

RAPPORT UIT-R M.2084*

Détection par satellite de messages du système d'identification automatique

(2006)

1 Introduction

Au début des années 90, l'Association internationale de la signalisation maritime (AISM) a proposé de développer un système universel embarqué sur des navires pour améliorer la sécurité maritime et l'efficacité de la navigation et pour contribuer à la protection de l'environnement marin. A la suite de cette proposition, l'OMI (Organisation maritime internationale), l'UIT et la CEI (Commission électrotechnique internationale) ont adopté un nouveau système de navigation visant à remplir ces objectifs, maintenant connu sous le nom de SIA (Système d'identification automatique). L'objectif premier du SIA est de faciliter l'échange efficace de données de navigation entre plusieurs navires, d'une part, et entre des navires et des stations côtières, d'autre part, de façon à nettement améliorer la sécurité de navigation et à renforcer la maîtrise et la surveillance des événements maritimes. La Recommandation UIT-R M.1371 décrit en détail les caractéristiques techniques du système SIA actuel qui repose sur des méthodes d'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) dans la bande d'ondes métriques attribuée au service mobile maritime.

Comme indiqué dans la Recommandation, le SIA, conçu pour fonctionner de façon autonome et automatique, permet l'échange de messages courts entre des navires, des stations côtières et des systèmes d'aides à la navigation dans un rayon de 20 à 30 milles marins (NM) (27 à 56 km), en utilisant principalement une forme auto-organisée de l'AMRT. Les messages transportent des données telles que l'identification du navire, sa localisation, sa route et sa vitesse.

La Convention SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea/Convention sur la sécurité de la vie en mer) impose que tous les navires d'une jauge brute supérieure ou égale à 300 tonneaux qui effectuent des voyages en eaux internationales soient obligatoirement équipés du SIA et l'utilisent. En 2008, tous les navires d'une jauge brute supérieure ou égale à 500 tonneaux effectuant des voyages en eaux nationales devront aussi être équipés du SIA. Les équipements SIA conçus pour respecter cette prescription obligatoire sont dits de classe A. Une version de plus faible puissance appelée classe B, en cours de développement, pourra être embarquée facultativement. Depuis sa mise en oeuvre, le SIA a montré qu'il remplissait parfaitement les objectifs initiaux fixés par l'AISM.

Or, un nouveau besoin est récemment apparu: détecter et suivre des navires hors de portée des moyens classiques de communication terrestres en ondes métriques. Ces applications à longue portée, qui devraient permettre, entre autres, de mieux gérer les cargaisons dangereuses, d'améliorer la sécurité et de lutter contre les activités illégales, semblent indiquer qu'il faudrait détecter des navires situés à 200 NM (370 km) des côtes, voire plus.

Le présent Rapport introduit la détection SIA par satellite comme l'une des méthodes envisageables de détection des navires éloignés. Il aborde la faisabilité technique de cette méthode, étudie les capacités des satellites dans différents cas de figure et les moyens qui permettraient d'améliorer ces

* Il convient d'appeler l'attention de l'Organisation maritime internationale (OMI), de l'Association internationale de la signalisation maritime (AISM) et du Comité international radio-maritime (CIRM) sur le présent Rapport.

capacités. Le Rapport est organisé en huit chapitres, comme suit: caractéristiques techniques et opérationnelles du SIA, présentation générale de la détection SIA par satellite, étude du bilan de liaison, analyse des brouillages intrasystèmes (classe A seulement, combinaison de classes A et B, répartition non uniforme des navires), compatibilité avec les systèmes mobiles actuellement en service, techniques d'amélioration de la qualité de fonctionnement et du partage, résumé.

2 Caractéristiques techniques et opérationnelles du SIA embarqué sur des navires

Pour mieux comprendre et décrire d'un point de vue fonctionnel le principe de la détection SIA par satellite, il faut connaître les caractéristiques de base du SIA terrestre conventionnel. Ces caractéristiques, décrites dans la Recommandation UIT-R M.1371, sont résumées dans les paragraphes suivants.

Le SIA fonctionne comme un système de communication navire à navire et navire à côte dans lequel les navires équipés du SIA transmettent périodiquement de courts messages AMRT de longueur fixe contenant des données telles que l'identification, la localisation, la route, la vitesse et d'autres informations de statut. Les récepteurs SIA des navires et des stations côtières détectent les informations venant de tous les navires situés à leur proximité et créent ainsi une image détaillée de l'environnement local, qui vient compléter les informations fournies par les radars et autres aides à la navigation.

La structure du signal AMRT repose sur une trame d'une minute divisée en 2 250 intervalles de temps, chaque message occupant, en fonctionnement nominal, un intervalle. En mode normal, les messages d'identification sont émis de façon périodique alternativement sur deux canaux maritimes en ondes métriques attribués pour cet usage. Un dispositif électronique de détermination de la position installé à bord calcule la localisation des navires. La base de temps ARMT est fournie par le récepteur GNSS intégré à la station SIA. Si l'on prend en compte les deux canaux, la capacité globale du SIA est de 4 500 messages d'un intervalle par minute.

Le SIA est conçu selon une configuration d'accès appelée «AMRT auto-organisé» (ci-après AMRTAO). Contrairement aux configurations classiques AMRT à assignation fixe, la technique AMRTAO permet au système de fonctionner sans contrôleur ARMT central. En effet, les systèmes surveillent en permanence les signaux SIA de leur environnement local et «annoncent» le prochain intervalle de transmission qu'ils comptent utiliser. Tous les navires de la zone participent ainsi à la coordination du système et les conflits d'utilisation d'un même intervalle de temps sont minimisés. D'autres configurations d'accès AMRT sont également utilisées pour certains types de messages.

Le Tableau 1 résume les paramètres techniques de communication radiofréquence et de transmission des messages du SIA. Comme indiqué dans le Tableau, la longueur de base d'un message est de 256 bits, les 24 derniers bits faisant office de tampon pour prendre en compte les temps de propagation, les retards dans les récepteurs, la gigue temporelle et les bits supplémentaires de bourrage. Les 20 derniers bits sont habituellement vides. La Recommandation de l'UIT ne définit pas les caractéristiques d'antenne et les paramètres de ligne d'alimentation correspondants des SIA embarqués sur des navires. Dans un souci de complétude, ces éléments sont décrits ci-après. On utilise en pratique principalement deux types d'antenne: dipôle $1/2 \lambda$ et monopôle $5/8 \lambda$ alimenté en extrémité dont les gains sont compris entre 2 et 4,5 dBi. Pour rester prudent, on suppose ici que le dipôle $1/2 \lambda$ possède un gain maximum d'environ 2 dBi et un diagramme de gain en élévation de forme simple, à savoir cosinus carré. Le type et la longueur de la ligne d'alimentation varient en fonction de l'installation. Par hypothèse, on considère une perte globale de 3 dB, qui tient compte des pertes dans les câbles et dans les autres éléments liés à l'émetteur SIA du navire. Le Tableau 2 présente la structure binaire par défaut du paquet de données.

TABLEAU 1

Résumé des paramètres techniques du SIA embarqué sur un navire

Paramètres SIA	Valeurs
Fréquences	161,975 et 162,025 MHz
Largeur de bande du canal	25 kHz
Plates-formes	Navires de classe A, navires de classe B, stations côtières, aides à la navigation
Puissance	12,5 W (classe A); 2 W (classe B)
Type d'antenne ⁽¹⁾	Dipôle $1/2 \lambda$
Gain d'antenne ⁽¹⁾	2 dBi avec un diagramme de gain en élévation verticale de forme cosinus carré Gain minimal = -10 dBi
Pertes dans les câbles ⁽¹⁾	3 dB (estimé)
Sensibilité du récepteur	-107 dBm pour un taux d'erreur de paquet (TEP) de 20% (minimum) -109 dBm pour un TEP \leq 20% (typique)
Modulation	GMSK 9 600 bit/s
Mode d'accès multiple	AMRT (auto-organisé, aléatoire, fixe et incrémental)
Longueur de trame AMRT	1 min; 2 250 intervalles de temps
Longueur de l'intervalle AMRT	26,7 ms; 256 bits (voir Tableau 2)
Types de messages	22 types
Longueur de message	1 à 5 intervalles dont un correspondant au type dominant
Périodicité des messages	Intervalles entre les transmissions de 2 s à 6 min (voir Tableau 3)
Rapport de protection D/U (signal utile/signal indésirable) requis	10 dB pour un TEP = 20% ⁽²⁾

⁽¹⁾ Paramètres typiques, non définis dans la Recommandation UIT-R M.1371.

⁽²⁾ Paramètres spécifiés dans le document CEI 61993-2.

TABLEAU 2

Structure binaire par défaut du paquet de données

Montée en puissance	8 bits	
Séquence de conditionnement	24 bits	Nécessaire à la synchronisation
Fanion de début	8 bits	
Données	168 bits	Longueur par défaut
Code de redondance cyclique	16 bits	Nécessaire à la détection d'erreur
Fanion de fin	8 bits	
Tampon	24 bits (les 20 derniers bits sont habituellement vides)	Nécessaires à la prise en compte des bits de bourrage, des temps de propagation, des retards dans les récepteurs et de la gigue temporelle
Total	256 bits	

Pour mettre en oeuvre les différentes fonctions du SIA, la norme définit 22 types de messages, regroupés en quatre catégories: 1) dynamique, 2) statique et concernant le voyage, 3) sécurité et administration et 4) données. Les messages dynamiques, transmis périodiquement, représentent le volume de trafic le plus important d'un environnement SIA. Le débit d'émission de ces messages périodiques par les différentes plates-formes est une des variables majeures du système. La norme définit une plage d'intervalles de temps entre les comptes rendus pour différents types de plates-formes en fonction de paramètres dynamiques du navire tels que la vitesse et la route. Le Tableau 3 récapitule les intervalles entre les comptes rendus pour différentes plates-formes.

On montre dans la suite du document que l'intervalle entre les comptes rendus est un paramètre important de la qualité de détection SIA par satellite. Comme l'indique le Tableau 3, l'intervalle entre les comptes rendus des navires de classe A varie considérablement en fonction du statut dynamique du navire; il est compris entre un compte rendu toutes les 2 secondes et un compte rendu toutes les 3 minutes. Pour déterminer un intervalle d'émission moyen des navires de classe A sur une longue durée, il est donc nécessaire de faire une estimation de la répartition des navires en fonction des différents statuts dynamiques. Le Tableau 4 recense les catégories des différents statuts, les valeurs correspondantes d'intervalle entre les comptes rendus et une estimation du pourcentage de navires situés dans chaque catégorie à un moment donné. A partir de ces données, on a fait une estimation globale de l'intervalle entre les comptes rendus.

TABLEAU 3

Intervalles entre les comptes rendus du SIA

Plate-forme SIA	Intervalle entre les comptes rendus
Informations dynamiques:	
Station côtière	De 3 1/3 à 10 s (valeur nominale = 10 s)
Navire de classe A	De 2 s à 3 min (environ 7 s en moyenne) (voir Tableau 4)
Navire de classe B	De 5 s à 3 min (valeur nominale = 30 s)
Aéronef de recherche et de sauvetage	10 s
Aide à la navigation	3 min
Informations statiques et relatives au voyage	6 min
Messages de sécurité et d'administration	En fonction du besoin
Message de données	En fonction du besoin

TABLEAU 4

Intervalles entre les comptes rendus pour les équipements mobiles des navires de classe A

Conditions dynamiques du navire	Intervalle nominal entre les comptes rendus	Pourcentage du total
Navire à l'ancre ou au mouillage et ne se déplaçant pas à plus de 3 noeuds	3 min	28
Navire à l'ancre ou au mouillage et se déplaçant à plus de 3 noeuds	10 s	
Navire à 0-14 noeuds	10 s	30
Navire à 0-14 noeuds et changeant de route	3 1/3 s	12
Navire à 14-23 noeuds	6 s	30
Navire à 14-23 noeuds et changeant de route	2 s	
Navire à plus de 23 noeuds	2 s	
Navire à plus de 23 noeuds et changeant de route	2 s	
Moyenne sur tous les navires	Intervalle de ~7 s	

3 Détection SIA par satellite

Le principe de la détection SIA par satellite serait d'utiliser un ou plusieurs satellites en orbite terrestre basse (ci-après OTB) pour recevoir et décoder des messages SIA et transmettre les résultats du décodage par liaisons de connexion satellitaires à des stations terrestres situées à des emplacements bien choisis. Les satellites OTB sont habituellement situés à une altitude comprise entre 600 et 1 000 km. Il n'existe actuellement aucun système de détection SIA par satellite en exploitation et les paramètres techniques et opérationnels d'un tel système n'ont pas encore été fixés.

Il convient par conséquent dans la présente étude de prendre pour hypothèse des paramètres plausibles et techniquement recevables.

Le premier système sur lequel repose notre démonstration consiste en un satellite unique (OTB) en orbite polaire à une altitude de 950 km. On prévoit que les futurs systèmes en exploitation seront constitués de constellations de satellites OTB relativement petites, d'où une couverture satellitaire non continue pour un navire à un emplacement donné. Pour obtenir une couverture mondiale complète avec un nombre modeste de stations terrestres, il faudra donc utiliser des techniques du type «enregistrement et retransmission» des données SIA reçues. Cependant, dans le cas de la détection et du suivi de navires situés jusqu'à plusieurs milliers de milles marins au large des côtes, l'empreinte au sol du satellite est suffisamment grande pour permettre un téléchargement en temps réel des données pendant la durée de visibilité du satellite.

La détection SIA par satellite se distingue de la détection SIA conventionnelle de navire à navire et de navire à côte par des facteurs techniques essentiels, en particulier la sensibilité du récepteur, le diagramme de gain d'antenne et les exigences de fiabilité. Les mesures effectuées sur des récepteurs SIA à bord de navires montrent que les récepteurs du commerce sont généralement plus sensibles que ne le prévoient les spécifications du SIA. Il est possible en outre d'augmenter la sensibilité des récepteurs SIA des satellites grâce à des amplificateurs à faible bruit (AFB) et à des stratégies de détection optimisées. Cependant, ces améliorations sont limitées par la nécessité d'utiliser une largeur de bande plus importante que la largeur optimale, qui prend en compte des décalages Doppler pouvant aller jusqu'à $\pm 3,5$ kHz environ. Au vu de ces contraintes, on considère dans la présente étude un récepteur SIA satellitaire dont les sensibilités de référence sont les suivantes: -118 dBm pour un taux d'erreur de paquet (TEP) de 1% et -120 dBm pour un TEP de 20%.

Le premier système satellitaire considéré ici possède une antenne à large faisceau. Les antennes à large faisceau utilisées sur les satellites OTB sont généralement classées en deux groupes. Le premier groupe est constitué des satellites dont le gain maximal est dirigé vers l'horizon de façon équidirective, le gain minimal étant dirigé vers le point au sol à la verticale du satellite. Sur ce type d'antenne, la variation du gain selon l'angle hors axe compense partiellement les variations de l'affaiblissement de propagation; les variations du signal selon l'angle hors axe sont donc réduites. Le second groupe est constitué des antennes, plus conventionnelles, dont le gain maximal est dirigé vers le point au sol à la verticale du satellite. Dans le cadre de la présente étude, les satellites du second groupe possèdent par hypothèse un gain maximal de 6 dBi et une ouverture de faisceau à -3 dB de 100°. Comme dans beaucoup d'études UIT-R, le lobe principal du diagramme de gain est modélisé de la façon suivante:

$$G(\theta) = G_{MB} - 12(\theta/\theta_{3dB})^2$$

où:

$G(\theta)$: gain de l'antenne du satellite (dBi) à l'angle hors axe θ (degrés)

G_{MB} : gain du faisceau principal de l'antenne du satellite (dBi)

θ_{3dB} : ouverture du faisceau de l'antenne du satellite à -3 dB (degrés)

Les spécifications de la qualité de détection du SIA par satellite et du SIA terrestre diffèrent aussi de façon notable. Comme la plupart des systèmes de communication, le SIA conventionnel cherche à recevoir et à décoder correctement la majorité des messages transmis avec un degré de fiabilité moyen à fort. Or, le suivi des navires par détection SIA satellitaire ne requiert pas une haute fiabilité de communication. Une actualisation de la localisation toutes les heures pour des navires situés à quelques centaines de milles marins des côtes et toutes les quatre heures – voire toutes les douze heures – pour des navires plus éloignés peut suffire. Comme indiqué par la suite, les brouillages intrasystèmes entraînent la perte d'un très grand pourcentage de messages SIA venant des navires. Jusqu'à 99% ou plus des messages SIA émis par des navires peuvent par exemple être perdus en un

seul passage de satellite, l'objectif d'actualisation régulière des emplacements des navires étant pourtant toujours respecté. Ainsi suffit-il, pour mettre à jour la localisation d'un navire toutes les douze heures, de décoder correctement un seul des plus de 360 messages reçus (~0,3%) que le navire a émis pendant cette période. Ce principe est détaillé dans la suite du document.

Les deux fréquences désignées comme les canaux d'exploitation du SIA terrestre au sein du service maritime mobile n'ont pas été attribuées de façon exclusive. Ces canaux, et d'autres adjacents, sont en effet alloués et utilisés pour d'autres applications du service mobile dans diverses régions du monde, notamment les stations côtières de correspondance publique en ondes métriques (VPCS) dans le service mobile maritime et les systèmes de radiocommunication mobiles terrestres. Contrairement aux systèmes SIA terrestres conventionnels qui peuvent coexister avec d'autres émetteurs de même fréquence grâce à la séparation géographique, l'antenne d'un satellite, dont le faisceau recouvre une grande zone, reçoit simultanément des signaux émis par une multitude d'émetteurs SIA situés sur des navires et dans des systèmes mobiles terrestres. Le SIA par satellite doit donc être en mesure de fonctionner correctement dans un environnement brouillé par les systèmes déjà en service. Le § 9 présente une étude de la qualité de fonctionnement du SIA par satellite dans un environnement déjà occupé par d'autres services.

Le Tableau 5 récapitule les caractéristiques du satellite SIA utilisé dans la présente étude. Elles tiennent compte des considérations qui précèdent.

TABLEAU 5

Caractéristiques de la liaison satellitaire SIA prises comme hypothèse

Paramètres du satellite SIA	Valeurs
Satellite	
Constellation	De 1 à 6 satellites
Altitude (km)	950
Inclinaison (degrés)	82,5
Période (minutes)	104
Empreinte au sol	Rayon de 3 281 km (à l'horizon)
Antenne	
Gain (GMB) (dBi)	6
Ouverture de faisceau (θ_{3dB}) (degrés)	100
Diagramme	GMB – 12 (θ/θ_{3dB}) ²
Polarisation	Quasi circulaire
Perte de conversion circulaire à linéaire (dB)	3
Récepteur	
Facteur de bruit à l'entrée de l'AFB (dB)	3
Rapport Eb/N0 requis pour un TEB de 10–5 (dB)	13 y compris les pertes de mise en oeuvre
Pertes dans ligne/filtre avant l'AFB (dB)	2,5
Sensibilité au niveau de l'AFB (dBm)	–118 pour 1% de taux d'erreur de paquet (TEP) –120 pour 20% de TEP
Rapport de protection (pour des signaux dans le même canal et coïncidant dans le temps) (dB)	15 pour 1% de TEP 10 pour 20% de TEP
Période souhaitée d'actualisation de l'emplacement des navires	Passage unique du satellite, 4 h et 12 h

4 Etude du bilan de liaison

Le bilan de liaison est l'une des mesures élémentaires de la qualité de fonctionnement de tout système de communication par satellite. Dans le cas présent, il s'agit de calculer la puissance reçue par le satellite en provenance d'un navire et de la comparer à la sensibilité du satellite. Si la puissance reçue dépasse la sensibilité, c'est-à-dire si la marge est positive, une communication correcte est alors possible. Un bilan de liaison pour le trajet navire à satellite a été effectué à partir des paramètres des émetteurs SIA sur navires et des paramètres des récepteurs SIA sur satellites définis ci-dessus. Le Tableau 6 présente les calculs de géométrie et de puissance applicables à la détection de messages SIA émis par des navires de classe A.

TABLEAU 6

Bilan de liaison navire à satellite aux valeurs extrêmes

Paramètres	Valeurs
Géométrie	
Altitude du satellite (km)	950
Angle d'élévation minimal à l'émission (degrés)	0
Angle hors axe de l'antenne du satellite (degrés)	60,5
Distance oblique maximale (km)	3 606
Distance maximale à la surface (km)	3 281
Puissance	
Puissance d'émission (dBm)	41,0
Gain d'émission (dBi)	2,0
Pertes d'émission dans les câbles et autres pertes d'émission (dB)	3,0
Pertes de propagation en espace libre à la distance maximale (dB)	147,8
Perte par désadaptation de polarisation (dB)	3,0
Gain d'antenne du satellite au niveau de l'horizon (dBi)	1,6
Pertes dans ligne/filtre RF du satellite (dB)	2,5
Puissance reçue au niveau du satellite (dBm)	-111,7
Sensibilité du satellite pour un TEP de 20% (dBm)	-120,0
Marge nette (dB)	8,3

On a plus particulièrement étudié les pertes de propagation pour des angles d'élévation très faibles des antennes de navire. La plupart des systèmes de communication par satellite sont conçus pour fonctionner avec des stations terrestres dont l'élévation au-dessus de l'horizon est supérieure à une valeur minimale (de 3° à 5° par exemple) pour tenir compte de facteurs techniques tels que les évanouissements et/ou les limitations réglementaires. Il est clairement apparu pendant l'étude que ces facteurs ne sont pas applicables à la propagation terre à satellite en ondes métriques au-dessus de la mer. Pour estimer les pertes de propagation terre à satellite, on a utilisé un modèle de propagation radio conçu pour prévoir ce type de pertes¹. Le modèle a permis de calculer la courbe

¹ Voir <http://flattop.its.bldrdoc.gov/if77.html>.

de la Fig. 1 qui présente les pertes moyennes pour un satellite situé à 950 km d'altitude. La courbe correspond à des conditions moyennes d'état de la mer et de climat maritime tempéré. La structure en forme de lobes de la courbe résulte des effets périodiques de renforcement et d'évanouissement du signal causés par l'addition en phase ou en opposition de phase du trajet réfléchi à la surface de l'eau. Comme on peut le voir sur la courbe, les données de propagation nominales en espace libre s'appliquent à quelques dB près jusqu'à l'horizon optique, point à partir duquel les pertes de propagation augmentent rapidement.

La courbe de la Fig. 2 a été obtenue à partir des résultats du Tableau 5. Elle représente la marge nette en fonction de la distance par rapport au point au sol à la verticale du satellite jusqu'à l'horizon. Les calculs qui ont permis d'obtenir cette courbe prenaient en compte la propagation en espace libre jusqu'à l'horizon terrestre et non la structure en lobes décrite précédemment. La valeur proche de zéro directement sous le satellite résulte de la valeur nulle du gain du dipôle de l'antenne du navire SIA. Les paramètres techniques du bilan de liaison des navires de classe B étant fondamentalement identiques à ceux de la classe A – exception faite de la puissance plus faible – la courbe représentant la réception des signaux de classe B au niveau du satellite est parallèle à celle de la classe A, comme le montre la Figure.

FIGURE 1
Pertes de propagation Terre à satellite au-dessus de la mer à 162 MHz
(satellite à 950 km d'altitude)

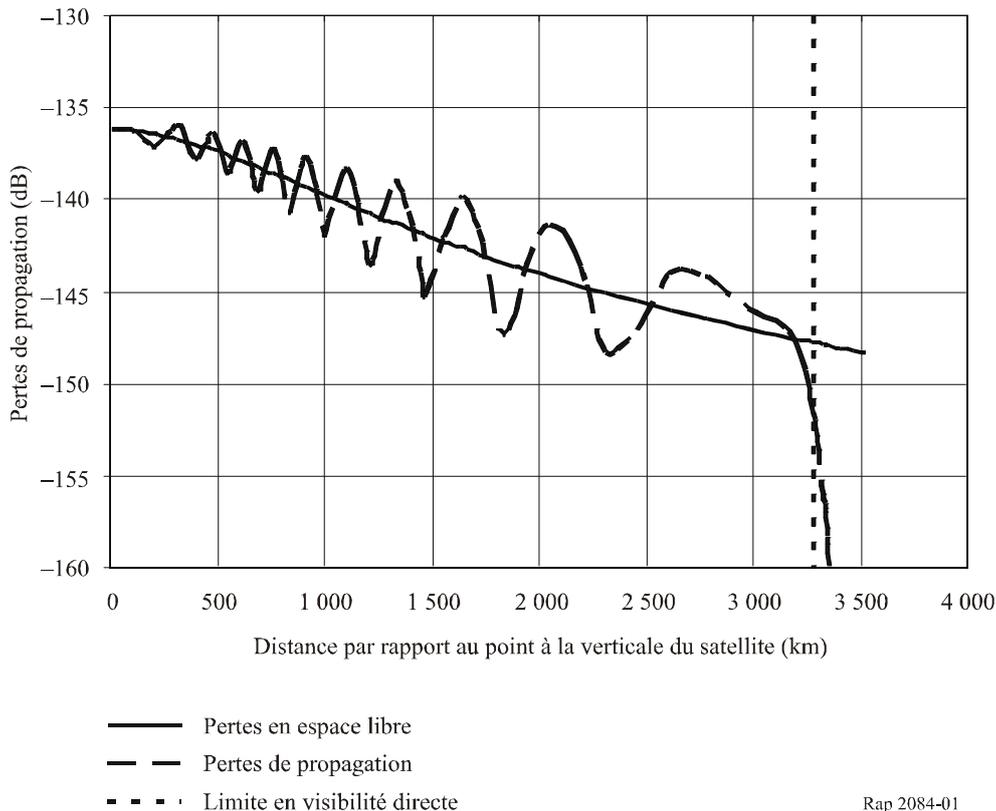
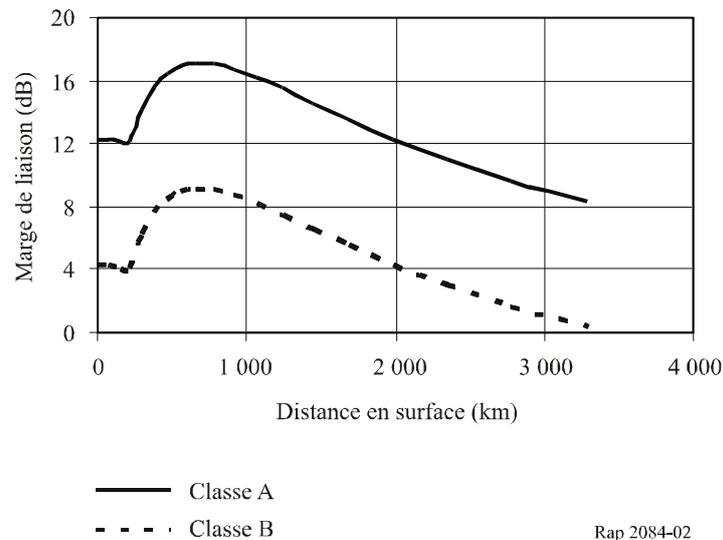


FIGURE 2

Marge de liaison navire à satellite en fonction de la distance en surface par rapport au point à la verticale du satellite



Ces résultats prouvent donc qu'il existe une marge de liaison appropriée permettant aux satellites de détecter et de décoder des signaux SIA de classes A et B pour la majorité des emplacements de navires dans l'empreinte satellitaire.

5 Analyse des brouillages intrasystèmes (classe A uniquement)

Le bilan de liaison montre qu'il existe des marges de liaison permettant la détection d'un message SIA émis par un navire de classe A où qu'il se trouve dans l'empreinte satellitaire. Cependant, les brouillages intrasystèmes viennent limiter de façon importante la qualité de détection. Les études suivantes présentent trois méthodologies qui permettent de quantifier ces limitations.

5.1 Démarche analytique

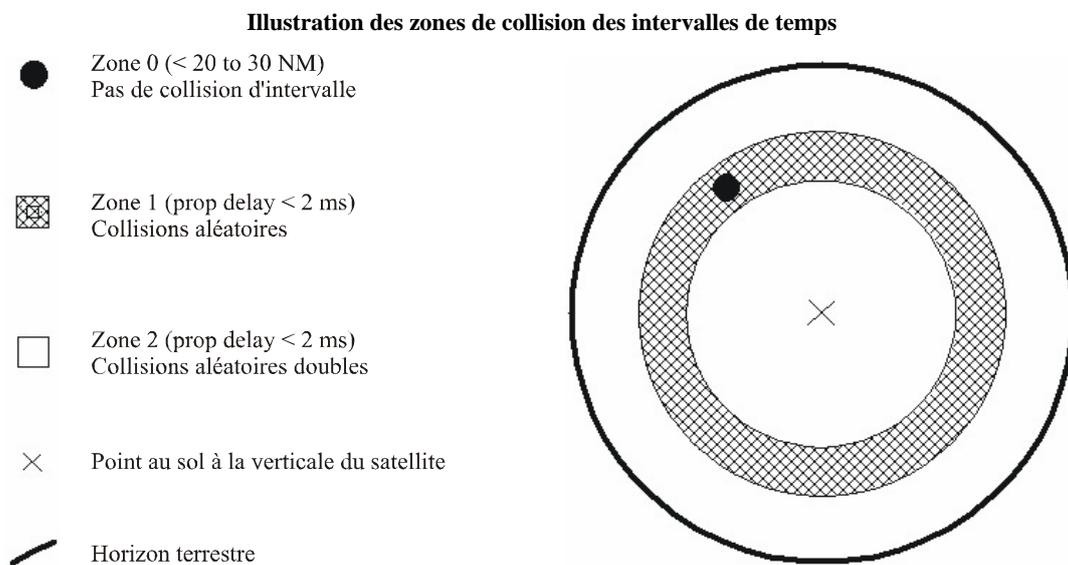
Comme décrit précédemment, la stratégie AMRTAO (ARMT auto-organisé) utilisée dans le SIA permet une coordination des intervalles de temps qui limite au maximum les conflits d'intervalles entre des navires et des stations terrestres situés dans une zone géographique locale donnée. Ce principe n'est pas valable en détection SIA par satellite. Le satellite voit en effet dans son faisceau de nombreuses zones géographiques locales. Les zones locales n'étant généralement pas coordonnées entre elles, des collisions d'intervalles de temps apparaîtront entre les nombreux signaux reçus par le satellite. Les effets d'une telle collision dépendent de la puissance des deux signaux. La collision pourra éventuellement entraîner la perte de deux messages. La probabilité de détection et d'un décodage corrects d'un message SIA donné émis par un navire décroît à mesure que le taux d'apparition des collisions augmente.

On peut modéliser les collisions entre intervalles de temps en considérant un message SIA unique souhaité (noté D pour *desired*) et un ou plusieurs messages SIA non souhaités (notés U pour *undesired*). À chaque fois qu'une collision a lieu et que le rapport cumulé de puissances D/U est inférieur au critère requis de 10 dB, le message est perdu. L'étude initiale, qui prend en compte les navires de classe A uniquement, montre (Fig. 2) que le rapport entre la puissance maximale et la puissance minimale en réception SIA est d'environ 9 dB. Par conséquent, pour toute collision d'intervalles de temps, le rapport D/U ne peut atteindre la valeur requise de 10 dB: la majorité des paquets est donc perdue. On trouvera dans la suite du document des techniques de traitement au niveau du récepteur susceptibles de réduire les pertes de paquets.

Lors d'une collision d'intervalles de temps, sous certaines conditions, on observe la perte de deux paquets. La Fig. 3 en fournit une illustration. Le cercle extérieur de la Figure représente l'empreinte du faisceau du satellite sur la surface terrestre. Le centre du cercle correspond au point à la verticale directe du satellite. Le petit cercle noir est une zone de coordination SIA locale. Considérons la réception d'un message émis par un navire situé dans cette zone locale. Du fait de l'architecture AMRTAO, les messages SIA venant d'autres navires situés dans la même zone locale sont coordonnés dans le temps et ne subissent donc aucune collision, que ce soit au niveau local ou au niveau du récepteur du satellite SIA. En revanche, les messages émis par des navires situés dans la zone grisée – plus grande, donc en dehors de la zone locale – ne sont pas coordonnés et peuvent donc provoquer des collisions aléatoires d'intervalles de temps, d'où la perte d'un certain pourcentage de messages désirés. Tant que la différence de temps de propagation entre les navires situés dans la zone grisée et le satellite est inférieure à environ 2 ms, la synchronisation temporelle par GPS garantit que les intervalles de temps se succéderont correctement et qu'un seul intervalle sera impacté. Le délai de 2 ms correspond aux 20 bits inutilisés à la fin d'un message AIS. Les messages venant des zones extérieures à la zone grisée (représentées sur la Figure par les zones fermées blanches) présentent des différences de temps de propagation vers le satellite plus importantes, qui entraînent des chevauchements d'intervalles de temps et donc la perte de deux intervalles.

Si l'on considère uniquement des navires de classe A et le cas idéal d'une répartition géographique uniforme des navires dans le champ de vision du satellite, une simple méthode analytique permet de calculer les statistiques relatives à ce type de brouillage intrasystème.

FIGURE 3



Rap 2084-03

Considérons en premier lieu le cas trivial d'un message unique émis par un navire donné et reçu par le satellite, sachant qu'il n'existe qu'un seul autre navire dans l'environnement. Les formules suivantes donnent la probabilité d'une collision de paquet et la probabilité d'une détection réussie:

$$\begin{aligned}
 Q_{1,1} &= k * D_C / 2 \\
 P_{1,1} &= 1 - (k * D_C) / 2 \\
 P_{1,1} &= 1 - (k * (\tau / \Delta T) / 2)
 \end{aligned}$$

où:

- $Q_{1,1}$: probabilité d'une collision d'intervalles de temps (message désiré venant d'un navire; messages périodiques non désirés venant d'un autre navire)
- $P_{1,1}$: probabilité d'au moins une détection correcte sans collision (1 message désiré; messages périodiques non désirés venant d'un autre navire)
- D_C : rapport cyclique des messages non désirés émis par l'autre navire
- k : 0, 1 ou 2 pour les messages parasites émis par des navires situés dans les zones 0, 1 ou 2
- ΔT : intervalle moyen de transmission entre les messages (s)
- τ : longueur des messages (0,0267 s).

Le facteur 2 dans les équations vient du fait que les messages sont émis par les navires alternativement sur les deux fréquences SIA.

A titre exemple, un ΔT de 7 s et un message parasite venant de la zone 2 donnent:

$$P_{1,1} = 99,6\%$$

Si l'on étend cet exemple au cas d'un message unique reçu par le satellite en provenance d'un navire donné, la zone étant occupée par N navires au total, la probabilité d'une détection réussie sans collision d'intervalles de temps est donnée par la formule suivante:

$$P_{1,N} = (P_{1,1})^{N-1}$$

Dans le cas général de M messages transmis par un navire donné pendant la durée de visibilité du satellite, la probabilité d'une détection réussie d'au moins un des messages transmis pendant cette durée est donnée par la formule suivante:

$$P_{M,N} = 1 - [1 - (P_{1,1})^{N-1}]^M$$

où:

$$M: T_{vis} / \Delta T$$

T_{vis} : durée de visibilité du satellite

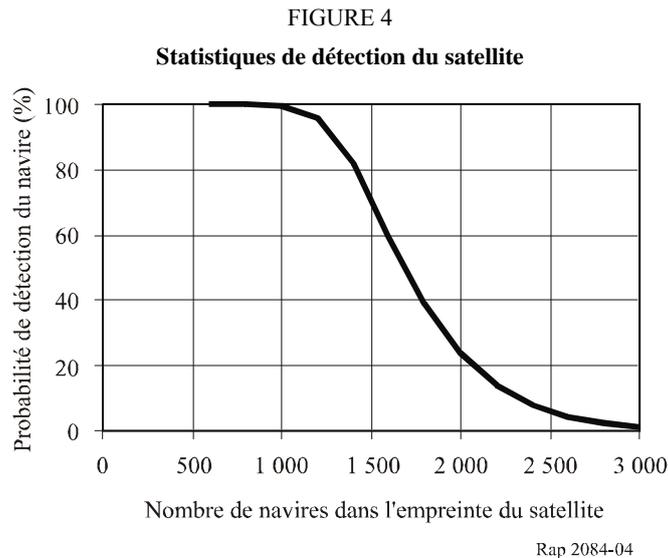
Si l'on considère une répartition uniforme des navires dans l'empreinte de l'antenne du satellite, il est évident que chacune des zones 0, 1 et 2 contient un certain nombre de navires. La localisation et la taille relatives de ces zones est fonction de chaque message reçu. Etant donné la très petite taille de la zone 0, les messages venant de cette zone ont un effet minime sur la qualité de détection globale du satellite et peuvent donc être ignorés. La valeur moyenne de k se situe par conséquent entre 1 et 2. Dans le cas d'une répartition uniforme des navires dans l'empreinte du satellite, on a pu calculer qu'une valeur approximative de $k = 1,6$ permet de décrire de façon précise les brouillages intrasystèmes. Si l'on reprend l'exemple précédent avec la valeur $k = 1,6$, on obtient:

$$P_{1,1000} = 4,8\%$$

$$P_{100,1000} = 99,3\%$$

La méthode d'analyse décrite ci-dessus est cohérente avec d'autres études menées par ailleurs sur le sujet². La Fig. 4 représente la courbe de probabilité de détection dans le cas simple d'un seul satellite et d'un seul passage du satellite au-dessus de la zone.

² Hoye, Gudrun K., *et coll.*, *Space-Based AIS for Global Maritime Traffic Monitoring*, Norwegian Defense Research Establishment (FFI), Kjeller, Norvège, [non daté].



Les calculs précédents fournissent la probabilité de détecter un navire donné pendant une durée de visibilité du satellite donnée. Une autre valeur statistique, peut-être plus utile, est le pourcentage de navires détectés. Partant de l'hypothèse réaliste que la probabilité de détection est indépendante du navire considéré, le nombre moyen de navires détectés (S_{ave}) est fourni par la formule suivante:

$$S_{moy} = N \cdot P_{M,N}$$

Si l'on exprime cette valeur en pourcentage de détection de l'ensemble des navires, on obtient une courbe identique à celle de la Fig. 4, l'axe des ordonnées étant libellé «pourcentage de navires détectés».

Troisième valeur statistique intéressante, la probabilité que tous les navires situés dans l'empreinte du satellite soient détectés pendant la durée de visibilité. Ce critère, beaucoup plus strict, est donné par la formule suivante:

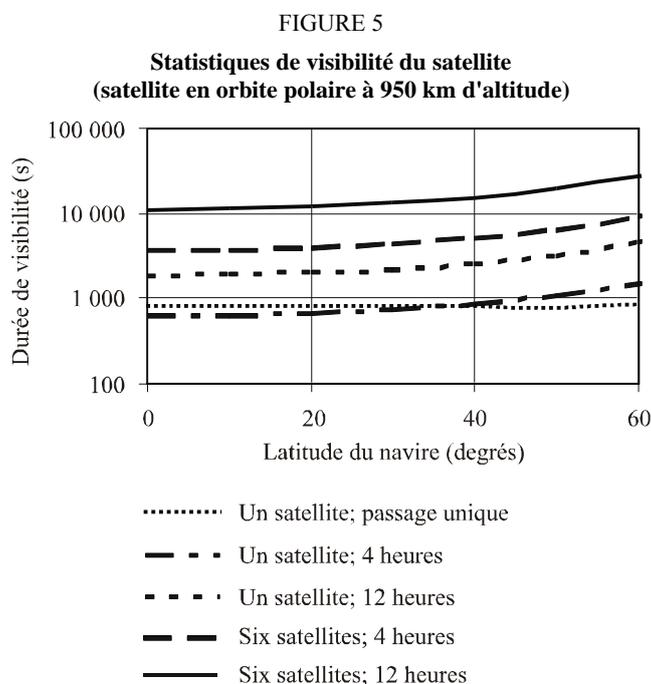
$$P_{Tous} = (P_{M,N})^N$$

La valeur très élevée de l'exposant produit une courbe de type «tout ou rien». En d'autres termes, pour une probabilité de détection individuelle tendant vers 1,0, 100% des navires sont détectés. Mais lorsque la probabilité de détection individuelle tombe au-dessous de 1,0, la probabilité de détection de 100% des navires tend rapidement vers zéro.

L'étude qui précède montre donc clairement que malgré la corruption et la perte de nombreux messages du fait de collisions d'intervalles de temps, l'objectif requis d'actualisation des emplacements des navires pendant une durée de visibilité donnée du satellite peut être atteint.

Dernier paramètre à déterminer: la durée de visibilité du satellite. Pour l'altitude représentative du satellite de 950 km que nous considérons ici, la durée de visibilité pour un seul passage du satellite directement à la verticale de la zone est d'environ 16,8 min. Cependant, la plupart des passages du satellite ne se feront pas directement à la verticale mais plutôt avec un angle d'élévation inférieur, qui dépend de l'inclinaison orbitale du satellite et de la latitude du navire. La Fig. 5 représente les durées moyennes de visibilité du satellite en fonction de la latitude du navire et de la période

d'observation, calculées à partir d'un modèle d'analyse satellitaire du commerce³. La Figure présente plusieurs courbes: courbe pour un seul passage à la verticale, courbes moyennées sur de plus longues périodes d'observation telles que 4 h et 12 h. La Figure présente aussi le cas d'une couverture par une constellation de six satellites, placés de façon à éviter le chevauchement des empreintes au sol.



Pour simplifier, dans la plupart des exemples présentés, les navires sont situés à une latitude de 40° N. Le Tableau 7 indique les valeurs de visibilité pour un navire situé à cette latitude.

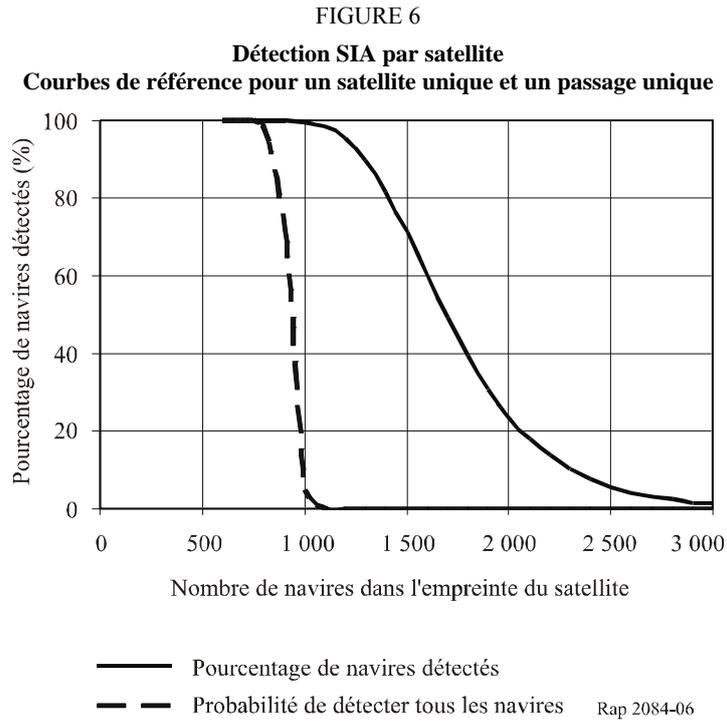
TABLEAU 7
Statistiques de visibilité du satellite
(satellite en orbite polaire; navire cible à une latitude de 40° N)

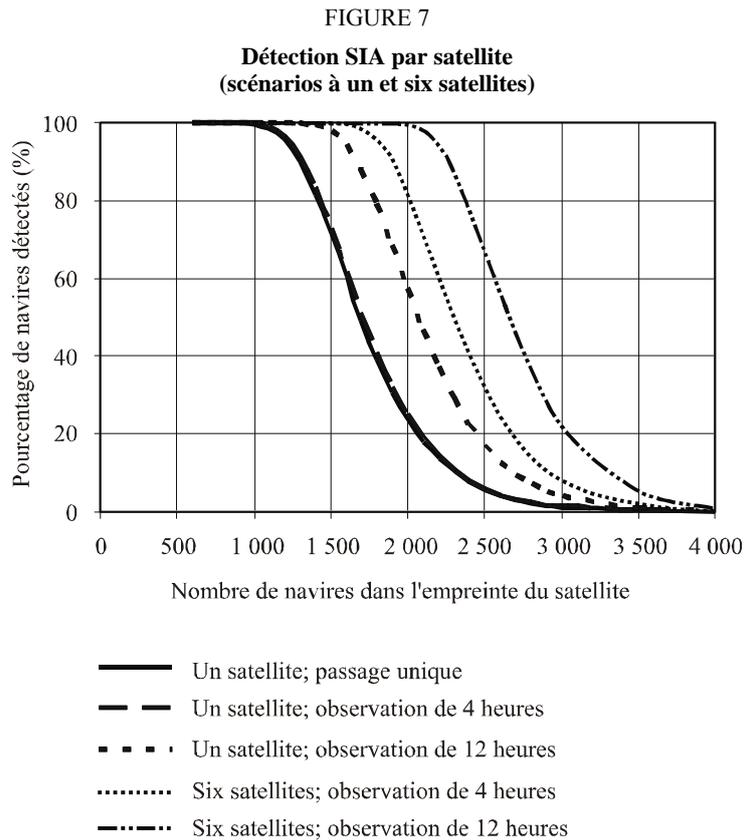
Constellation de satellites	Passage unique	Observation de 4 h	Observation de 12 h
1 satellite	818 s	853 s ⁽¹⁾	2 560 s
6 satellites	818 s	5 118 s	15 360 s

⁽¹⁾ Pour le cas de la constellation à un satellite, la valeur pour une période d'observation de 4 h est obtenue par moyenne sur une longue durée, étant donné que le navire peut rester invisible du satellite pendant plus de 9 h.

³ Dans le présent Rapport, les termes «période d'observation» et «période d'actualisation des emplacements des navires» sont interchangeables, les deux désignant la durée pendant laquelle on veut obtenir au moins une actualisation de l'identification et de la localisation d'un navire donné. Le terme «durée de visibilité» désigne la durée totale, exprimée en secondes, à l'intérieur de la période d'observation, pendant laquelle il existe un trajet à visibilité directe entre un navire donné et le satellite.

La méthode analytique et les statistiques de visibilité du satellite peuvent maintenant être combinées pour déterminer le pourcentage de navires détectés et la probabilité de détecter tous les navires. La Fig. 6 présente les résultats pour un passage de satellite classique. Dans le reste du présent Rapport, les courbes de la Fig. 6 sont prises comme références de la détection SIA par satellite des navires de classe A. La Fig. 7 permet de comparer la courbe de référence et les résultats pour d'autres périodes d'observation et pour une constellation à plusieurs satellites.





Dans le cadre de la présente étude, la notion de «capacité» du satellite est définie par deux cas de figure: 1) 80% des navires situés dans l'empreinte du satellite sont détectés; et 2) 100% des navires sont détectés. Selon ce principe et pour les exemples étudiés ci-dessus, le Tableau 8 récapitule les valeurs de capacité du satellite.

TABLEAU 8

Capacités calculées de détection SIA par satellite
(satellite sur une orbite polaire à 950 km d'altitude; navire à 40° de latitude; détection à 80%)

Constellation de satellites	Définition de la capacité	Passage unique	Observation de 4 h	Observation de 12 h
1 satellite	80%	1 420 navires	1 430 navires ⁽¹⁾	1 790 navires
6 satellites	80%	1 420 navires	2 018 navires	2 381 navires
1 satellite	100% ⁽²⁾	738 navires	753 navires	797 navires
6 satellites	100% ⁽²⁾	738 navires	1 052 navires	1 382 navires

⁽¹⁾ Pour le cas de la constellation à un satellite, la valeur pour une période d'observation de 4 h est obtenue par moyenne sur une longue durée, étant donné que le navire peut rester invisible du satellite pendant plus de 9 h.

⁽²⁾ Capacité calculée à 99,9%.

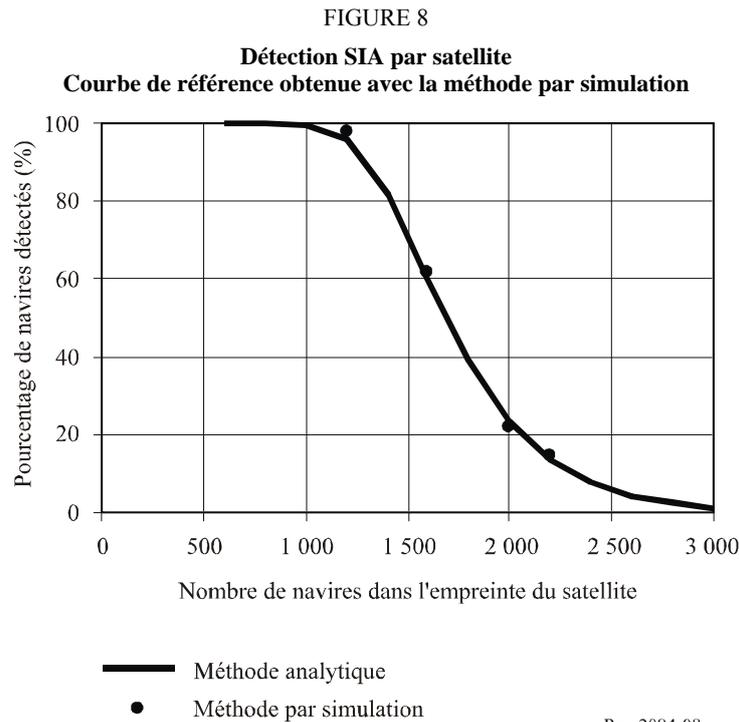
5.2 Méthode par simulation

Une autre démarche, fondée sur les méthodes de simulation Monte Carlo, a été utilisée pour étudier les limites de capacité de détection SIA par satellite. On a créé une base de donnée, sous forme de feuille Microsoft Excel[®], dans laquelle chaque enregistrement contient les paramètres techniques d'un navire situé dans l'empreinte du satellite. En brassant aléatoirement les paramètres clés d'émission de chaque unité SIA et en répétant, pour chaque jeu de paramètres, les calculs de puissance cumulée reçue au niveau du satellite dans un intervalle de temps donné, on a obtenu des valeurs statistiques dans un format identique à celui de la méthode analytique précédente. Les hypothèses principales utilisées ici dans la méthode de simulation Monte Carlo se déclinent comme suit:

- Les navires sont répartis uniformément dans une zone géographique circulaire de 3 281 km de rayon centrée sur le point au sol à la verticale du satellite.
- Les navires émettent de façon aléatoire sur le canal SIA 1 ou 2, et dans l'un des 2 250 intervalles de temps.
- Chaque navire de classe A émet avec une puissance et un intervalle moyen entre les comptes rendus tels que décrits précédemment.

Outre le calcul de la puissance cumulée au niveau du satellite, il convient de calculer le temps de propagation entre chaque navire simulé et le satellite de façon à correctement prendre en compte le facteur «collision d'intervalles de temps». Pour totaliser correctement, dans des conditions de temps de propagation variables, les puissances de brouillage reçues dans un intervalle de temps donné du signal désiré, l'intervalle de temps en question a été subdivisé en sous-intervalles. L'étude a montré qu'une subdivision en dix sous-intervalles fournissait une précision suffisante; en d'autres termes, un plus grand nombre de sous-intervalles ne change pas les résultats de façon significative. Le premier et le dernier des dix sous-intervalles, chacun d'une longueur de 20 bits, représentent les intervalles de chevauchement, c'est-à-dire les 20 bits vides du tampon. Les huit autres sous-intervalles font 27 bits chacun, soit un total de 256 bits pour les dix sous-intervalles. Si la puissance cumulée dans un seul de ces huit sous-intervalles centraux entraîne un rapport D/U inférieur à 10 dB, le message est déclaré perdu.

Plusieurs points obtenus avec la méthode par simulation sont indiqués sur la Fig. 8. Ils ont été calculés en appliquant cette méthode via une feuille Microsoft Excel[®]. La comparaison de ces points avec les valeurs correspondantes de la courbe de référence en Fig. 6 montre que les deux méthodes donnent des résultats proches.



5.3 Méthode stochastique

Tunaley⁴ décrit une troisième méthode de calcul statistique pour la détection des navires de classe A. Dans cette méthode, l'heure d'arrivée au niveau du satellite des messages SIA venant des navires est considérée comme une variable aléatoire qui suit une loi de Poisson. Les formules obtenues par cette méthode ont la même forme générale que celles de la méthode analytique étudiée précédemment, à l'exception du terme $P_{1,N}$ qui devient:

$$P_{1,N} \approx e^{(-\lambda \tau/2)}$$

où:

λ : $k \cdot (N - 1) / \Delta T$

k : facteur qui traduit la double collision d'intervalles, comme décrit précédemment (1,6)

τ : longueur des messages SIA (26,7 ms)

N : nombre de navires

ΔT : intervalle d'émission entre les messages

Dans le cas d'émetteurs de classe A situés dans un environnement où les navires sont répartis de façon uniforme, on peut facilement voir que les résultats obtenus avec cette méthode sont fondamentalement identiques aux résultats obtenus par la méthode analytique décrite plus haut dans ce chapitre. Cette similitude apparaît en effet si l'on utilise la forme approchée suivante de la fonction exponentielle:

$$e^{(-x)} \approx 1 - x \quad \text{pour } x \ll 1$$

⁴ Dr J.K.E. Tunaley, *A stochastic model for space-borne AIS*, [non daté].

En remplaçant la fonction exponentielle par cette approximation et en réorganisant les termes, la méthode analytique et la méthode stochastique fournissent des équations identiques dans le cas de rapports cycliques faibles.

Des résultats quasi identiques ont donc été obtenus par trois méthodes d'analyse différentes, preuve suffisante de leur validité. Dans l'étude suivante, les résultats pour différents scénarios seront comparés aux valeurs de référence calculées précédemment. Les trois démarches étant équivalentes, on utilisera la méthode la mieux adaptée à chaque scénario.

6 Analyse des brouillages intrasystème (classes A et B combinées)

On peut maintenant étudier le cas de la détection d'un navire de classe A dans un environnement où se trouvent à la fois des navires de classe A et des navires de classe B. La méthode stochastique décrite ci-dessus est bien adaptée à l'étude de ce scénario. Les unités de classe B étant de plus faible puissance, toute collision d'intervalles de temps n'entraîne pas nécessairement la perte d'un message. A titre d'exemple, la Fig. 2 montre que la collision entre un message SIA émis par un seul navire de classe B éloigné du point au sol à la verticale du satellite et un message SIA d'un navire de classe A proche de ce point se traduit par un rapport D/U voisin de +17 dB. Cette valeur dépasse de loin le critère de brouillage de 10 dB; la réception du message de classe A serait donc encore correcte. Cependant, les chevauchements de signaux dans un tel scénario peuvent éventuellement s'accumuler au point d'entraîner une perte de signal. La simple procédure analytique décrite précédemment ne peut donc s'appliquer car elle part principe que toute collision se traduit par une perte de message.

L'utilisation de la méthode stochastique nécessite quelques modifications. Plus précisément, il convient de remplacer le facteur λ par la formule suivante:

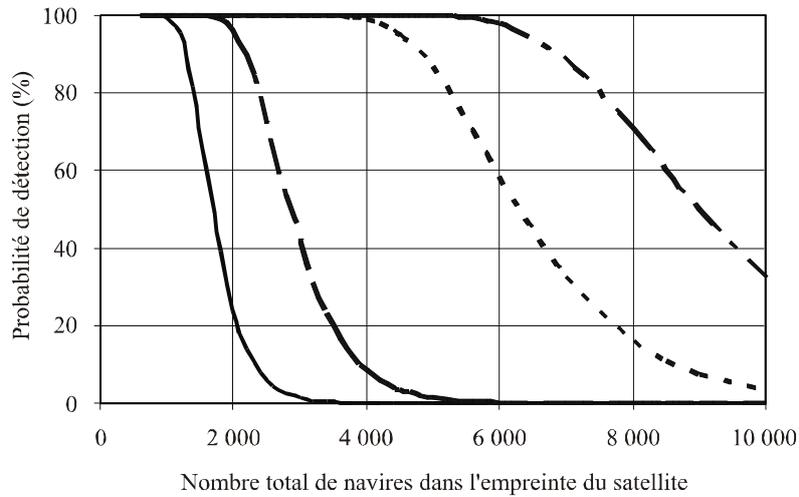
$$\lambda = k_A (N_A - 1) / \Delta T_A + k_B (N_B) / \Delta T_B$$

où les indices font référence aux paramètres correspondants de classe A ou B. La constante k_A a la même valeur que la constante k de l'équation précédente. Dans un premier temps, la constante k_B ne peut être estimée que de façon approximative. Elle prend en compte le fait qu'en fonction des niveaux relatifs de puissance dans le récepteur du satellite, seule une partie des collisions avec les intervalles de classe B entraîne une perte de message. On peut obtenir une estimation plus précise de la constante k_B en exécutant le modèle par simulation décrit plus haut pour un jeu de données unique. On obtient ainsi pour k_B une valeur de 1,2.

Les Fig. 9 à 11 montrent la probabilité de détecter un message SIA de classe A dans un environnement mixte constitué de navires de classe A et B dans différentes configurations.

FIGURE 9

Probabilité de détection dans un environnement mixte constitué de navires de classes A et B
(un satellite; un seul passage du satellite)*



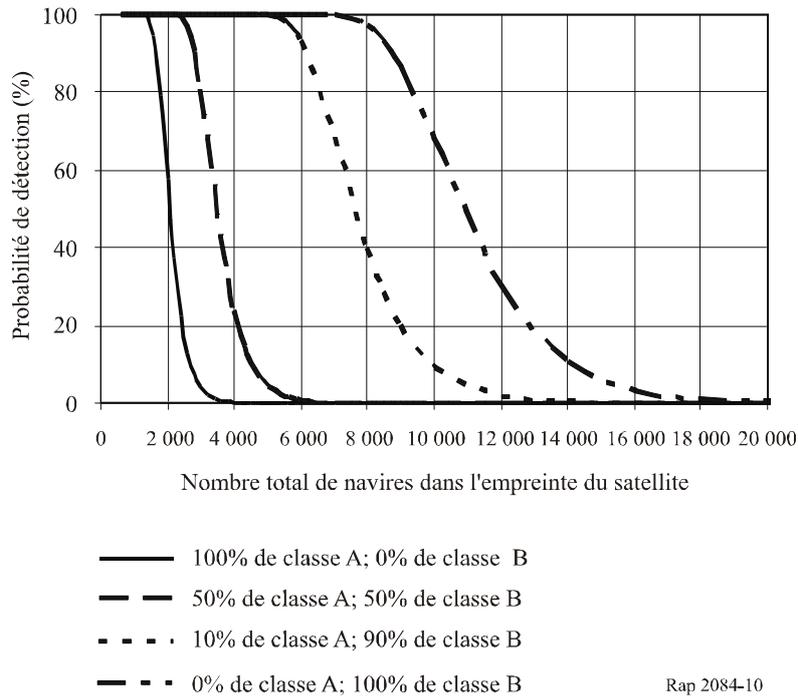
- 100% de classe A; 0% de classe B
- - 50% de classe A; 50% de classe B
- - - 10% de classe A; 90% de classe B
- - - - 0% de classe A; 100% de classe B

Rap 2084-09

* La courbe libellée «0% de classe A; 100% de classe B» correspond au cas hypothétique limite où la cible est un unique navire de classe A et où tous les autres navires de la zone sont de classe B.

FIGURE 10

**Probabilité de détection dans un environnement mixte constitué de navires de classes A et B
(un satellite; période d'observation de 12 h)***



* La courbe libellée «0% de classe A; 100% de classe B» correspond au cas hypothétique limite où la cible est un unique navire de classe A et où tous les autres navires de la zone sont de classe B.

7 Analyse des brouillages intrasystème (répartition des navires non uniforme)

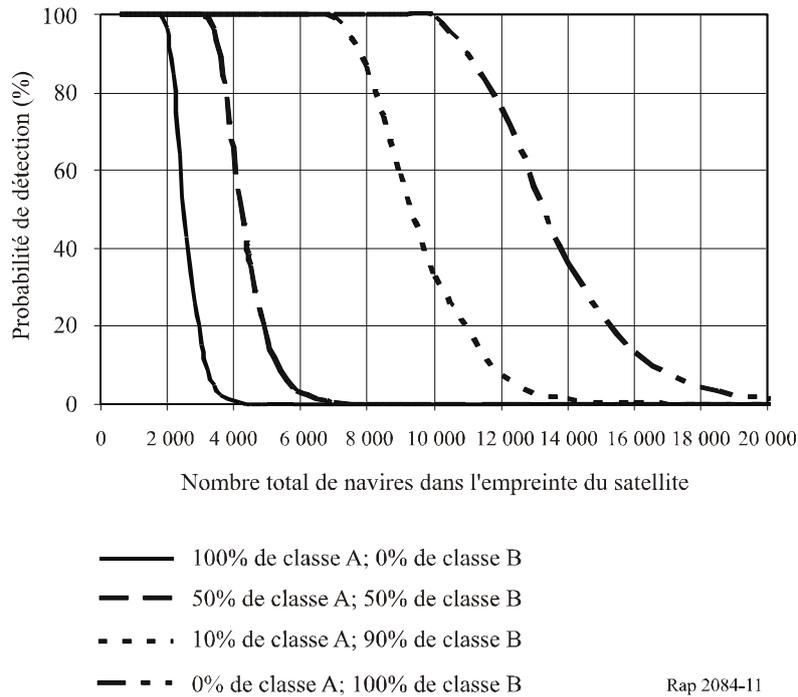
Les deux environnements étudiés précédemment – navires de classe A uniquement, combinaison de navires de classes A et B – prenaient pour hypothèse une répartition géographique constante et uniforme des navires dans l'empreinte au sol de l'antenne du satellite. Cette hypothèse simplificatrice a certes permis de calculer plus simplement la probabilité de détection, mais elle n'est pas forcément adaptée aux configurations réelles de localisation des navires. De façon à poursuivre l'étude dans le cas des répartitions de navires non uniformes, plus représentatives des environnements réels, on a développé une version modifiée de la méthode par simulation. Cette démarche nécessite de considérer de nouvelles variables:

- nombre total de navires équipés du SIA dans le monde,
- localisation géographique du navire cible qu'on souhaite détecter (latitude et longitude),
- répartition géographique mondiale des navires équipés du SIA,
- données relatives à la trajectoire au sol du satellite.

Il n'a pas été possible d'obtenir pour la présente étude le nombre officiel de navires équipés du SIA en service dans le monde. De plus, outre les navires tenus de s'équiper obligatoirement conformément au traité SOLAS, de plus en plus de grands yachts privés et de bâtiments de servitude s'équipent aujourd'hui d'unités de classe A. L'examen d'un certain nombre de sources fournit un nombre entre 50 000 et plus de 80 000. On utilise ici une estimation de 70 000 navires équipés de systèmes de classe A dans le monde en 2005.

FIGURE 11

Probabilité de détection dans un environnement mixte constitué de navires de classes A et B
(six satellites; période d'observation de 12 h)*



* La courbe libellée «0% de classe A; 100% de classe B» correspond au cas hypothétique limite où la cible est un unique navire de classe A et où tous les autres navires de la zone sont de classe B.

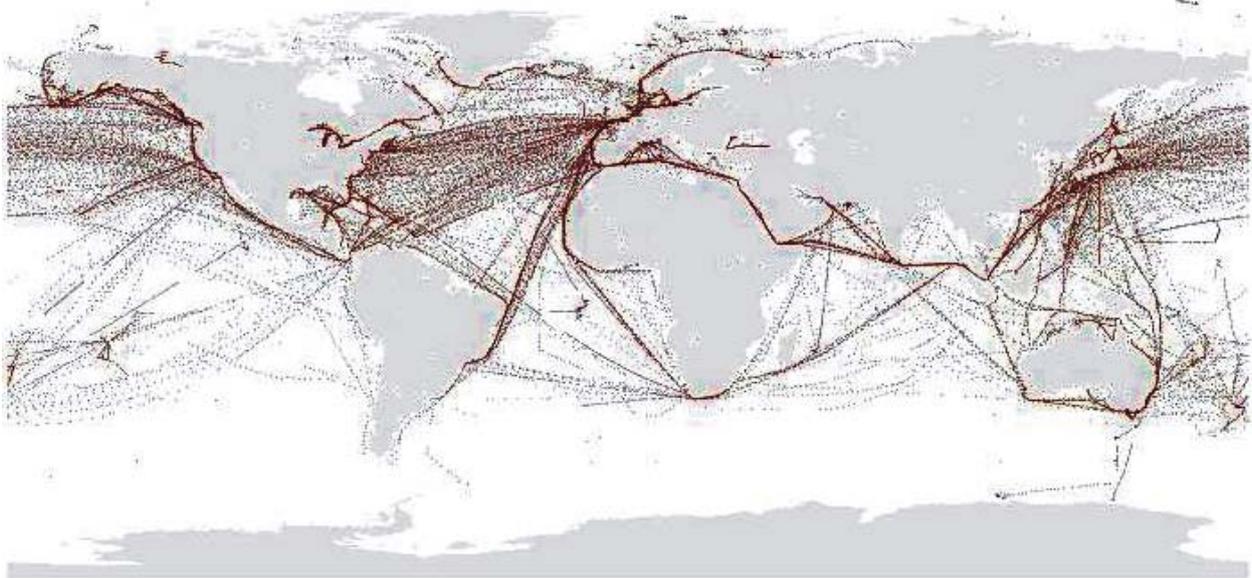
Il est évident que la localisation du navire cible a une grande influence sur la probabilité de détection. Un navire sera par exemple détecté avec une certitude de 100% s'il est éloigné des itinéraires de navigation très fréquemment empruntés, et avec une moindre certitude s'il est situé à proximité de ces zones. On a envisagé ici quatre emplacements arbitraires du navire cible: un navire situé à 1 000 km des côtes de New York, un navire situé à 1 000 km des côtes de Los Angeles, un navire proche du golfe du Mexique, un navire au milieu de l'Atlantique.

Décrire la répartition géographique des navires est dès lors un peu plus complexe. Les observations météorologiques transmises à titre bénévole par des navires en mer se révèlent fort utiles pour construire une représentation des densités de navires sur le globe. Un jeu de données d'octobre 2004 fournit par exemple plus de 80 000 rapports d'observation – latitudes et longitudes comprises – transmis par environ 800 navires. La Fig. 12 est une représentation de la répartition correspondante. Comme on peut s'y attendre, les données montrent que la densité des navires est nettement plus importante le long des zones côtières et des itinéraires de navigation principaux, et relativement plus faible dans les vastes zones océaniques. On considère par hypothèse que ces données fournissent une répartition plausible des emplacements relatifs des navires de classe A dans le monde. Cette répartition ne serait pas valable en revanche pour les navires de classe B, qui devraient à l'avenir se concentrer majoritairement le long des côtes.

FIGURE 12

Exemple d'une répartition des navires de classe A dans le monde

Positions transmises par des navires effectuant des observations à titre bénévole
Octobre 2004



Rap 2084-12

Cette base de données permet, dans un premier temps, d'étudier la détection des navires de classe A à partir d'une répartition mondiale plus réaliste.

Sur cette base, il est possible d'analyser des répartitions de navires non uniformes en appliquant un processus de simulation Monte Carlo identique à celui décrit précédemment, moyennant les changements suivants:

- utilisation d'un sous-ensemble aléatoire de localisations de navires issu des données d'observation météorologiques à la place d'une répartition uniforme dans l'empreinte du satellite,
- déplacement du satellite le long d'une orbite représentative située au-dessus du navire cible conformément aux paramètres orbitaux du satellite pris comme hypothèse.

Les Fig. 13 à 16 présentent les probabilités calculées de détection d'un navire de classe A en fonction du nombre de navires de classe A équipés du SIA à l'échelle mondiale pour les quatre cas identifiés ci-dessus. A noter le changement de l'axe des abscisses qui représente maintenant le nombre total de navires, sur l'ensemble du globe, équipés de SIA de classe A.

8 Techniques envisageables pour améliorer la capacité des satellites

Les résultats présentés ci-après démontrent la faisabilité technique de l'utilisation de la détection SIA par satellite en vue d'effectuer un suivi des navires sur de longues distances, et montrent les limitations d'une telle technique. Il ressort de l'étude de différentes configurations satellitaires et estimations de la densité mondiale des navires équipés de SIA de classe A que la densité des navires dans certaines zones géographiques, notamment dans l'Atlantique Nord, dépasse la capacité du satellite à suivre les navires. On a donc mené des études complémentaires sur différents concepts et techniques visant à augmenter la capacité des satellites à gérer les messages SIA émis par ces zones à forte densité de navires. A cet effet, il est généralement suffisant et plus pratique d'étudier le problème en considérant une répartition uniforme, qui fournit des résultats d'amélioration de capacité similaires en pourcentage à l'étude reposant sur une base de données de répartition

mondiale réelle. L'étude qui suit prend donc pour hypothèse une répartition uniforme. Quatre techniques sont envisagées.

FIGURE 13
Statistiques de détection obtenues en utilisant des données de répartition des navires à l'échelle mondiale (navire cible situé à 1 000 km des côtes de Los Angeles, Californie, Etats-Unis)

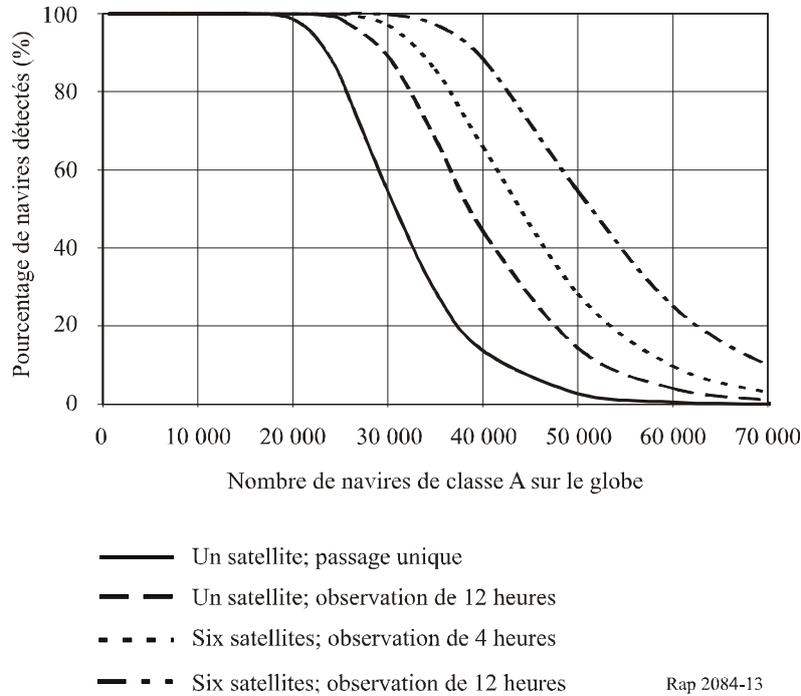


FIGURE 14
Statistiques de détection obtenues en utilisant des données de répartition des navires à l'échelle mondiale (navire cible situé à 1 000 km des côtes de New-York, Etats-Unis)

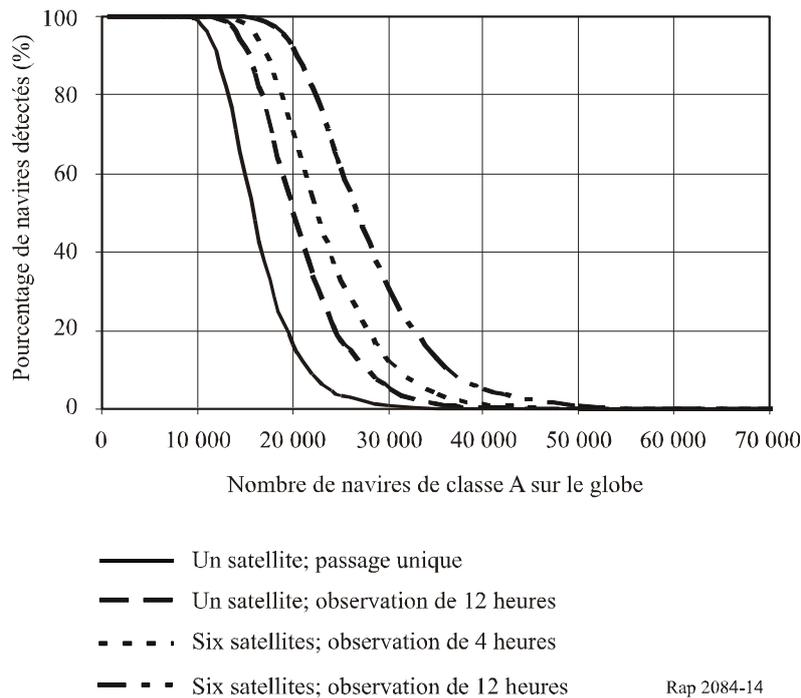
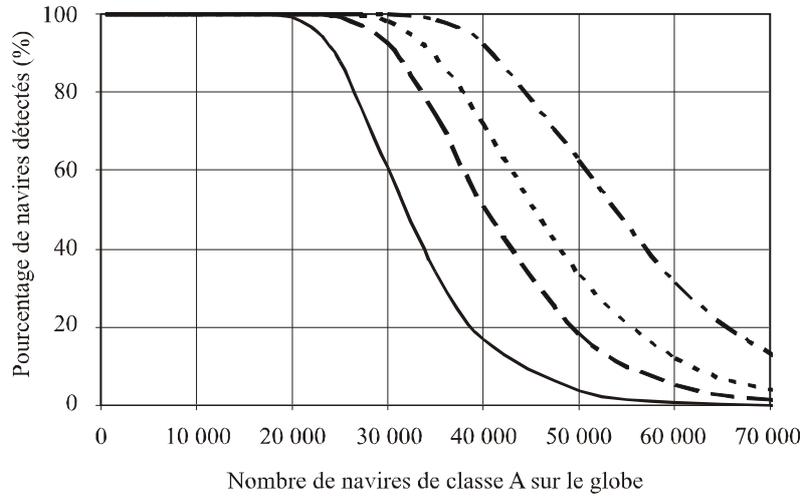


FIGURE 15

Statistiques de détection obtenues en utilisant des données de répartition des navires à l'échelle mondiale (navire cible situé dans le golfe du Mexique)

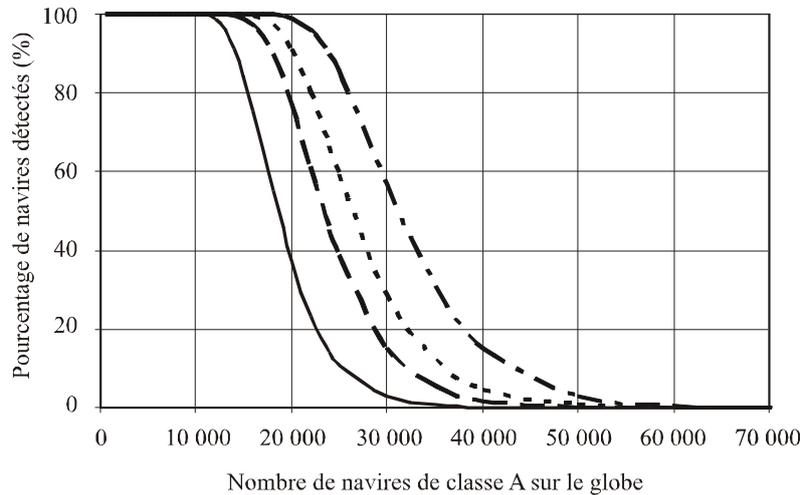


- Un satellite; passage unique
- - - Un satellite; observation de 12 heures
- Six satellites; observation de 4 heures
- . - . Six satellites; observation de 12 heures

Rap 2084-15

FIGURE 16

Statistiques de détection obtenues en utilisant des données de répartition des navires à l'échelle mondiale (navire cible situé au milieu de l'Atlantique)



- Un satellite; passage unique
- - - Un satellite; observation de 12 heures
- Six satellites; observation de 4 heures
- . - . Six satellites; observation de 12 heures

Rap 2084-16

8.1 Antenne du satellite

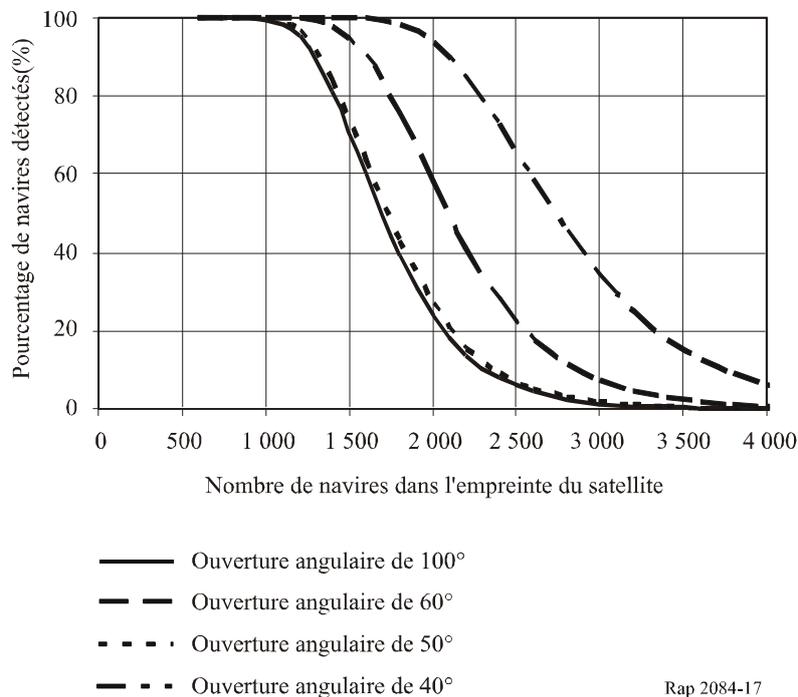
On a supposé précédemment que le satellite SIA possédait une antenne à large faisceau (ouverture de 100°) dont le gain maximal était dirigé vers le point au sol à la verticale du satellite. On cherche ici à déterminer si une antenne à faisceau plus étroit peut réellement améliorer la capacité du satellite. La réduction de l'ouverture du faisceau entraîne une baisse du nombre des messages SIA parasites reçus par le satellite à un moment donné. Cette baisse provoque à son tour une augmentation des probabilités de détection et donc une réelle amélioration de la capacité du satellite.

Deux facteurs tendent cependant à limiter cet effet. D'une part, malgré la réduction de l'ouverture du faisceau à -3 dB, le gain des lobes latéraux pointant vers l'horizon peut suffire à détecter des messages SIA parasites émis par des navires à l'horizon ou proches de l'horizon. D'autre part, du fait de la réduction de l'empreinte du satellite, la durée de visibilité par le satellite d'un navire cible donné est plus courte. Or, les équations fournies au § 5 indiquent qu'une réduction de la durée de visibilité du satellite entraîne une diminution de sa capacité de détection.

La Fig. 17 montre les effets combinés de ces trois facteurs antagonistes. On peut voir qu'une ouverture angulaire d'antenne inférieure ou égale à 60° permet d'améliorer la capacité du satellite. Amélioration dont le coût peut être élevé car réduire l'ouverture angulaire implique obligatoirement d'augmenter la taille de l'antenne, contrainte éventuellement incompatible avec le concept d'un petit satellite OTB.

FIGURE 17

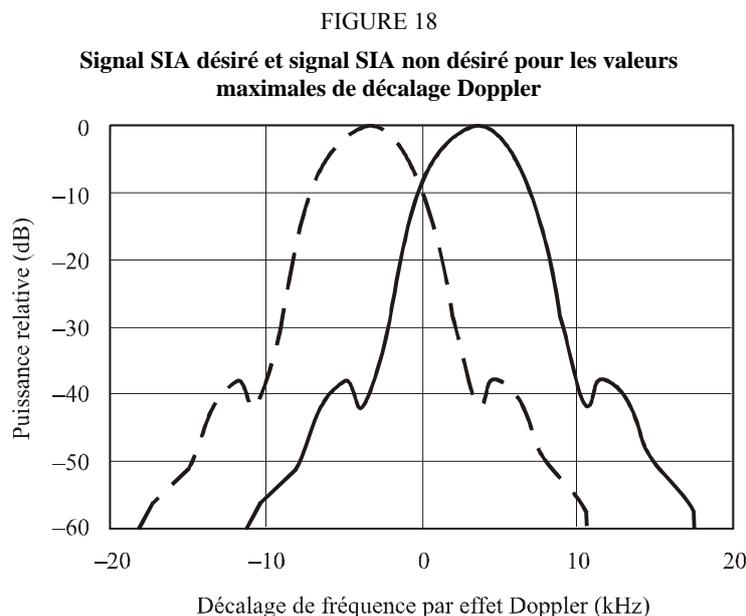
Statistiques de détection pour différentes ouvertures angulaires de l'antenne du satellite
(un satellite; un seul passage)



8.2 Poursuite Doppler

Autre démarche d'amélioration de la capacité testée actuellement sur un ancien satellite de démonstration, l'utilisation de la technique de poursuite Doppler. Les décalages Doppler causés par le mouvement du satellite pouvant atteindre $\pm 3,5$ kHz, il est nécessaire de choisir initialement une largeur de bande du récepteur satellitaire SIA supérieure à la valeur optimale pour la modulation GMSK. L'augmentation de la largeur de bande permet ainsi de recevoir un signal SIA désiré quelles que soient les conditions de décalage Doppler, mais elle entraîne aussi la réception de tous les signaux SIA parasites émis sur le même canal et répondant aux mêmes conditions de décalage Doppler.

Une technique combinant une poursuite automatique du décalage Doppler du signal SIA désiré et un ajustement correspondant de la fréquence permet d'utiliser une largeur de bande de réception plus étroite, ce qui correspond en quelque sorte à discriminer le message désiré et d'autres signaux SIA parasites subissant des décalages Doppler différents. Il n'est pas nécessaire de décrire en détail les techniques de poursuite Doppler pour étudier les améliorations de la capacité du satellite qu'on peut en attendre. La Fig. 18 montre les spectres typiques d'émission RF de deux signaux modulés en GMSK avec un débit de 9,6 kbit/s et présentant des décalages Doppler différents: un signal SIA désiré et un signal SIA parasite. Dans cet exemple, le signal SIA désiré est décalé par effet Doppler de $-3,5$ kHz par rapport à la fréquence centrale nominale alors que le signal non désiré est décalé de $+3,5$ kHz. La différence entre les fréquences centrales des deux signaux est donc de 7 kHz. C'est cette différence des décalages Doppler qui permet de discriminer le message désiré et les messages SIA parasites transmis par d'autres navires.



En suivant en temps réel le décalage en fréquence d'un signal désiré dû à l'effet Doppler, il est possible de compenser ce décalage. La Fig. 19 présente l'exemple précédent en bande de base: le décalage Doppler du signal désiré a été déterminé et compensé, et le signal non désiré est séparé en fréquence d'une valeur égale à la différence des décalages Doppler, soit 7 kHz dans cet exemple.

En appliquant au signal de la Fig. 19 un filtre passe bas à bande étroite, on peut obtenir une réduction importante du niveau du signal brouilleur. A noter cependant que l'exemple en question présente le cas le plus favorable où la différence des décalages Doppler est maximale. Si l'on considère la répartition des navires, la différence moyenne des décalages Doppler est plutôt

d'environ 2,7 kHz. La courbe de discrimination Doppler en fonction de la différence des décalages Doppler, obtenue avec un système prototype, est représentée en Fig. 20.

Pour évaluer l'efficacité de cette technique, il est nécessaire d'utiliser la méthode d'analyse par simulation. Le modèle par simulation décrit plus haut est affiné: 1) prise en compte du calcul de décalage en fréquence par effet Doppler du système SIA désiré d'une part, et de chaque système SIA non désiré d'autre part, et 2) réduction du niveau de puissance d'une quantité égale à la valeur indiquée par la courbe de la Fig. 20 pour un passage unique du satellite. Les résultats sont représentés à la Fig. 21.

FIGURE 19

Signal SIA désiré et signal SIA non désiré en bande de base après compensation de l'effet Doppler

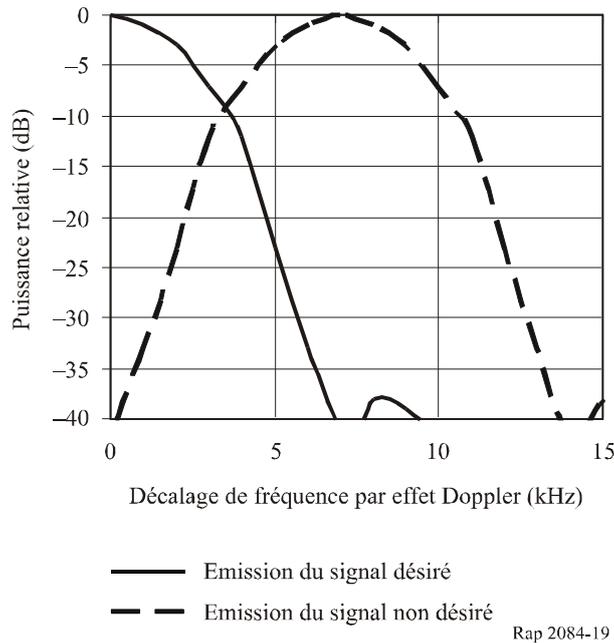


FIGURE 20

Discrimination Doppler après filtrage à bande étroite

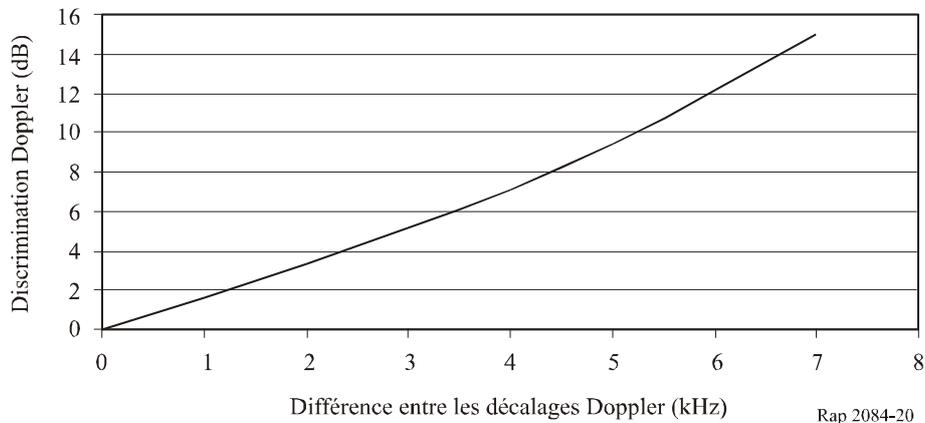
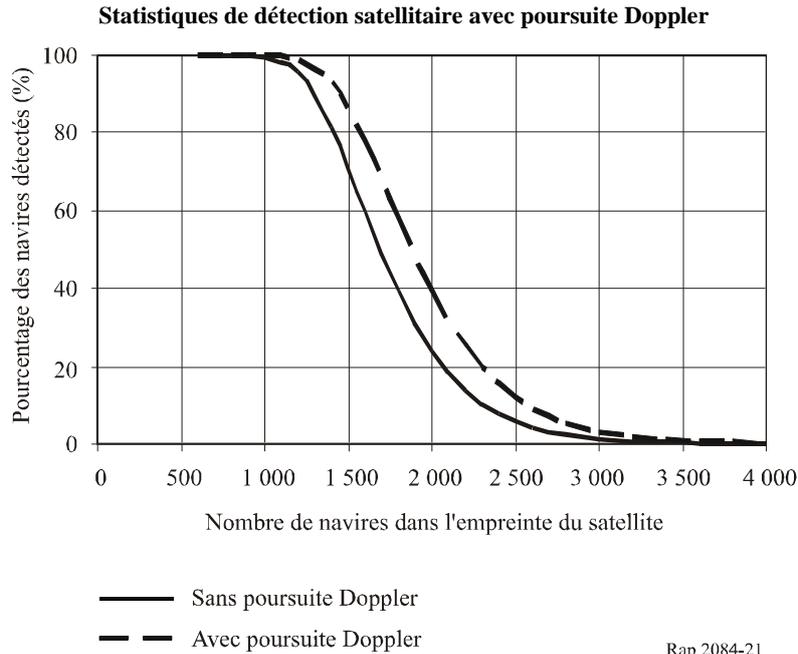


FIGURE 21

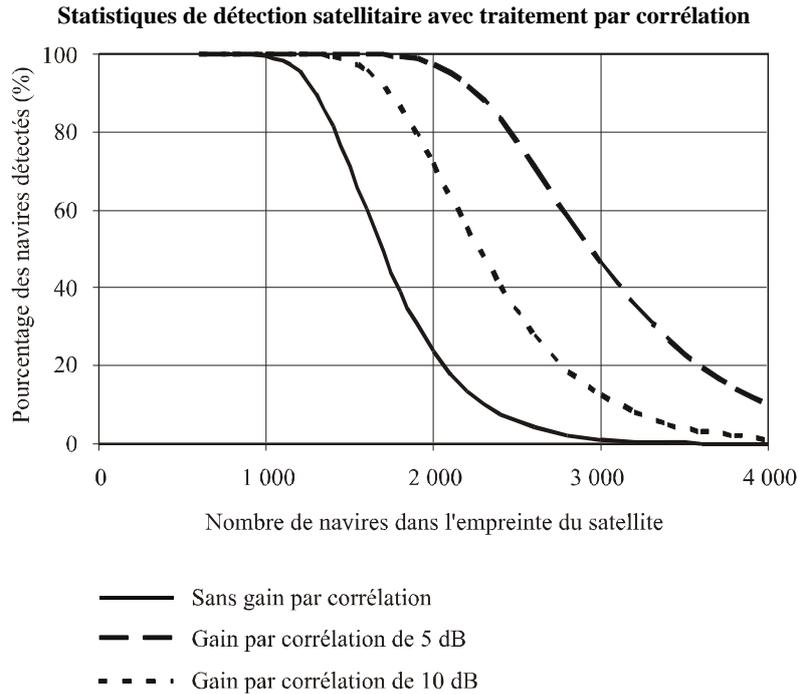


8.3 Traitement par corrélation

On peut envisager une autre technique d'amélioration de la capacité du satellite à condition de modifier son architecture: soit un traitement spécifique embarqué sur le satellite, soit la transmission en continu par liaison descendante des données reçues sur les deux canaux SIA en vue d'un traitement spécifique dans une station terrestre au sol. On tirerait ainsi avantage de la forte corrélation entre deux messages SIA consécutifs émis par un navire donné. Considérons, à titre d'exemple, que la durée de visibilité pour un passage unique d'un satellite classique à la verticale est de 13 min. Pendant ce temps, un navire donné transmet à peu près 116 messages SIA, environ 60% des bits de chacun de ces messages étant répétés à l'identique. Le code d'identification MMSI du navire est notamment répété dans chaque message. En corrélant en continu les deux signaux SIA reçus avec les copies numérisées des signaux reçus au cours de la durée de visibilité de 13 min précédente, on peut espérer une certaine amélioration. En outre, étant donné les débits de données relativement faibles des émissions SIA, il doit être possible d'utiliser des techniques de corrélations massivement parallèles pour traiter en temps réel et en continu les données reçues par liaison descendante.

Une étude complémentaire s'impose pour déterminer le gain par corrélation obtenu grâce à cette technique. On peut toutefois en estimer l'impact réel sur la capacité de détection SIA des satellites. Le gain obtenu par la technique de corrélation sur un signal SIA désiré permettrait de discriminer d'autres messages SIA non désirés par comparaison des puissances en décibels. Par conséquent, cette technique permettrait une détection correcte pour des rapports D/U inférieurs à la normale, réduisant ainsi le critère de protection D/U de référence (10 dB). Le modèle par simulation décrit précédemment permet de déterminer les effets des variations du critère de protection D/U sur les probabilités de détection SIA. Les trois courbes de statistiques de détection en Fig. 21a permettent de comparer les effets du traitement par corrélation: courbe pour un gain hypothétique de 5 dB, courbe pour un gain hypothétique de 10 dB et courbe de référence sans gain par corrélation pour un passage unique du satellite.

FIGURE 21a



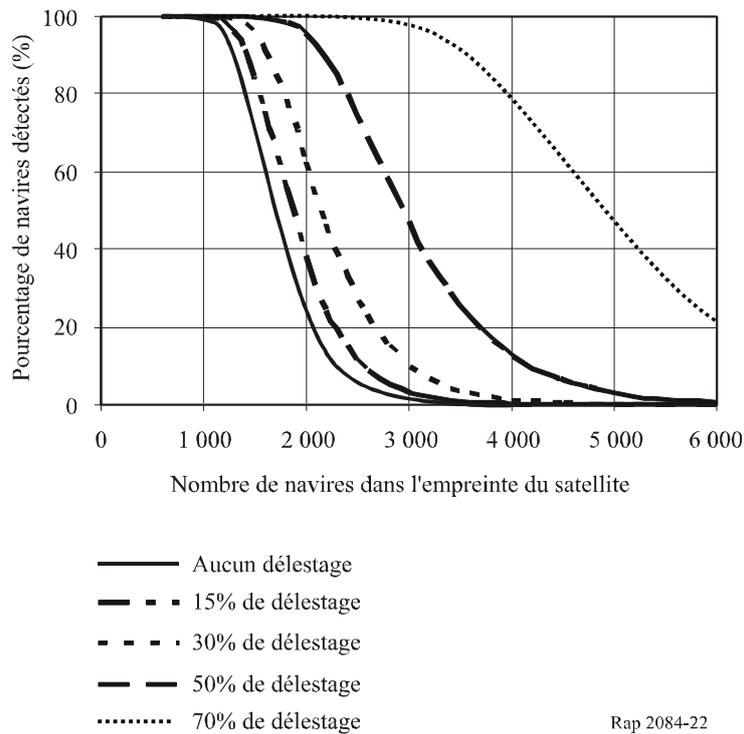
Rap 2084-21a

8.4 Délestage du trafic maritime côtier

L'architecture SIA permet à une station côtière d'ordonner aux navires se trouvant dans son rayon de communication de passer automatiquement l'un des canaux SIA sur une autre fréquence de la bande d'ondes métriques (VHF) du service maritime. Le changement de fréquence est transparent pour l'opérateur du navire et a un impact minimal sur les fonctions de communication SIA normales navire à navire et navire à côte. Utilisée de façon systématique dans les zones côtières très fréquentées, cette fonctionnalité permettrait de délester la détection SIA par satellite des navires des bords de côte. Les probabilités de détection par satellite des messages SIA émis par les navires en mer seraient par conséquent améliorées. Une méthode pour tester ce concept pourrait consister à modifier les stations côtières répertoriées dans la base de données de la Fig. 12 de sorte que seul le canal AIS 1 soit en exploitation, et à relancer l'analyse par simulation. Mais l'identification et la modification des navires côtiers dans une base de 80 000 enregistrements se sont révélées inenvisageables. Or, du fait de la très grande taille de l'empreinte au sol du satellite et des effets du mouvement du satellite sur le caractère aléatoire du système, modifier simplement la même proportion de navires sur toute la base de données plutôt que sur les navires côtiers exclusivement fournit quasiment le même résultat. La Fig. 22 présente les probabilités de détection résultant de l'utilisation de la répartition non uniforme des navires décrite précédemment pour différents pourcentages de délestage du trafic SIA 2 pendant un seul passage du satellite. Les différentes valeurs de délestage envisagées incluent le cas où seuls les navires situés à proximité des zones portuaires majeures ont reçu l'ordre de délester le canal SIA 2 et le cas où tous les navires de bord de côte ont délesté le canal.

FIGURE 22

**Statistiques de détection par satellite avec un délestage du canal SIA 2
des navires de bord de côte**



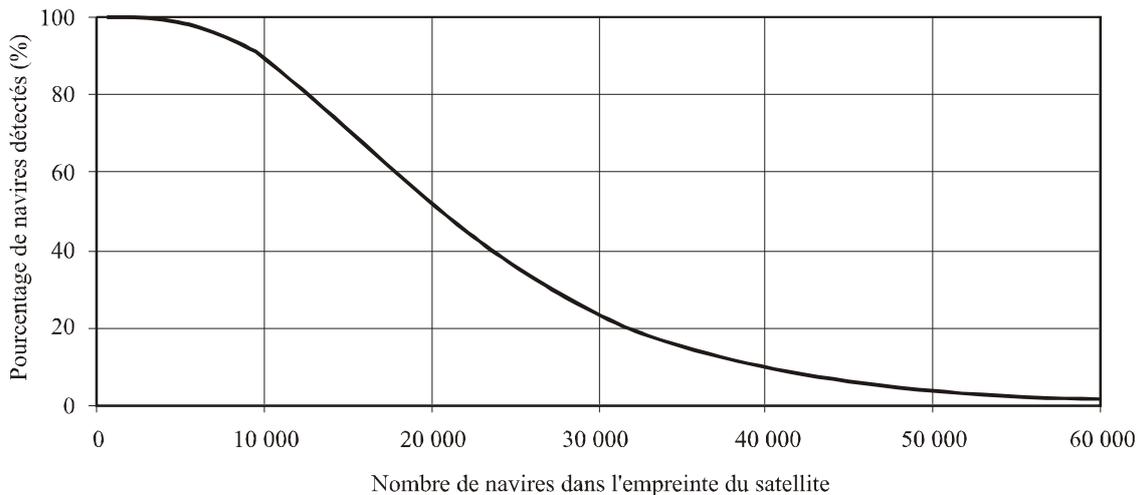
8.5 Solutions/études à long terme

Sur le long terme, pour améliorer encore la détection satellitaire, il pourrait être utile d'appliquer simultanément plusieurs techniques parmi celles décrites précédemment.

Par ailleurs, une autre étude sur le long terme a été proposée au sein de l'OMI: utiliser un troisième canal SIA avec une structure de message optimisée pour la détection par satellite. Le concept n'est pas encore finalisé quant à la bande de fréquences ou au canal spécifique qui pourraient être utilisés pour cette option. Afin de définir les bandes de fréquences ou les canaux d'exploitation, il importe de prendre en compte les brouillages causés par les services existants dans les bandes en question de façon à déterminer si le SIA par satellite dans une bande ou un canal donné est réalisable ou non. Outre une redéfinition des bandes de fréquences, une diminution de la longueur des messages et un allongement des intervalles de répétition permettraient d'améliorer considérablement la capacité du satellite. En appliquant la méthode analytique décrite plus haut avec un message de 128 bits de longueur et un intervalle de répétition de 3 min par exemple, la capacité du satellite peut dépasser 10 000 navires situés dans l'empreinte du satellite. La Fig. 23 illustre ce point. A noter que cette solution requiert une modification des installations actuelles et futures des systèmes SIA des navires.

FIGURE 23

Exemple d'un satellite avec un troisième canal SIA



Rap 2084-23

9 Compatibilité avec d'autres systèmes fixes et mobiles existants

Les deux fréquences désignées comme les canaux d'exploitation du SIA terrestre au sein du service maritime mobile n'ont pas été attribuées de façon exclusive. Ces canaux, et d'autres adjacents, sont en effet alloués et utilisés pour d'autres applications du service mobile dans diverses régions du monde, notamment les stations côtières de correspondance publique en ondes métriques (ci-après VPCS pour *VHF public correspondence stations*) dans le service mobile maritime et les systèmes de radiocommunication mobiles terrestres (ci-après LMR pour *land mobile radio*). Le déploiement des VPCS se poursuit dans certaines zones géographiques, notamment en nombre limité le long des côtes. La plupart des pays ont décidé de distribuer les stations LMR dans les zones éloignées des côtes et des voies de navigation de façon à assurer la compatibilité entre le service mobile maritime et le service mobile terrestre. Cependant, les antennes des satellites, du fait de leur large couverture, sont toujours susceptibles de recevoir des émissions de systèmes mobiles situés à l'intérieur des terres.

Les listes d'attribution de fréquences font apparaître que la densité actuelle de déploiement des systèmes LMR utilisant les canaux SIA est inférieure à la densité de déploiement sur d'autres canaux de la bande 156-162 MHz et très inférieure à la densité que l'on rencontre habituellement dans les autres canaux VHF alloués au service mobile terrestre.

Les paragraphes suivants décrivent la qualité de détection SIA par satellite en exploitation conjointe avec des systèmes mobiles dans le même canal ou dans un canal adjacent. L'étude porte d'abord sur des scénarios simples où les navires sont répartis de façon uniforme, puis, à travers plusieurs exemples, sur les répartitions non uniformes, plus réalistes, décrites précédemment.

9.1 Systèmes mobiles dans le même canal

Pour étudier le fonctionnement des satellites SIA dans un environnement de systèmes mobiles, il convient en premier lieu d'établir la liste des paramètres techniques des systèmes VPCS et LMR. Le Tableau 10 fournit une liste des paramètres caractéristiques. Comme on peut le voir, la puissance apparente rayonnée (p.a.r.) des systèmes VPCS et LMR peut typiquement dépasser de 14 dB celle des émetteurs SIA des navires partageant les mêmes fréquences. Cette différence de p.a.r. ne pose pas de problème de compatibilité entre les deux services terrestres dès lors qu'ils sont suffisamment distants l'un de l'autre. Il en irait autrement de la détection SIA par satellite. En effet, comme indiqué précédemment, l'empreinte au sol d'un satellite OTB peut mesurer environ 3 281 km de

rayon. Tout système mobile fonctionnant dans le même canal à l'intérieur de l'empreinte sera visible directement du satellite plusieurs fois par jour pendant un certain temps.

TABLEAU 9

Paramètres techniques VPCS et LMR typiques

Paramètre	Station de base mobile terrestre (large bande)	Station de base mobile terrestre (bande étroite)	Station côtière de correspondance publique en ondes métriques
p.a.r. en transmission	De 37 à 56 dBm (typiquement 54 dBm)	De 37 à 56 dBm (typiquement 54 dBm)	50 dBm
Modulation	16F3E	11F3E	16F3E
Largeur de bande des canaux	25 kHz	12,5 kHz	25 kHz
Gain de l'antenne	De 0 à 9 dBd (typiquement 6 dBd)	De 0 à 9 dBd (typiquement 6 dBd)	
Diagramme d'antenne	Equidirectif	Equidirectif	Equidirectif

Etant donné que la p.a.r. des systèmes mobiles types est supérieure à celle des systèmes SIA sur navires, une seule station VPCS ou LMR fonctionnant dans le même canal que le satellite à l'intérieur de son empreinte peut éventuellement entraîner des valeurs négatives de rapport D/U (signal désiré/signal non désiré). Lors d'une étude préliminaire, un scénario représentatif a montré que pendant les périodes de visibilité directe le rapport D/U pouvait varier de -17 dB à $+5$ dB avec une moyenne de -6 dB, soit dans tous les cas une valeur inférieure au seuil D/U nominal permettant une détection SIA acceptable⁵. La valeur moyenne du rapport D/U de -6 dB calculée dans l'étude en question est cohérente avec le fait que la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) utilisée pour l'émetteur du système mobile était supérieure de 6 dB à celle de l'émetteur SIA du navire. Le Tableau 10 fournit un échantillon des calculs effectués au cours de ladite étude pour deux passages du satellite mettant en jeu un émetteur LMR type situé au centre des Etats-Unis et un navire équipé du SIA dans l'océan Atlantique. Si les émetteurs du service mobile dans le même canal fonctionnaient sur la base d'un rapport cyclique de 100%, on pourrait immédiatement conclure que la détection SIA par satellite n'est pas compatible avec les autres applications du service mobile dans le même canal.

⁵ Une méthode simplifiée a été utilisée lors de l'étude en question: p.i.r.e. des stations mobiles constante de 50 dBm dans l'hémisphère nord; p.i.r.e. des navires SIA constante de 44 dBm dans l'hémisphère Nord; gain d'antenne du satellite constant en direction de la terre; pas de discrimination de polarisation; propagation en espace libre pendant les périodes de visibilité du satellite.

TABLEAU 10

Exemples de calculs du rapport D/U reflétant les effets d'une station terrestre de surveillance environnementale type située au centre des Etats-Unis sur la communication entre un satellite et un navire situé dans l'océan Atlantique

Système cofréquence vers satellite			Navire vers satellite			
Azimut (degrés)	Elévation (degrés)	Distance (km)	Azimut (degrés)	Elévation (degrés)	Distance (km)	D/U (dB)
Passage N° 1						
9,1	24,8	1 838,9	316,7	1,5	3 470,7	-11,5
16,1	33,6	1 534,4	310,3	3,4	3 274,1	-12,6
28,7	44,6	1 285,6	303,1	5,0	3 115,5	-13,7
54,4	55,4	1 131,2	295,3	6,2	3 001,5	-14,5
95,4	57,0	1 112,1	286,9	6,9	2 937,7	-14,4
125,8	47,4	1 234,7	278,2	7,0	2 927,4	-13,5
140,9	35,9	1 463,6	269,7	6,5	2 971,0	-12,1
149,0	26,5	1 757,3	261,6	5,4	3 066,1	-10,8
153,8	19,1	2 087,8	254,1	3,9	3 207,5	-9,7
157,1	13,2	2 439,3	247,4	2,1	3 388,9	-8,9
159,4	8,3	2 803,1	241,4	0,1	3 603,5	-8,2
112,6	3,1	3 290,4	217,1	28,2	1 693,2	-0,2
117,9	0,5	3 556,0	208,7	21,1	1 982,8	-0,9
Passage N° 2						
93,9	0,5	3 568,8	184,1	65,3	1 038,1	4,7
87,0	1,5	3 464,2	63,6	89,3	956,9	5,2
79,8	2,1	3 401,9	7,3	64,9	1 043,2	4,3
72,4	2,3	3 384,5	6,7	45,9	1 262,7	2,6
65,0	2,0	3 413,0	6,6	32,7	1 559,6	0,8
57,8	1,4	3 486,3	6,7	23,3	1 897,0	-0,7
51,1	0,3	3 601,3	6,8	16,4	2 255,9	-1,9
52,6	1,5	3 477,2	3,9	18,4	2 142,9	-1,8
59,9	1,3	3 487,0	7,7	25,6	1 802,5	-0,3
67,0	0,9	3 536,0	13,9	35,0	1 493,1	1,5
73,8	0,1	3 622,7	25,7	47,3	1 239,7	3,3
144,3	4,7	3 122,4	230,7	5,0	3 098,7	-5,9
147,3	1,2	3 472,4	225,4	2,1	3 376,8	-5,8
38,5	1,1	3 514,7	358,1	8,2	2 841,9	-4,2
94,2	1,5	3 457,1	201,5	65,5	1 036,2	4,5
150,9	20,4	2 021,3	255,4	4,9	3 115,2	-9,8
154,7	14,3	2 366,4	248,4	3,1	3 288,7	-8,9
157,4	9,3	2 725,9	242,2	1,0	3 497,6	-8,2
102,9	13,2	2 445,7	261,2	30,3	1 627,0	-2,5
92,5	14,8	2 347,1	279,3	32,7	1 554,9	-2,4
81,3	15,3	2 315,9	298,2	31,7	1 584,9	-2,7
70,3	14,7	2 354,9	314,5	28,0	1 711,4	-3,2
59,9	13,1	2 460,7	326,9	22,9	1 914,9	-3,8
50,9	10,9	2 625,1	336,0	17,8	2 173,2	-4,4
43,2	8,2	2 837,4	342,7	13,1	2 468,1	-4,8

La plupart des systèmes de communication mobiles ont heureusement un rapport cyclique à l'émission inférieur à 100%. A partir des mesures de spectre par voie hertzienne réalisées aux Etats-Unis dans des parties choisies de la bande 138-174 MHz et d'autres sources d'informations, on peut grossièrement classer les émetteurs du service mobile en trois catégories: rapport cyclique élevé (30-100%), rapport cyclique moyen (10-30%) et rapport cyclique faible (<10%). Le Tableau 11 fournit des exemples dans chaque catégorie.

TABLEAU 11

Exemples d'émetteurs du système mobile pour différents rapports cycliques

Rapport cyclique élevé (30-100%)	Rapport cyclique moyen (10-30%)	Rapport cyclique faible (<10%)
Systèmes de radiomessagerie	Répéteurs LMR d'entreprise/industriels multi-utilisateurs (c'est-à-dire répéteurs communautaires)	Majorité des systèmes LMR privés monoutilisateurs
Canal de contrôle des systèmes interurbains	Gestion de flotte de véhicules de la sécurité publique	Majorité des systèmes LMR de l'administration publique
Systèmes de prévision (par exemple prévisions météorologiques)	Canaux de communication des systèmes interurbains	Certains types de liaisons de contrôle fixes LMR
Certains systèmes de télémesure transportables (par exemple capteurs sismiques)	Voies mobiles maritimes en ondes métriques en service normal	
Stations côtières de correspondance publique en ondes métriques		
Certains types de liaisons de contrôle fixes LMR		

On peut analyser le fonctionnement en cofréquence des émetteurs VPCS et LMR dont le rapport cyclique en émission est inférieur à 100% de la même façon qu'on a analysé précédemment la qualité de fonctionnement intrasystème. On étudie par conséquent les paramètres techniques clés suivants: p.i.r.e. des émetteurs, diagramme de gain d'antenne en élévation et rapport cyclique des émetteurs. L'impact cofréquence dû aux émetteurs VPCS/LMR peut être déterminé en ajoutant simplement les nouveaux émetteurs – via leurs trois paramètres clés – dans le modèle par simulation décrit plus haut. A cet effet, on a considéré le système mobile suivant: p.i.r.e. égale à 50 dBm, polarisation verticale, gain d'antenne en élévation de forme cosinus carré. S'agissant du SIA, on a utilisé les paramètres listés au Tableau 5. Seule modification requise, prendre en compte le fait que la plupart des systèmes mobiles fonctionnent sur une seule fréquence et non sur deux fréquences alternées comme les émetteurs SIA.

Les Fig. 24 à 28 présentent les résultats obtenus pour le scénario de référence «satellite unique/passage unique» selon différentes hypothèses. La Fig. 24 montre le pourcentage de navires détectés lorsque 1 000 navires de classe A se trouvent dans l'empreinte du satellite et que les deux canaux SIA exploités sont en cofréquence avec des systèmes mobiles. Plusieurs rapports cycliques en émission ont été envisagés pour les systèmes mobiles. La Fig. 25 présente les résultats dans le cas où un seul canal (SIA 1 ou SIA 2) est utilisé en cofréquence avec les systèmes mobiles. Dans le troisième exemple présenté en Fig. 26, les rapports cycliques des systèmes mobiles fonctionnant en

cofréquence avec le SIA sont répartis inégalement sur les canaux SIA 1 et SIA 2. La Fig. 27 correspond au cas où le satellite parvient à supporter une capacité de 1 415 navires dans son faisceau principal (80% des navires sont donc détectés) et où les systèmes mobiles en cofréquence partagent un seul canal SIA. Enfin, la Fig. 28 reprend le cas de la Fig. 27 avec 6 satellites et une durée d'observation de 12 h. Le Tableau 12 récapitule les paramètres utilisés dans les Fig. 24 à 28.

TABLEAU 12

Récapitulation des paramètres utilisés dans les Fig. 24 à 28

Figure	Nombre de satellites	Période d'observation	Nombre de navires dans l'empreinte	Rapport cyclique du système mobile sur le canal SIA 1	Rapport cyclique du système mobile sur le canal SIA 2
24	1	Passage unique	1 000	Variable ⁽¹⁾	Variable
25	1	Passage unique	1 000	Variable	Pas de système mobile
26	1	Passage unique	1 000	Variable	Tous à 10%
27	1	Passage unique	1 415 ⁽²⁾	Variable	Pas de système mobile
28	6	12 heures	2 381 ⁽²⁾	Variable	Pas de système mobile

⁽¹⁾ Variable: tous les systèmes mobiles fonctionnant en cofréquence avec le SIA et se trouvant dans l'empreinte du satellite ont un rapport cyclique tel qu'indiqué dans chaque Figure.

⁽²⁾ Le satellite fonctionne à sa capacité nominale (définie par la détection de 80% des navires) pour le scénario concerné.

FIGURE 26

Statistiques de la qualité de détection du satellite en présence de systèmes mobiles fonctionnant dans le même canal (rapport cyclique de 10% sur un des canaux)

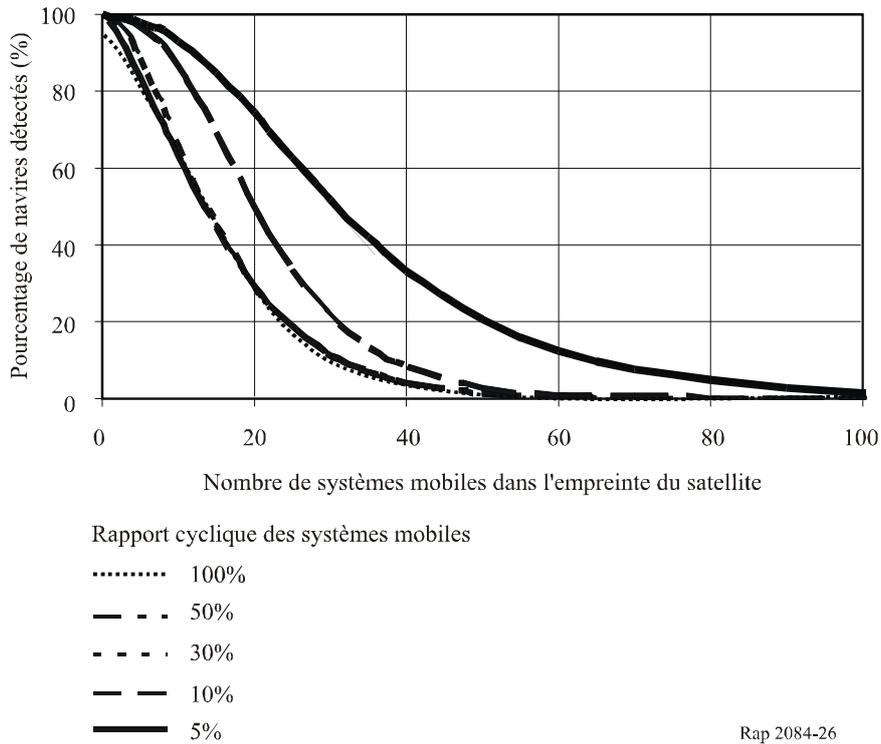


FIGURE 27

Statistiques de la qualité de détection du satellite en présence de systèmes mobiles fonctionnant dans le même canal (satellite fonctionnant à sa capacité nominale (80% de détection); fonctionnement en cofréquence sur un seul canal SIA)

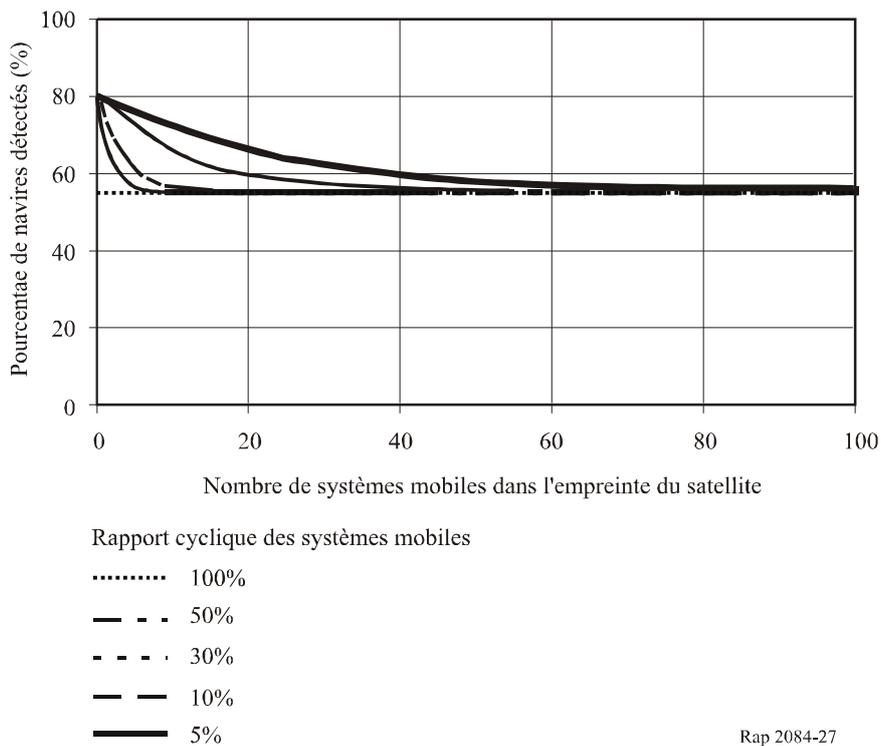
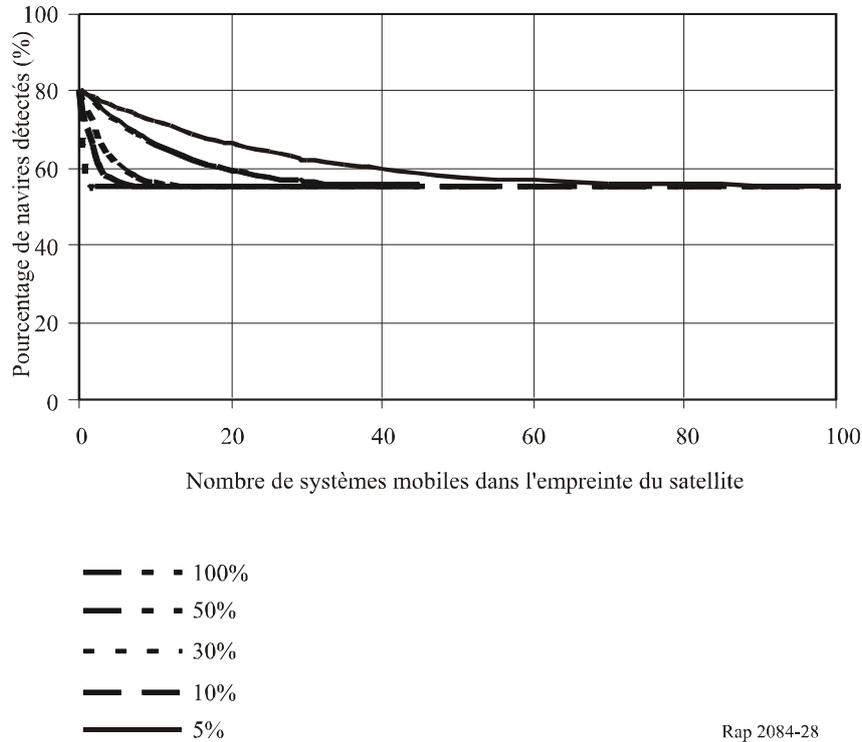


FIGURE 28

Statistiques de la qualité de détection du satellite en présence de systèmes mobiles fonctionnant dans le même canal (satellite fonctionnant à sa capacité nominale (80% de détection); fonctionnement en cofréquence sur un seul canal SIA; scénario à six satellites)



Rap 2084-28

Les Figures ci-dessus illustrent la qualité de détection SIA par satellite selon différentes hypothèses. La nature multidimensionnelle de ces courbes n'a pas permis de couvrir tous les cas de figure. De plus, dans certains pays, la situation de partage n'est pas identique pour les deux canaux SIA. Ainsi, les Fig. 27 et 28 dans lesquelles un canal SIA est partagé alors que l'autre est exploité de façon exclusive correspondent aux cas limites de ces situations. Comme le montrent les deux Figures, dans le cas à un satellite et dans le cas à six satellites, un petit nombre de systèmes mobiles fonctionnant en cofréquence dans l'empreinte du satellite avec un faible rapport cyclique a un effet minime sur la qualité de détection SIA du satellite. Lorsque le nombre de ces systèmes mobiles augmente, la détection SIA par satellite reste réalisable mais le pourcentage de navires détectés diminue.

9.2 Compatibilité avec les systèmes mobiles dans un canal adjacent

Dans toute étude de systèmes de communication mobiles, il convient d'examiner le partage avec les systèmes fonctionnant dans un canal adjacent. On sait en effet que pour fonctionner correctement tout satellite doit prendre en compte les systèmes en service utilisant un canal adjacent conformément aux spécifications existantes sur les émissions hors bande.

Il convient ici d'étudier deux scénarios:

Cas 1: compatibilité entre les émetteurs SIA et les récepteurs de systèmes mobiles dans un canal adjacent.

Cas 2: compatibilité entre les émetteurs de systèmes mobiles dans un canal adjacent et le récepteur du satellite.

Bien entendu, le premier cas qui ne fait pas intervenir la détection SIA par satellite n'est pas nouveau. Il a été étudié et a fait l'objet d'un rapport public détaillé de mesures et d'analyses aux Etats-Unis⁶. L'étude en question considérait le cas le plus défavorable d'un signal SIA (intervalle d'émission de 2 s) et de récepteurs du système mobile intégrant deux modes de fonctionnement: voix analogique en modulation de fréquence (MF) et données numériques. Selon les conclusions de l'étude en mode voix MF, lorsque les canaux sont séparés de 25 kHz et que les antennes sont proches (jusqu'à 3 m), la dégradation de la qualité de fonctionnement est minimale et n'empêche pas l'utilisation normale du système mobile. L'étude conclut par ailleurs qu'il serait nécessaire d'appliquer une correction d'erreur directe sur le récepteur du système mobile en mode données numériques pour garantir une compatibilité de fonctionnement. Ces résultats seraient applicables à toute paire de canaux adjacents sur toute fréquence de la bande 156-162,025 MHz attribuée au service mobile maritime.

Le second cas est spécifique à la détection SIA par satellite. De même que certains systèmes mobiles fonctionnent en cofréquence avec le SIA, ils peuvent aussi utiliser des canaux adjacents à ceux du SIA. Les trois canaux adjacents à SIA 1 et SIA 2 sont 161,950, 162,000 et 162,050 MHz. Dans l'étude des canaux adjacents, il faut introduire deux nouveaux paramètres, à savoir la répartition des systèmes mobiles sur les cinq canaux et le niveau de rejet des canaux adjacents que le récepteur du satellite peut atteindre. L'étude doit surtout s'attacher à déterminer comment les systèmes mobiles utilisant les canaux adjacents agissent spécifiquement sur la détection SIA du satellite.

Rejet des canaux adjacents: conformément aux spécifications du CEI en vigueur, les récepteurs SIA conventionnels embarqués à bord de navires doivent présenter un rejet des canaux adjacents d'au moins 70 dB. Mais le récepteur SIA d'un satellite ne pourra peut-être pas atteindre ce niveau de rejet car il doit être optimisé pour garantir une sensibilité maximale. Par conséquent, la présente étude retient les valeurs de rejet des canaux adjacents suivantes: 30 dB, 40 dB et 50 dB.

Répartition des systèmes mobiles: chaque pays étant susceptible d'utiliser de diverses façons les cinq canaux considérés ici, le nombre de systèmes mobiles exploitant chacun des canaux peut varier considérablement d'une région géographique à l'autre. Or les différentes façons d'utiliser les trois canaux adjacents dans les systèmes mobiles n'entrent pas dans le champ de la présente étude. On a donc choisi, sur les trois canaux adjacents aux systèmes SIA situés dans l'empreinte de l'antenne du satellite, un nombre identique de systèmes mobiles.

Répartition géographique des navires équipés du SIA: au vu du caractère multidimensionnel du problème traité, on s'est limité, dans tous les cas étudiés ci-dessous, à une seule densité de navires, à savoir 1 000 navires SIA de classe A répartis uniformément dans l'empreinte du satellite.

Résultats: la méthode par simulation décrite précédemment a permis d'étudier comment les systèmes mobiles fonctionnant dans un canal adjacent agissent sur la qualité de détection SIA par satellite. A cet effet, on a réduit la puissance d'émission des systèmes mobiles fonctionnant dans un canal adjacent de la valeur en dB du rejet de canal adjacent dans le récepteur du satellite. Le Tableau 13 présente les résultats sous la forme du pourcentage de navires détectés en fonction de différents paramètres, pour un nombre maximal d'émetteurs mobiles sur chaque canal adjacent de 240 et un rapport cyclique maximal en transmission de 30%.

⁶ Roberts, Melvin S., *et coll. EMC Analysis of Universal Automatic Identification and Public Correspondence Systems in the VHF Maritime Band*, Joint Spectrum Center, Annapolis Maryland, Etats-Unis, février 2004.

TABLEAU 13
Résultats de l'étude des canaux adjacents*

Nombre de navires	Nombre de systèmes mobiles sur SIA 1 et SIA 2	Nombre de systèmes mobiles dans chaque canal adjacent ⁽¹⁾	Rapport cyclique des systèmes mobiles	Rejet des canaux adjacents	Pourcentage de navires détectés
1 000	0	0	–	–	100%
1 000	0	40	5%	30 dB	100%
1 000	0	80	5%	30 dB	97%
1 000	0	160	5%	30 dB	70%
1 000	0	240	5%	30 dB	15%
1 000	0	20	10%	30 dB	100%
1 000	0	40	10%	30 dB	90%
1 000	0	80	10%	30 dB	60%
1 000	0	160	10%	30 dB	0%
1 000	0	A déterminer	30%	30 dB	A déterminer
1 000	0	A déterminer	30%	30 dB	A déterminer
1 000	0	240	5%	40 dB	100%
1 000	0	240	10%	40 dB	100%
1 000	0	160	30%	40 dB	100%
1 000	0	240	30%	40 dB	80%
1 000	0	240	30%	50 dB	100%

* Dans tous les cas étudiés, la répartition géographique des navires équipés du SIA et des systèmes mobiles situés dans l'empreinte de l'antenne du satellite est uniforme.

⁽¹⁾ Nombre de systèmes mobiles dans chacun des trois canaux adjacents à SIA 1 et à SIA 2.

Comme on pouvait s'y attendre, les résultats de l'étude montrent que la qualité de détection SIA par satellite en présence de systèmes mobiles fonctionnant en même temps dans les canaux adjacents dépend fortement du rejet de canal adjacent au niveau du récepteur du satellite et du rapport cyclique en émission des systèmes mobiles. Comme le montrent les résultats, si le rejet de canal adjacent au niveau du satellite n'est que de 30 dB, un nombre modéré de systèmes mobiles fonctionnant dans les canaux adjacents suffit à dégrader la qualité de détection SIA du satellite. Lorsque le rejet est de 40 dB, la détection SIA du satellite est nettement plus robuste. Enfin, avec un rejet de 50 dB, dans les conditions de variation des paramètres de l'étude, on n'a pas observé de diminution de la qualité de détection.

10 Résumé

Le présent Rapport a introduit le concept de détection par satellite de messages SIA émis par le système SIA terrestre actuel. Il a démontré, sous certaines hypothèses, la faisabilité technique du concept et la capacité des récepteurs SIA sur satellite à fonctionner dans un environnement composé d'un grand nombre de navires équipés du SIA. Les cinq scénarios étudiés sont définis par le nombre de satellites équipés du SIA (1 satellite et 6 satellites) et la période de temps dont on dispose pour actualiser les emplacements des navires (d'un seul passage du satellite à une période d'observation

de 12 heures). On a évalué, dans chaque scénario, la capacité du satellite définie comme la possibilité de détecter 80% des navires: elle est comprise entre 1 415 et 2 380. Les analyses menées en considérant une répartition mondiale représentative des navires équipés du SIA ont montré que les densités de navires dans de nombreuses régions du monde dépassent vraisemblablement ces limites de capacité SIA.

Quatre techniques susceptibles d'améliorer la capacité des satellites, étudiées individuellement, ont montré des améliorations de capacité jusqu'à 175%.

Par ailleurs, on a étudié le fonctionnement en cofréquence entre les deux canaux alloués au SIA et d'autres systèmes de communication mobiles. Etant donné la grande surface de l'empreinte de l'antenne du satellite, des systèmes mobiles situés à plusieurs milliers de kilomètres des voies de navigation peuvent influencer la qualité de détection SIA des satellites. Les résultats ont montré que la détection SIA par satellite peut coexister avec un nombre limité de systèmes mobiles à faible rapport cyclique fonctionnant dans le même canal. En outre, la détection SIA par satellite est beaucoup plus robuste lorsqu'un seul des canaux SIA est partagé en cofréquence avec des systèmes mobiles.
