars A et B

Les résultats obtenus en présence d'émissions P0N d'un radar de radiolocalisation brouillant le radar A ont montré que celui-ci pouvait supporter des valeurs du rapport I/N allant jusqu'à 80 dB sans dégradation de sa qualité de fonctionnement si son circuit de traitement du signal d'élimination des brouillages est activé. On a utilisé comme émissions P0N brouilleuses pour les essais sur le radar A des trains continus d'impulsions en provenance de tous les angles d'azimut, ce qui est irréaliste car cela signifierait que le radar A est entouré par d'autres radars. Si un diagramme d'antenne avait été appliqué à la forme d'onde P0N ou si celle-ci avait été réduite à un secteur spatial (utilisation de la porte ET, comme pour les essais sur le radar B), les essais auraient été plus réalistes et auraient conduit à des résultats encore meilleurs.

³ Les radars de radiolocalisation ayant les impulsions les plus longues (impulsions P0N de 10 μ s et impulsions de 27 μ s enregistrées pour le radar RL 2) ont généré des raies radiales parce que chacune de leurs impulsions couvrait la plus grande partie des 37 μ s prises par les balayages à 3 milles marins (5,56 km). Le radar de navigation maritime a généré des spirales car chacune de ses impulsions correspondait à une petite fraction de ce temps de balayage; chaque spirale était composée de nombreuses impulsions se produisant de manière asynchrone au cours de divers balayages du radar testé.

Les résultats obtenus en présence d'émissions P0N d'un radar de radiolocalisation brouillant le radar B ont montré que celui-ci pouvait supporter des valeurs du rapport I/N légèrement supérieures à 60 dB sans dégradation de sa qualité de fonctionnement si les émissions de radiolocalisation sont réduites à un secteur spatial (utilisation de la porte ET) et si le circuit de traitement du signal/d'élimination des brouillages est activé. Cela peut s'expliquer par le fait que l'utilisation de la porte ET limite le nombre d'impulsions de radiolocalisation détectées par le récepteur radar au cours du balayage et par le fait que l'algorithme d'élimination des brouillages est mis en œuvre (voir le § 4). En outre, ce cas d'émissions de radiolocalisation brouilleuses avec utilisation de la porte ET correspond à la configuration de couplage d'antennes la plus mauvaise imaginable; elle est du reste impossible, car dans la réalité les deux radars sont en rotation, ce qui diminue d'autant l'incidence des brouillages.

6.3 Formes d'onde à fréquences échelonnées

Les résultats obtenus après brouillage du radar B par les émissions enregistrées du radar RL 2 ont montré que le radar B pouvait accepter des valeurs du rapport I/N bien supérieures à 60 dB sans dégradation de sa qualité de fonctionnement si le diagramme de gain mutuel est appliqué et si le circuit de traitement du signal/d'élimination des brouillages est activé. Ce comportement s'explique en partie par le fait que les coefficients d'utilisation de ces signaux étaient petits. Le radar de localisation dont les formes d'onde ont été enregistrées puis utilisées pour ces essais est représentatif de nombreux radars de radiolocalisation exploités aux fréquences considérées ici, dans le sens où son coefficient d'utilisation effectif (relatif au risque de brouillage des radars de navigation) est beaucoup plus petit que son coefficient d'utilisation global.

En outre, la modulation des signaux brouilleurs grâce aux diagrammes de gain mutuel d'antenne a contribué de manière substantielle à réduire l'effet des brouillages apparaissant sur l'écran radar panoramique. On peut raisonnablement supposer que l'application de cette modulation (qui traduit une configuration plus réaliste) aurait permis d'améliorer les résultats obtenus précédemment pour les essais sur le radar A, pour lesquels des trains d'impulsions brouilleuses de niveau de puissance constant avaient été utilisés. Les diagrammes réels de gain mutuel (celui de la Fig. 7 par exemple) montrent que les amplitudes des lobes varient et atteignent rarement les gains des lobes de plus forte amplitude. Les valeurs du rapport I/N indiquées dans le présent rapport pour des formes d'onde à fréquences échelonnées sont donc plus rarement atteintes durant les essais ou en conditions réelles d'exploitation que les valeurs mentionnées pour les impulsions P0N.

6.4 Facteur de couplage d'antenne

Il est significatif que le couplage de faisceau principal à faisceau principal de radar se produise rarement. On constate sur la Fig. 7 que, pour un échantillon aléatoire représentatif de sept balayages d'un radar à balayage lent, le gain mutuel à 2957 MHz est toujours inférieur d'au moins 28 dB à la valeur de faisceau principal à faisceau principal et qu'il est le plus souvent inférieur de plus de 80 dB à cette dernière valeur. A 3050 MHz, les écarts entre le gain mutuel et sa valeur maximale ne sont pas aussi grands. A cette fréquence cependant, la valeur maximale du gain mutuel est beaucoup plus petite que celle indiquée sur la Fig. 7 pour 2957 MHz. Il convient de garder cela à l'esprit lorsque l'on étudie les résultats des essais relatifs à l'application d'une modulation du diagramme d'antenne au radar de radiolocalisation. Pour les essais concernant le radar RL 2 aux alentours de 3050 MHz, on a utilisé des échantillons de gain mutuel dont les valeurs crêtes étaient inférieures de 10 ou 15 dB au produit du lobe latéral le plus fort du radar RL 2 par le gain du faisceau principal du radar de radionavigation B. Ce point est illustré par les 5 et 15 premières secondes de la Fig. 5.

7 Conclusions

Les résultats des essais exposés dans le présent Rapport expliquent et confirment les nombreux partages réussis de la bande 2 900-3 100 MHz entre les radars de radiolocalisation et les radars de radionavigation.

On peut appliquer aux radars de radionavigation maritime des rapports I/N de 60-90 dB dus aux émissions brouilleuses des radars de radiolocalisation, en raison des faibles coefficients d'utilisation et de la nature asynchrone de ces brouillages, de la faible probabilité de couplage entre faisceaux principaux et des capacités avérées de traitement du signal d'élimination des brouillages équipant les radars de radionavigation.

Les radars de radionavigation maritime utilisés pour les essais étant représentatifs de ceux exploités dans la bande 2 900-3 100 MHz, on peut supposer que d'autres radars de radionavigation maritime conduiraient à des résultats similaires à ceux présentés ici. Il apparaît donc que les données exposées dans le présent Rapport vont dans le sens d'une attribution du statut coprimaire dans la bande 2 900-3 100 MHz au service de radiolocalisation, en partage avec le service de radionavigation.

Terminologie

CFAR Taux de fausses alarmes prolongées (*constant false alarm rate*)

FI Fréquence intermédiaire

FRI Fréquence de répétition des impulsions

I/N Rapport brouillage sur bruit.

P0N Désigne une émission à impulsions non modulées (voir le Règlement des radiocommunications)

PRI Intervalle de répétition des impulsions (*pulse repetition interval*)
