

RAPPORT UIT-R RS.2094

Etudes relatives à la compatibilité entre le service d'exploration de la Terre par satellite (actif) et le service de radiorepérage dans les bandes 9 300-9 500 MHz et 9 800-10 000 MHz, et entre le service d'exploration de la Terre par satellite (actif) et le service fixe dans la bande 9 800-10 000 MHz

(2007)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	3
2 SETS (actif)	3
2.1 Applications	3
2.2 Paramètres	3
3 Services de radiorepérage	5
3.1 Applications	5
3.2 Paramètres	5
4 Service fixe	11
4.1 Applications	11
4.2 Paramètres	12
5 Analyse des brouillages	13
5.1 Analyse – Etude N° 1: Evaluation des risques de brouillage des capteurs spatioportés actifs exploitant la bande 9 300-9 500 MHz et la bande 9 800-10 000 MHz causés par le service de radiorepérage	13
5.1.1 Démarche de l'analyse	13
5.1.2 Résultats de l'analyse	17
5.1.3 Techniques de limitation des brouillages au niveau des SAR	21
5.1.4 Conclusion de l'analyse	22
5.2 Analyse – Etude N° 2: Evaluation de la probabilité de brouillage du SETS (actif) dans la bande 9 300-9 500 MHz causés par des radars météorologiques au sol	22
5.2.1 Paramètres simulés du SETS (actif)	22
5.2.2 Paramètres simulés des radars météorologiques	23
5.2.3 Résultats	23
5.2.4 Conclusion	24

5.3	Analyse – Etude N° 3: Evaluation des niveaux de brouillage maximums causés par le SETS (actif) dans le service de radiolocalisation dans les bandes 9 300-9 500 MHz et 9 800-10 000 MHz	24
5.3.1	Démarche de l'analyse.....	24
5.3.2	Résultats de l'analyse	25
5.3.3	Discussion sur la limitation des brouillages.....	26
5.3.4	Conclusion de l'analyse.....	27
5.4	Analyse – Etude N° 4: Analyse des risques de brouillage causés par le SETS (actif) sur des radars météorologiques au sol utilisés dans le service de radiolocalisation dans la bande 9 300-9 500 MHz	27
5.4.1	Analyse préliminaire	28
5.4.2	Autres facteurs de limitation des brouillages dans les radars météorologiques	32
5.4.3	Conclusion – Réévaluation des données de l'analyse préliminaire.....	36
5.5	Analyse – Etude N° 5: Etudes de compatibilité entre le SETS (actif) et le service fixe dans la bande 9 800-10 000 MHz	39
5.5.1	Démarche de l'analyse.....	39
5.5.2	Résultats de l'analyse	43
5.5.3	Conclusion de l'analyse.....	50
6	Exemples de techniques de limitation des brouillages des SAR spatioportés.....	50
6.1	Exemple 1: Choix des caractéristiques d'émission des capteurs spatioportés actifs du SETS (actif) visant à limiter les brouillages pour une utilisation dans la largeur de bande de 500 MHz au voisinage de 9,6 GHz	50
6.1.1	Choix des caractéristiques du SETS (actif) visant à limiter les brouillages.....	50
6.1.2	Conclusion de l'analyse.....	53
6.2	Exemple 2: Technique de limitation des brouillages applicables à une antenne SAR3 à capteur actif spatioporté du SETS (actif) en vue d'une utilisation dans la largeur de bande de 500 MHz au voisinage de 9,6 MHz.....	53
6.2.1	Caractéristiques techniques des antennes SAR3 à capteur actif spatioporté large bande	53
6.2.2	Caractéristiques techniques des systèmes radars terrestres.....	55
6.2.3	Profils de puissance reçue au niveau des stations terrestres	55
6.2.4	Conclusion de l'analyse.....	57

Page

7	Résumé et conclusion	57
8	Documents de référence	57

1 Introduction

L'objectif de ce Rapport est de synthétiser les conclusions des études relatives à la compatibilité entre le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (actif) et le service de radiorepérage dans les bandes 9 300-9 500 MHz et 9 800-10 000 MHz, et entre le SETS (actif) et le service fixe dans la bande 9 800-10 000 MHz.

2 SETS (actif)

2.1 Applications

Il est prévu de mettre en exploitation en 2007 cinq radars à synthèse d'ouverture (ci-après SAR pour *synthetic aperture radar*) dans la bande au voisinage de 9,6 GHz: d'une part, les SAR à bord d'une constellation de quatre satellites non encore lancés, commandés par l'ASI (Agence spatiale italienne), et d'autre part, un SAR nommé «SAR3» actuellement en cours d'études à la NASA (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace américaine).

Du fait des capacités d'alimentation limitées à bord, les SAR exploitant des fréquences au voisinage de 9,6 GHz seront normalement activés et désactivés depuis la Terre de façon à ne balayer que certaines zones. Dans ce mode opératoire, le SAR ne transmet que pendant 10 à 20% du temps. En mode spotlight, le satellite fonctionnera avec un angle d'ouverture compris entre 20° et 44° et les données seront collectées en balayant généralement de 49 à 65 fauchées de 20 km en distance par 0,35 km en azimut. Les données formeront ainsi une mosaïque de fauchées en azimut permettant de traiter une image de 20 km par 20 km.

2.2 Paramètres

Le Tableau 1 fournit les caractéristiques techniques des capteurs actifs spatioportés dans la bande 9 300-10 000 MHz; les diagrammes de gain d'antenne de SAR1, SAR2 et SAR3 figurent respectivement aux Tableaux 2, 3 et 4.

TABLEAU 1

Caractéristiques techniques des SAR examinés dans la présente étude

Paramètre	SAR1	SAR2	SAR3
Altitude orbitale (km)	400	619	506
Inclinaison orbitale (degrés)	57	98	98
Fréquence centrale RF (GHz)	9,6	9,6	9,6
Valeur de crête de la puissance rayonnée (W)	1 500	5 000	25 000
Modulation d'impulsion	Modulation linéaire en fréquence (chirp)	Modulation linéaire en fréquence (chirp)	Modulation linéaire en fréquence (chirp)
Largeur de bande du chirp (MHz)	10	400	450
Durée d'impulsion (µs)	33,8	10-80	1-10
Fréquence de répétition des impulsions (ips)	1 736	2 000-4 500	410-515
Rapport cyclique (%)	5,9	2,0-28,0	0,04-0,5
Taux de compression en distance	338	< 12 000	450-4 500

TABLEAU 1 (*fin*)

Paramètre	SAR1	SAR2	SAR3
Type d'antenne	Guide d'ondes à fentes	Réseau d'éléments plan	Antenne réseau à commande de phase
Valeur de crête du gain d'antenne (dBi)	44,0	44,0-46,0	39,5-42,5
p.i.r.e. (dBW)	75,8	83,0	83,5-88,5
Orientation de l'antenne	De 20° à 55° par rapport au nadir	34° par rapport au nadir	De 20° à 44° par rapport au nadir
Ouverture du faisceau d'antenne	5,5° (El) 0,14° (Az)	1,6-2,3° (El) 0,3° (Az)	1,1-2,3° (El) 1,15° (Az)
Polarisation de l'antenne	Linéaire verticale	Linéaire HH ou VV	Linéaire horizontale/verticale
Température de bruit du système (K)	551	500	600

TABLEAU 2

Diagramme de gain d'antenne du SAR1 au voisinage de 9,6 GHz

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire (degrés)
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 44,0 - 0,397(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 24,5$ $G_v(\theta_v) = 9,5$ $G_v(\theta_v) = 22,5$	$\theta_v < 7,1$ $7,1 \leq \theta_v \leq 30$ $30 < \theta_v \leq 60$ $\theta_v > 60$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0 - 612,2(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -12$ $G_h(\theta_h) = 0 - 27,0(\theta_h)$ $G_h(\theta_h) = -35$	$\theta_h \leq 0,14$ $0,14 < \theta_h \leq 0,44$ $0,44 < \theta_h \leq 1,3$ $\theta_h > 1,3$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\} \max$	

TABLEAU 3

Diagramme de gain d'antenne du SAR2 au voisinage de 9,6 GHz

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire (degrés)
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 46,0 - 0,835(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 31,0$ $G_v(\theta_v) = 26,0$ $G_v(\theta_v) = 10,0$	$\theta_v < 3,8$ $3,8 \leq \theta_v \leq 15$ $15 < \theta_v \leq 30$ $\theta_v > 30$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0 - 444,5(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -16$ $G_h(\theta_h) = -20,0(\theta_h)$	$\theta_h \leq 0,3$ $0,3 < \theta_h \leq 0,7$ $\theta_h > 0,7$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\} \max$	

TABLEAU 4

Diagramme de gain d'antenne du SAR3 au voisinage de 9,6 GHz

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire (degrés)
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 42,5 - 9,92(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 31,4 - 0,83 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = 10,5 - 0,133 \theta_v$	$0 < \theta_v < 1,1$ $1,1 \leq \theta_v < 30$ $\theta_v \geq 30$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 9,07(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = +1,9 - 12,08 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -48$	$0 < \theta_h < 1,15$ $1,15 \leq \theta_h < 4,13$ $\theta_h \geq 4,13$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h)$	

3 Services de radiorepérage

3.1 Applications

De nombreux types de radars différents utilisent la bande 8 500-10 500 MHz sur des plateformes terrestres, transportables, embarquées sur des navires ou spatioportées. Les fonctions de radiorepérage dans cette gamme de fréquences incluent notamment la veille aérienne et la veille de surface, la cartographie du sol, le suivi de terrain, la navigation (aéronautique et maritime) et la météorologie (aéroportée et terrestre).

3.2 Paramètres

Les caractéristiques des radars de radiorepérage sont fournies en référence [1]. Elles proviennent de dix systèmes radars aéroportés, neuf systèmes radars installés à bord de navires et huit systèmes de radiobalises/radars terrestres exploitant la bande 8 500-10 500 MHz. En outre, un ensemble de systèmes radars représentatifs fonctionnant dans la bande 9 300-10 000 MHz a été sélectionné pour les études présentées ci-après. Les caractéristiques des radars sont indiquées dans les Tableaux 5, 6, et 7.

TABLEAU 5

Caractéristiques des radars de radiorepérage aéroportés dans la bande 8 500-10 500 MHz

Caractéristiques	Système A1	Système A2	Système A3
Fonction	Radar de veille et de poursuite (multifonction)	Radar de veille aéroporté	Radar de cartographie du sol et de suivi de terrain (multifonction)
Gamme de syntonisation (MHz)	9 300-10 000	8 500-9 600	9 240, 9 360 et 9 480
Modulation	Impulsion	Impulsion	Modulation par position d'impulsion agile en fréquence non cohérente
Puissance de crête à l'entrée de l'antenne (kW)	17	143 (min) 220 (max)	95

TABLEAU 5 (suite)

Caractéristiques	Système A1	Système A2	Système A3
Largeurs d'impulsion (μ s) et fréquence de répétition des impulsions	0,285; 8 de 200 à 23 000 ips	2,5; 0,5 400 et 1 600 ips	0,3, 2,35 et 4 2 000, 425 et 250 ips, resp.
Rapport cyclique maximal (%)	0,0132	0,001	0,001
Temps de montée/descente de l'impulsion (μ s)	0,01/0,01	0,02/0,2	0,1/0,1
Dispositif de sortie	Tube à ondes progressives	Magnétron syntonisable	Magnétron syntonisable à cavités
Type de configuration de l'antenne	Pinceau	Eventail	Pinceau
Type d'antenne	Réseau d'éléments plan	Réflecteur parabolique	Antenne plaquée à réseau d'éléments plan
Polarisation de l'antenne	Linéaire	Linéaire	Circulaire
Gain d'antenne dans le faisceau principal (dBi)	32,5	34	28,3
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation (degrés)	4,6	3,8	5,75
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan azimutal (degrés)	3,3	2,5	5,75
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	118 balayages/min	6 ou 12 tours/min	Jusqu'à 53 balayages/min
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	Sectoriel: $\pm 60^\circ$ (mécanique)	360° (mécanique)	Sectoriel: $\pm 60^\circ$ (mécanique)
Fréquence de balayage vertical de l'antenne	59 balayages/min	Sans objet	Jusqu'à 137 balayages/min
Type de balayage vertical de l'antenne	Sectoriel: $\pm 60^\circ$ (mécanique)	Sans objet	Sectoriel: $+25/-40^\circ$ (mécanique)
Niveau dans les lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	7,5 dBi à 15°	Non spécifié	5,3 dBi à 10°
Hauteur d'antenne	Altitude de l'aéronef porteur	Altitude de l'aéronef porteur	Altitude de l'aéronef porteur
Largeur de bande du récepteur, fréquence intermédiaire (FI) à 3 dB (MHz)	3,1; 0,11	5	5,0 1,8 et 0,8
Facteur de bruit du récepteur (dB)	Non spécifié	Non spécifié	6
Signal minimum détectable (dBm)	-103	-107; -101	-101
Largeur totale du chirp (MHz)	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Largeur de bande en émission RF (MHz)			(fonction de la fréquence et de la largeur d'impulsion)
- 3 dB	3,1; 0,11	0,480; 2,7	De 100 à 118
- 20 dB	22,2; 0,79	1,5; 6,6	De 102 à 120

TABLEAU 5 (suite)

Caractéristiques	Système A7d	Système A8	Système A10
Fonction	Navigation	Veille (radiolocalisation) météo	Evitement des perturbations atmosphériques, cartographie, veille
Gamme de syntonisation (MHz)	Agilité en fréquence d'impulsion à impulsion sur 340 MHz	9 250-9 440, agilité en fréquence d'impulsion à impulsion, par pas de 20 MHz	Impulsion de préchauffage: 9 337 et 9 339 (avant chaque impulsion utile) Impulsion utile: 9 344
Modulation	Impulsion MF linéaire	Impulsion MF	Impulsion
Puissance de crête à l'entrée de l'antenne	50 kW	10 kW	26 W (14 dBW)
Largeur d'impulsion (μ s) et fréquence de répétition des impulsions	10 approx. 380 ips	5 et 17 2 500, 1 500, 750, et 400 ips (toutes largeurs d'impulsion)	9 337 et 9 339 MHz: 1-29 μ s à 2 200-220 ips (avec décalage temporaire aléatoire: <i>dithering</i>) pour toutes les largeurs d'impulsion; 9 344 MHz: 1,7-2,4; 2,4-4,8; 4,8-9,6; 17; 19 et 29 μ s à 2 200-220 ips (avec décalage temporaire aléatoire: <i>dithering</i>)
Rapport cyclique maximal	0,004	0,04	9 337 et 9 339 MHz: $\leq 0,064$ 9 344 MHz: $\leq 0,011$ (avec des impulsions de 17 μ s)
Temps de montée/descente de l'impulsion (μ s)	0,1/0,1	0,1/0,1	9 337 et 9 339 MHz: 0,3/0,2 9 344 MHz: 0,5/0,5
Dispositif de sortie	Tube à ondes progressives	Tube à ondes progressives	Diode IMPATT
Type de diagramme de rayonnement d'antenne	Pinceau/éventail	Eventail	Pinceau
Type d'antenne	Réflecteur parabolique	Réseau à fentes	Réseau plan
Polarisation de l'antenne	Horizontale	Verticale et horizontale	Horizontale
Gain d'antenne dans le faisceau principal (dBi)	34,5	32	29
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation (degrés)	4,0	9,0	< 10
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan azimutal (degrés)	2,4	1,8	7
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	36, 360, 1800°/s	15 ou 60 tpm	30°/s
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	Secteur de 10°	360°	Secteur de 60° ou 120°
Fréquence de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Type de balayage vertical de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	Inclinaison paramétrable 0°/-90°	Inclinaison paramétrable +15°/-15°	Inclinaison choisie par l'opérateur: $\pm 30^\circ$
Niveau dans les lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	14,5 dBi à 12°	20 dBi	+13,9 dBi
Hauteur d'antenne	Altitude de l'aéronef porteur	Altitude de l'aéronef porteur	Altitude de l'aéronef porteur

TABLEAU 5 (fin)

Caractéristiques	Système A7d	Système A8	Système A10
Largeur de bande du récepteur, fréquence intermédiaire (FI) à 3 dB (MHz)	Non spécifié	16	2,0
Facteur de bruit du récepteur (dB)	5	Non spécifié	2
Signal minimum détectable (dBm)	Dépend du gain de traitement (17 dB pour une impulsion de retour)	-98	-128 (sensibilité de détection après traitement)
Largeur totale du chirp (MHz)	5	10	Sans objet
Largeur de bande en émission RF (MHz)			
- 3 dB	4,5	9,3	-3 dB: 9 337 et 9 339 MHz: 0,7 9 344 MHz: 0,4; 0,25; 0,150; 075; 0,08; et 0,05
- 20 dB	7,3	12	-20 dB: 9 337 et 9 339 MHz: 3,6 9 344 MHz: 1,8; 1,5; 0,8; 0,375; 0,35; et 0,2

TABLEAU 6

**Caractéristiques des radars de radiorepérage installés sur des navires dans la bande
8 500-10 500 MHz**

Caractéristiques	Système S1	Système S3	Système S4	
Fonction	Radars de veille et de navigation	Radars de veille à basse altitude et en surface (multifonctions)	Radars de radionavigation maritime	
Type de plateforme	Embarqué sur navire, sites de formation à terre	Embarqué sur navire	Embarqué sur navire	
Gamme de syntonisation (MHz)	8 500-9 600	8 500-10 000	9 375 ± 30 et 9 445 ± 30	
Modulation	Impulsion	Impulsion agile en fréquence	Impulsion	
Puissance de crête à l'entrée de l'antenne (kW)	35	10	5 (min)	50 (max)
Largeurs d'impulsion (µs) et fréquence de répétition des impulsions	0,1; 0,5 1 500; 750 ips	De 0,56 à 1,0; 0,24 de 19 000 à 35 000 ips; de 4 000 à 35 000 ips	0,03 (min) à 4 000 ips (max)	1,2 (max) à 375 ips (min)
Rapport cyclique maximal	0,00038	0,020	0,00045	
Temps de montée/descente de l'impulsion (µs)	0,08/0,08	0,028/0,03; 0,038/0,024	Non spécifié	
Dispositif de sortie	Magnétron	Tube à ondes progressives	Magnétron	
Type de diagramme de rayonnement de l'antenne	Eventail	Pinceau	Eventail	
Type d'antenne	Réseau à cornet	Réseau à fentes	Réseau à fentes	
Polarisation de l'antenne	Linéaire	Linéaire	Non spécifié	
Gain d'antenne dans le faisceau principal (dBi)	29	39	27 (min)	32 (max)
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation (degrés)	13	1	20,0 (min)	26,0 (max)
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan azimutal (degrés)	3	1,5	0,75 (min)	2,3 (max)

TABLEAU 6 (suite)

Caractéristiques	Système S1	Système S3	Système S4	
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	9,5 tpm	180°/s	20 (min)	60 (max)
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	360° (mécanique)	360° ou veille/poursuite sectorielle (mécanique)	360°	
Fréquence de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Sans objet	Sans objet	
Type de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Sans objet	Sans objet	
Niveau des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	Non spécifié	23 dBi (premier lobe latéral)	-4 dBi si $\leq 10^\circ$ (min) -13 dBi si $\geq 10^\circ$ (max)	9 dBi si $\leq 10^\circ$ (max) 2 dBi si $\geq 10^\circ$ (min)
Hauteur d'antenne	Montage sur mât/pont	Montage sur mât/pont	Montage sur mât/pont	
FI du récepteur (MHz)	Non spécifié	Non spécifié	45 (min)	60 (max)
Largeur de bande du récepteur, fréquence intermédiaire (FI) à 3 dB (MHz)	12	2,5; 4; 12	6; 2,5 (min) (impulsion courte et longue, resp.)	28; 6 (max) (impulsion courte et longue, resp.)
Facteur de bruit du récepteur (dB)	Non spécifié	9	3,5 (min)	8,5 (max)
Signal minimum détectable (dBm)	-96	-102; -100; -95	-106 (min)	-91 (max)
Largeur de bande du chirp (MHz)	Sans objet	Sans objet	Sans objet	
Largeur de bande en émission RF (MHz)				
- 3 dB	10; 5	1,6; 4,2	Non spécifié	
- 20 dB	80; 16	10; 24	Non spécifié	
Fonction	Radar de radionavigation maritime	Navigation et veille	Radar de radionavigation maritime	
Type de plateforme	Embarqué sur navire	Embarqué sur navire	Embarqué sur navire	
Gamme de syntonisation (MHz)	9 380-9 440	9 300-9 500	9 410 \pm 30	9 445 \pm 30
Modulation	Impulsion	Impulsion	Impulsion	
Puissance de crête à l'entrée de l'antenne (kW)	25	1,5	1,5-10	
Largeurs d'impulsion (μ s) et fréquence de répétition des impulsions	0,08; 0,2; 0,4; 0,7 et 1,2 2 200 ips (0,08 μ s); 1 800, 1 000 et 600 ips (1,2 μ s)	0,08; 0,25 et 0,5 2 250, 1 500 et 750 pps	0,08 (min) à 3 600 ips	1,2 (max) à 375 ips
Rapport cyclique maximal	0,00072	0,000375	0,00045	
Temps de montée/descente de l'impulsion (μ s)	0,010/0,010	0,01/0,05	Non spécifié	
Dispositif de sortie	Magnétron	Magnétron	Magnétron	
Type de diagramme de rayonnement de l'antenne	Eventail	Eventail	Eventail	
Type d'antenne	Réseau à fentes alimenté en extrémité	Guide d'ondes à fentes à alimentation centrale	Réseau à fentes/patches ou cornet	
Polarisation de l'antenne	Horizontale	Horizontale	Horizontale	
Gain du faisceau principal de l'antenne (dBi)	31	23,9	22-30	

TABLEAU 6 (fin)

Caractéristiques	Système S6	Système S7	Système S9
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation (degrés)	20	25	24-28
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan azimutal (degrés)	0,95	6	1,9-7
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	24 tpm	24 tpm	24 tpm
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	360°	360°	360°
Fréquence de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Type de balayage vertical	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Niveau des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	Non spécifié	+2,9 dBi	22 dBi faisceau principal: De 3 à 4 dBi jusqu'à 10°; de 0 à 3 dBi au-delà de 10° 30 dBi faisceau principal: De 7 à 10 dBi jusqu'à 10°; de -2 à +7 dBi au-delà de 10°
Hauteur d'antenne	Mât	Mât	Mât
FI du récepteur (MHz)	Non spécifié	Non spécifié	45-60
Largeur de bande du récepteur, fréquence intermédiaire (FI) à 3 dB (MHz)	15	10 et 3	2,5-25
Facteur de bruit du récepteur (dB)	6	6	De 4 à 8
Signal minimum détectable (dBm)	-97 (plancher de bruit)	-102 (plancher de bruit)	Non spécifié
Largeur totale du chirp (MHz)	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Largeur de bande d'émission RF (MHz)			Non spécifié
- 3 dB	14	20	
- 20 dB	43	55	

TABLEAU 7

Caractéristiques des radiobalises et des radars de radiorepérage installés au sol fonctionnant dans la bande 8 500-10 500 MHz

Caractéristiques	Système G2	Système G3	Système G9
Fonction	Transpondeur de radiobalise de rendez-vous	Radar de poursuite	Météorologique (radiolocalisation)
Type de plateforme	Terrestre (à dos d'homme)	Terrestre (remorqué)	Terrestre
Gamme de syntonisation (MHz)	9 375 et 9 535 (Rx); 9 310 (Tx)	9 370-9 990	9 300-9 375 MHz
Modulation	Impulsion	Impulsion agile en fréquence	Impulsion
Puissance de crête à l'entrée de l'antenne	De 20 à 40 W	31 kW	50 kW
Largeurs d'impulsion (μs) et fréquence de répétition des impulsions	De 0,3 à 0,4 Moins de 20 000 ips	1 de 7 690 à 14 700 ips	0,1; 0,25 et 1,0 de 1 000 à 2 000 ips
Rapport cyclique maximal	0,008	0,015	0,002
Temps de montée/descente de l'impulsion (μs)	0,10/0,15	0,05/0,05	0,05

TABLEAU 7 (fin)

Caractéristiques	Système G2	Système G3	Système G9
Dispositif de sortie	Transistorisé	Tube à ondes progressives	Klystron ou magnétron
Type de diagramme de rayonnement de l'antenne	Quadrant	Pinceau	Faisceau pinceau
Type d'antenne	Réseau à circuits imprimés	Réseau à commande de phase (guide d'onde à fentes linéaire)	Réflecteur parabolique avec alimentation Cassegrain
Polarisation de l'antenne	Circulaire	Linéaire	Linéaire (double polarisation)
Gain d'antenne dans le faisceau principal (dBi)	13	42,2	46
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation (degrés)	20; 3	0,81	0,9
Ouverture du faisceau d'antenne dans le plan azimutal (degrés)	65; 10	1,74	0,9
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	Sans objet	Non spécifié	De 0 à 20°/s
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	Sans objet	Sectoriel: $\pm 45^\circ$ (balayage en phase)	Volumique, volumique sectoriel, stationnaire et poursuite
Fréquence de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Non spécifié	De 0° à 20°
Type de balayage vertical de l'antenne	Sans objet	Sectoriel: $90^\circ \pm$ inclinaison du réseau (balayage en fréquence)	Passage au degré d'élévation suivant après rotation horizontale ou changement d'élévation à azimut constant
Niveau des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	0 dBi (premier lobe latéral)	Non spécifié	26 dBi
Hauteur d'antenne	Niveau du sol	Niveau du sol	4 m
Largeur de bande du récepteur, fréquence intermédiaire (FI) à 3 dB (MHz)	40	1	10, 4 ou 1
Facteur de bruit du récepteur (dB)	13	Non spécifié	-110
Signal minimum détectable (dBm)	-65	-107	Non spécifié
Largeur de bande du chirp (MHz)	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Largeur de bande d'émission RF (MHz)	4,7	0,85	Non spécifié
- 3 dB	11,2	5,50	de 6 à 60 MHz – en fonction de la largeur d'impulsion
- 20 dB			

4 Service fixe

4.1 Applications

La Recommandation UIT-R F.758-3 fournit un ensemble de paramètres pour les systèmes du service fixe (ci-après SF) déployés dans la partie du spectre généralement allouée au SF, mais ne décrit pas les systèmes du SF pour la bande 9 800-10 000 MHz. On considère ici que les systèmes du SF fonctionnent vraisemblablement comme des relais micro-ondes point à point dans cette bande.

4.2 Paramètres

La Recommandation UIT-R F.758-3 fournit un ensemble de paramètres pour les systèmes du SF déployés dans la partie du spectre généralement allouée au SF, mais ne décrit pas les paramètres SF applicables à la bande 9 800-10 000 MHz. Dans les études qui ont conduit au présent Rapport, on a pris l'hypothèse que la liste des paramètres pour les systèmes du service fixe point à point (P-P SF) dans la bande 10,6-10,68 GHz s'applique aussi dans la bande 9 800-10 000 MHz. On sait que ces systèmes sont principalement déployés dans les zones urbaines et suburbaines, mais aucune information précise n'était disponible sur le nombre de tels systèmes ou sur un plan de disposition des canaux qui aurait pu servir de base pour les analyses de partage. En l'absence d'information plus précise, on a donc considéré que chaque canal était utilisé une seule fois. Il importe toutefois de noter qu'en cas de mise en place réelle de systèmes du service fixe dans cette bande de fréquences dans les grandes zones urbaines, les canaux peuvent être réutilisés plusieurs fois.

Les paramètres du service fixe point à point figurent au Tableau 8.

TABLEAU 8

Paramètres du système de service fixe point à point

Paramètre	Valeur
Modulation	MDF, MDP-4
Capacité	16 Mbit/s
Espacement des canaux (MHz)	14
Gain de l'antenne (maximum) (dBi)	49
Diagramme d'antenne	Recommandation UIT-R F.1245-1
Pertes dans ligne d'alimentation / multiplexeur (minimum) (dB)	0
Type d'antenne	Parabole
Puissance maximale de sortie à l'émission (dBW)	-2
p.i.r.e. (maximum) (dBW)	47
Largeur de bande FI du récepteur (MHz)	14
Facteur de bruit du récepteur (dB)	3
Bruit thermique du récepteur (dBW)	-129,5
Niveau d'entrée nominal du récepteur (dBW)	-60
Niveau d'entrée du récepteur pour un TEB de 1×10^{-3} (dBW)	-114

5 Analyse des brouillages

5.1 Analyse – Etude N° 1: Evaluation des risques de brouillage des capteurs spatioportés actifs exploitant la bande 9 300-9 500 MHz et la bande 9 800-10 000 MHz causés par le service de radiorepérage

5.1.1 Démarche de l'analyse

Il a été développé un modèle de simulation informatique qui calcule, en fonction du temps, le niveau de puissance des brouillages causés par les systèmes de radiorepérage dans le récepteur d'un capteur SAR actif spatioporté. Ce modèle de simulation a permis de collecter des statistiques de brouillage: d'une part, la probabilité qu'un niveau de puissance de brouillage soit dépassé, d'autre part, le niveau de puissance de brouillage maximal atteint au niveau du récepteur du SAR.

La Recommandation UIT-R RS.1166 définit les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage applicables aux capteurs actifs spatioportés. Le critère de dégradation inacceptable de la qualité de fonctionnement des SAR interférométriques imageurs ou topographiques exploitant la bande 9 500-9 800 MHz correspond à un niveau de puissance de crête de -104 dB(W/20 MHz), ou $-89,9$ dB(W/512 MHz) pour le SAR3. Ce critère s'applique aux sources brouilleuses pulsées non modulées en fréquence dont la durée d'impulsion est inférieure ou égale à $2 \mu\text{s}$. Concernant des durées d'impulsion supérieures à $2 \mu\text{s}$, les calculs fournissent un seuil de brouillage de -102 dB(W/20 MHz); nous utilisons cependant pour la présente analyse un critère de brouillage de -104 dB(W/20 MHz) correspondant au cas le plus défavorable.

La Recommandation UIT-R RS.1166 fournit aussi le critère de disponibilité: «Dans les bandes de fréquences utilisées en partage, la disponibilité des données SAR doit dépasser 99% pour tous les emplacements géographiques qui ont été retenus comme sites ou pour une couverture mondiale dans le cas de la cartographie topographique».

Deux jeux de simulations ont été effectués. Dans le premier, on a considéré un fonctionnement en fréquence copolaire dans le même canal avec une fréquence centrale SAR de 9 600 MHz et une largeur de bande FI du récepteur de 512 MHz. Le second jeu de simulations mettait en œuvre le rejet en fonction de la fréquence (FDR, *Frequency Dependent Rejection*). Pour les simulations, les niveaux de brouillage ont été calculés pour une source de brouillages unique et pour des sources multiples venant de 1 000 radars distribués aléatoirement.

Pour déterminer l'impact d'un grand nombre de systèmes radars sur le fonctionnement du SAR3, on a pris l'hypothèse d'un déploiement, sur la totalité du globe, de cent ensembles de dix systèmes radars représentatifs, soit un total de 1 000 systèmes radars.

Les systèmes radars étaient déployés aléatoirement selon une distribution uniforme couvrant les latitudes de -60° à $+70^\circ$ et les longitudes de -180° à $+180^\circ$. La distribution aléatoire des radars a été légèrement adaptée de sorte que tous les radars fixes soient situés sur terre et que tous les radars installés sur des navires soient situés en mer, sur un lac ou sur une rivière. Les radars aéroportés ont été placés au hasard avec une altitude aléatoire au-dessus du niveau de la mer comprise entre 1 et 10 km.

Les angles d'élévation des antennes d'émission radar ont été fixés initialement aux valeurs indiquées ci-dessous, et n'ont pas été modifiés pendant toute la durée des simulations.

- Radar A1 – les angles d'élévation ont été choisis aléatoirement entre -60° et $+60^\circ$
- Radar A2 – l'angle d'élévation de tous les radars A2 était de 0°
- Radar A3 – les angles d'élévation ont été choisis aléatoirement entre -40° et $+25^\circ$
- Radar A7d – les angles d'élévation ont été choisis aléatoirement entre -90° et 0°
- Radar A8 – les angles d'élévation ont été choisis aléatoirement entre -15° et $+15^\circ$

- Radar G3 – les angles d'élévation ont été choisis aléatoirement entre 0° et 90°
- Radar S1 – l'angle d'élévation de tous les radars S1 était de 3°
- Radar S3 – l'angle d'élévation de tous les radars S3 était de 0°
- Radar S6 – l'angle d'élévation de tous les radars S6 était de 5°
- Radar S7 – l'angle d'élévation de tous les radars S7 était de 8°

Chaque antenne d'émission radar effectuait un balayage en azimut aux vitesses spécifiées dans les Tableaux 5, 6, et 7, l'azimut initial étant choisi aléatoirement entre -180° et $+180^\circ$. Le cap des radars aéroportés ou installés sur des navires était aussi choisi aléatoirement entre -180° et $+180^\circ$.

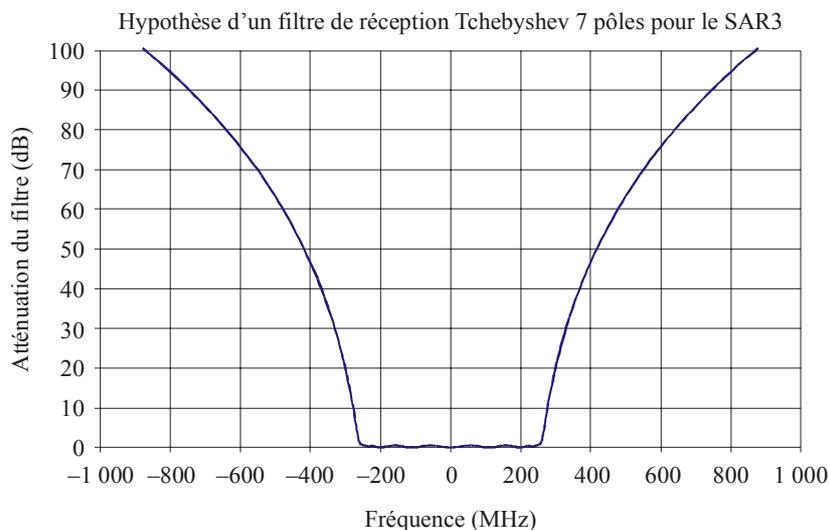
Pour les simulations utilisant le FDR, la fréquence de réception du SAR a été fixée à 9 600 MHz et les fréquences d'émission des radars choisies aléatoirement à chaque échantillon temporel dans l'intervalle des gammes de syntonisation listées dans les Tableaux 5, 6 and 7. Les valeurs de FDR en décibels ont été calculées par la méthode décrite ci-dessous et appliquées aux calculs des brouillages.

Toutes les simulations ont été effectuées sur une période de 10 jours par incrément temporel de trois secondes. A chaque incrément, l'azimut et l'élévation de chaque antenne radar ont été déterminés à partir de la fréquence de balayage de l'antenne. La distance entre le récepteur du SAR et les émetteurs des radars a été calculée à partir des paramètres orbitaux du SAR et de la localisation des stations radars. La puissance de brouillage des stations radars au niveau du SAR brouillé a été calculée par les équations (15) et (16) de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R M.1461-1.

Dans le cadre de l'analyse, le FDR correspond à l'atténuation des signaux radars émis résultant des caractéristiques du récepteur du SAR3. Cette atténuation se compose de deux parties: rejet à la fréquence d'accord (OTR, *On-Tune Rejection*) et rejet hors fréquence (OFR, *Off-Frequency Rejection*). Le FDR est calculé à partir des équations de la Recommandation UIT-R SM.337-4 «Séparations en fréquence et en distance».

Comme indiqué à la Fig. 1, on a pris l'hypothèse, pour le récepteur du SAR3, d'un filtre de Tchebychev 7 pôles centré sur 9,6 GHz avec une largeur de bande FI (fréquence intermédiaire) à 3 dB de 512 MHz.

FIGURE 1

Filtre de Tchebychev du récepteur du SAR3

Pour déterminer la densité spectrale de puissance de chaque émetteur radar, on a calculé la largeur de bande à 40 dB de l'impulsion de l'émetteur radar à partir des formules de l'Annexe 8 de la Recommandation UIT-R SM.1541 (limites des émissions hors bande des systèmes radars primaires). Le Tableau 9 fournit la liste des paramètres utilisés pour calculer le gabarit spectral d'émission des radars. Les courbes du spectre unilatéral des radars reproduites en Fig. 2 montrent une décroissance de 20 dB par décade à partir de la largeur de bande à 40 dB.

TABLEAU 9

Paramètres des radars utilisés dans le calcul du spectre RF d'après UIT-R SM.1541-1

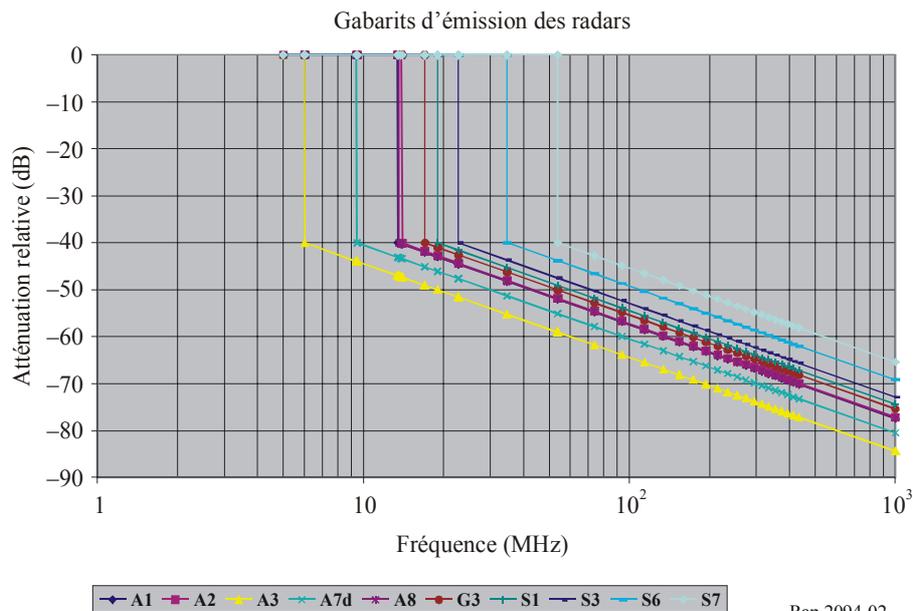
	Système radar									
	A1	A2	A3	A7d	A8	G3	S1	S3	S6	S7
Puissance de crête à l'émission (kW)	17	143	95	50	10	31	35	10	25	1,5
Type de modulation	Impul-sion	Impul-sion	Impul-sion	MLF	MLF	Impul-sion	Impul-sion	Impul-sion	Impul-sion	Impul-sion
Durée d'impulsion (μ s)	8,00	2,50	4,0	10,0	17,0	1,0	0,5	1,0	1,2	0,5
Temps de montée de l'impulsion (μ s)	0,010	0,020	0,100	0,100	0,100	0,050	0,080	0,028	0,010	0,010
Temps de descente de l'impulsion (μ s)	0,010	0,020	0,100	0,100	0,100	0,050	0,080	0,030	0,010	0,050
Largeur de bande du chirp (MHz)	N/A	N/A	N/A	5	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

MLF: Modulation linéaire en fréquence

N/A: Sans objet

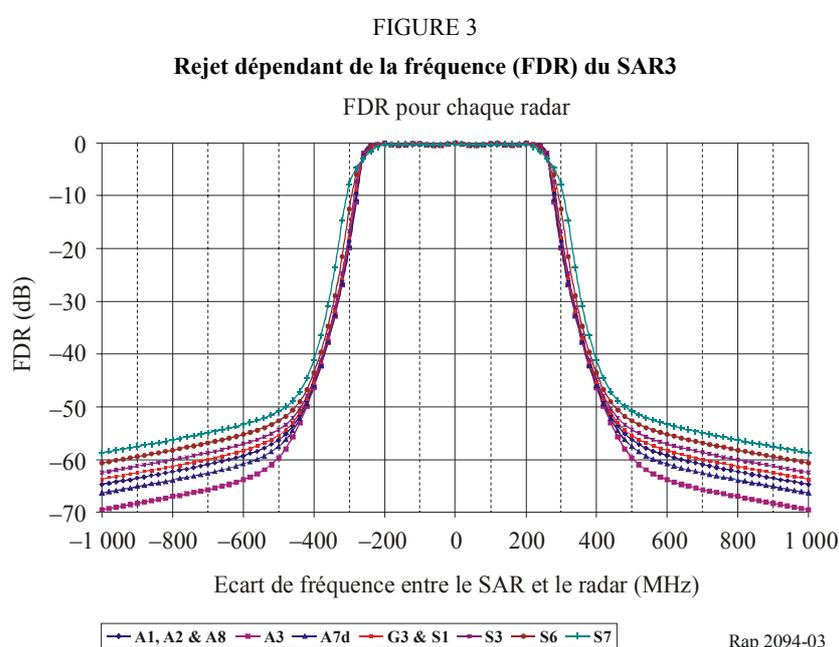
FIGURE 2

Courbes du spectre d'émission des radars



Les courbes du FDR obtenues à partir des équations de la Recommandation UIT-R SM.337-4 sont reproduites en Fig. 3. Les radars présentant des FDR identiques sont regroupés sous une seule courbe; il s'agit des radars A1, A2 et A8, des radars A3 et A7d et des radars G3 et S1. Les courbes des radars S3, S6 et S7 sont distinctes.

Comme le montre le centre de la Fig. 3, les valeurs de FDR pour des écarts de fréquence inférieurs à ± 250 MHz sont négligeables. Etant donné que la largeur de bande FI du SAR3 est importante par rapport aux largeurs de bande des émetteurs, la composante OTR (rejet à la fréquence d'accord) de la formule de calcul du FDR est négligeable. Par ailleurs, du fait de l'écart entre la fréquence centrale du récepteur du SAR3 et la fréquence centrale d'émission des radars, l'OFR (rejet hors fréquence) est le facteur prépondérant dans le calcul du FDR. Les valeurs de FDR de la Fig. 3 ont permis de dresser une table de correspondance FDR/décalage de fréquence, utilisée lors de la simulation pour modifier aléatoirement la fréquence d'émission des radars à chaque incrément temporel.



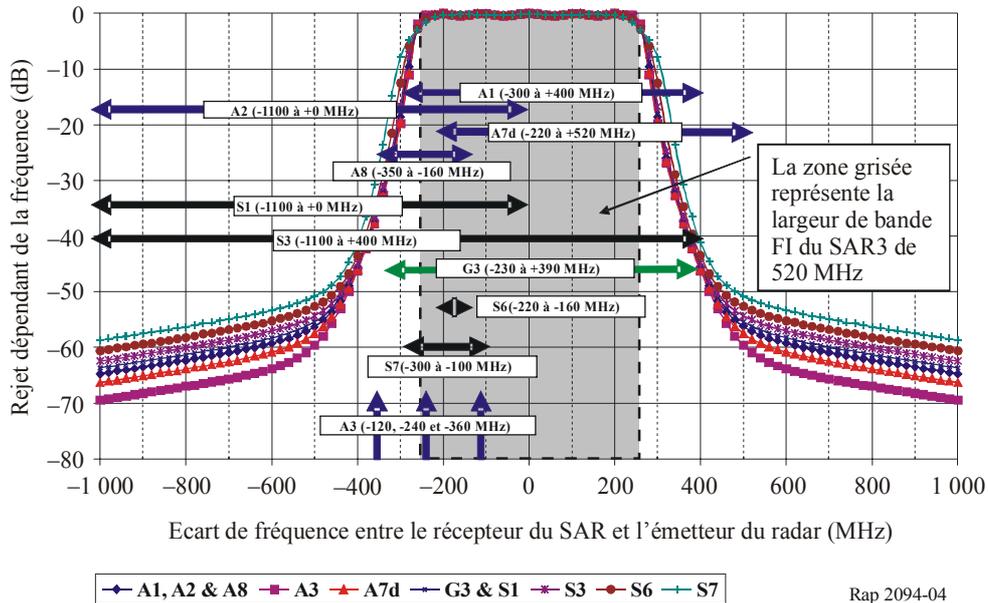
La Fig. 4 montre, pour chaque radar, la plage dans laquelle sa fréquence centrale sera modifiée aléatoirement. Si la fréquence d'un radar se situe dans la zone grisée, il n'y aura pas de différence significative entre le cas d'analyse cofréquence et le cas d'analyse FDR. A l'extérieur de cette zone en revanche, le FDR augmente et le niveau de brouillage du récepteur SAR diminue.

FIGURE 4

Comparaison du FDR du SAR3 et de la gamme de syntonisation d'émission du radar

Plages de fréquences d'émission des radars par rapport aux FDR

(Dans la zone grisée: faible amélioration due au FDR par rapport au fonctionnement en cofréquence)



5.1.2 Résultats de l'analyse

Ce paragraphe présente les résultats des analyses suivantes:

- Analyse cofréquence pour déterminer:
 - les niveaux de brouillage du SAR3 causés individuellement par chaque système radar;
 - les niveaux cumulés de brouillage du SAR3 causés par 1 000 systèmes radars disposés aléatoirement.
- Analyse FDR (rejet dépendant de la fréquence) pour déterminer:
 - les niveaux de brouillage du SAR3 causés individuellement par chaque système radar;
 - les niveaux cumulés de brouillage du SAR3 causés par 1 000 systèmes radars disposés aléatoirement.

5.1.2.1 Analyse cofréquence – Cas du brouilleur unique

La Fig. 5 montre les courbes des fonctions de distribution cumulative de brouillages du SAR spatioporté causés par des émetteurs radars aéroportés, installés sur des navires et au sol. Le Tableau 10 fournit les valeurs statistiques de brouillage: niveaux de dépassement du seuil de 1%, d'une part, et niveaux de brouillage maximum, d'autre part. Les niveaux de brouillage maximum causés par les radars simulés sont nettement inférieurs au critère de brouillage d'un SAR spatioporté, à savoir $-89,9 \text{ dB(W/512 MHz)}$, à l'exception du radar A1 qui dépasse le critère pendant moins de 0,01% du temps. Les statistiques relevées lors des simulations incluent toutes les valeurs de brouillage supérieures à -300 dBW , l'hypothèse adoptée étant qu'au-dessous de -300 dBW la visibilité entre le SAR3 et les radars est nulle.

A chaque exécution de la simulation, le radar émettait en continu à partir d'une position fixe de 40° N en latitude et de 97° O en longitude.

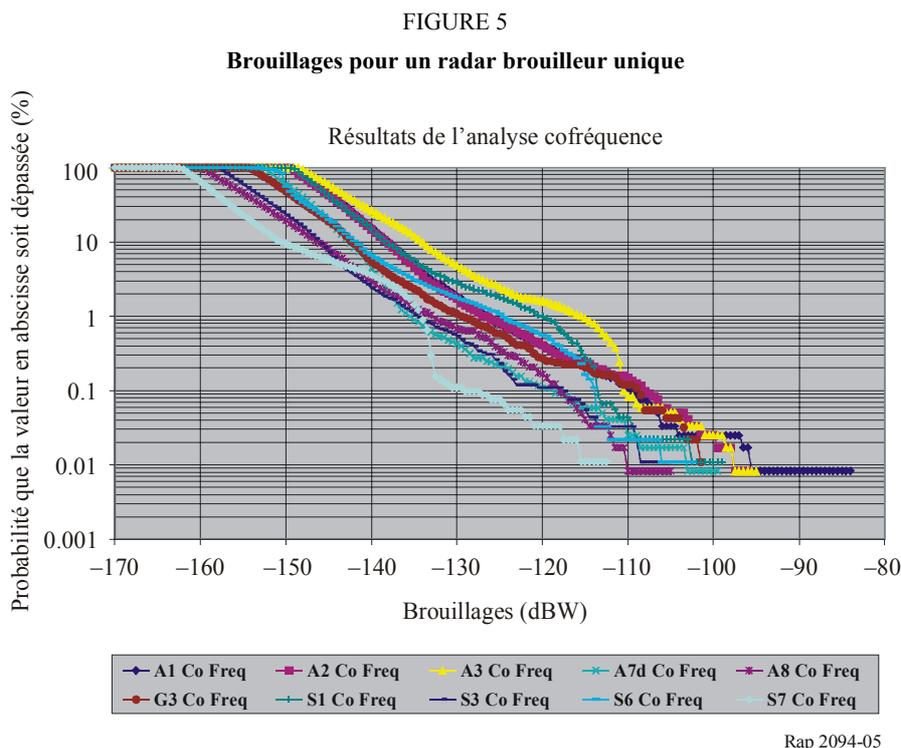


TABLEAU 10

Résumé des brouillages du SAR3 causés par un radar unique – analyse cofréquence

Radar	Valeur de brouillage au seuil de 1,0% (dBW)	Valeur de brouillage maximum (dBW)
Radars aéroportés		
A1	-126,5	-84,0
A2	-127,0	-96,0
A3	-115,5	-95,5
A7d	-135,5	-99,5
A8	-133,0	-105,0
Radars installés sur des navires		
S1	-120,0	-99,5
S3	-135,0	-106,0
S6	-125,0	-102,5
S7	-133,5	-113,0
Radars terrestres		
G3	-129,5	-102,0

5.1.2.2 Analyse cofréquence – Cas des brouilleurs multiples

La Fig. 6 montre la courbe de fonction de distribution cumulative des brouillages cumulés du SAR spatioporté causés par 1 000 émetteurs radars aéroportés, installés sur des navires et au sol. Le Tableau 11 fournit les valeurs statistiques de brouillage: niveaux de dépassement du seuil de 1%, d'une part, et niveaux de brouillage maximum, d'autre part. La Fig. 6 montre que le critère de brouillage du SAR aéroporté a été dépassé pendant 0,018% du temps.

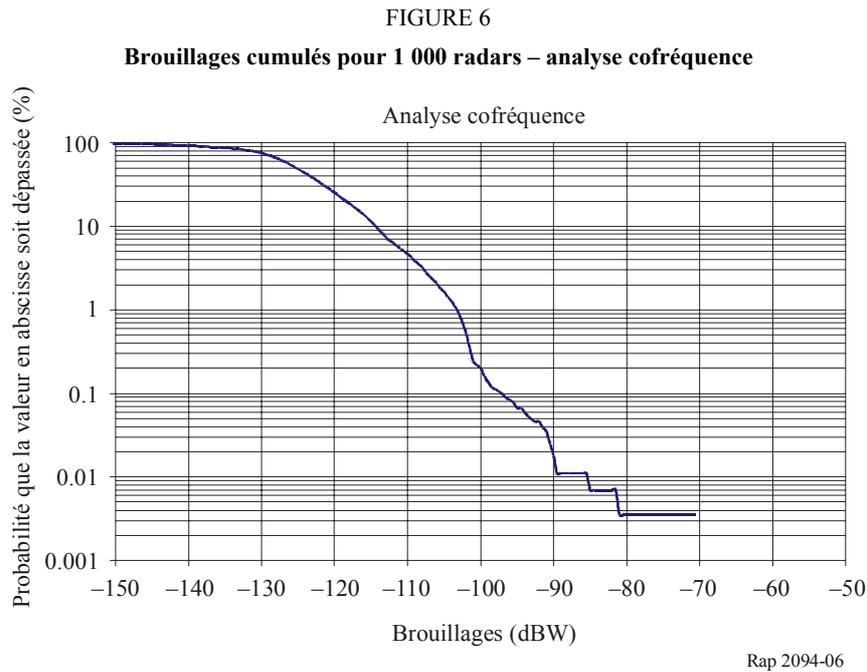


TABLEAU 11

Brouillages du SAR 3 causés par plusieurs radars (synthèse)

Valeur du brouillage au seuil de 1,0% (dBW)	Valeur de brouillage maximum (dBW)	Pourcentage du temps où le niveau maximal de brouillage a été observé
-103,5	-70,5	0,0035%

5.1.2.3 Analyse FDR – Cas du brouilleur unique

Pour l'analyse FDR, on a utilisé la même configuration de déploiement satellitaire et les mêmes hypothèses que dans l'analyse cofréquence. La Fig. 7 montre les courbes de fonction de distribution cumulative des brouillages du SAR spatioporté causés par des émetteurs radars aéroportés, installés sur des navires et au sol. Le Tableau 12 fournit les valeurs statistiques de brouillage: niveaux de dépassement du seuil de 1%, d'une part, et niveaux de brouillage maximum, d'autre part. Les niveaux de brouillage maximum causés par tous les radars simulés sont nettement inférieurs au critère de brouillage d'un SAR spatioporté, à savoir $-9,9$ dB(W/512 MHz).

En comparant la Fig. 7 avec les résultats de la simulation en cofréquence au point de probabilité 1%, on observe que dans la majorité des cas le niveau de puissance de brouillage du SAR est inférieur dans la simulation FDR au niveau de brouillage obtenu dans la simulation en cofréquence. Dans le cas de la simulation FDR, la réduction de la puissance de brouillage est comprise entre 0 dB pour le radar S6 et 15 dB pour le radar S1. Comme le montre la Fig. 4, la quantité de FDR est fonction de la gamme de syntonisation de l'émetteur du radar et de son décalage par rapport à la fréquence centrale du récepteur du SAR.

FIGURE 7
Brouillages pour un radar brouilleur unique

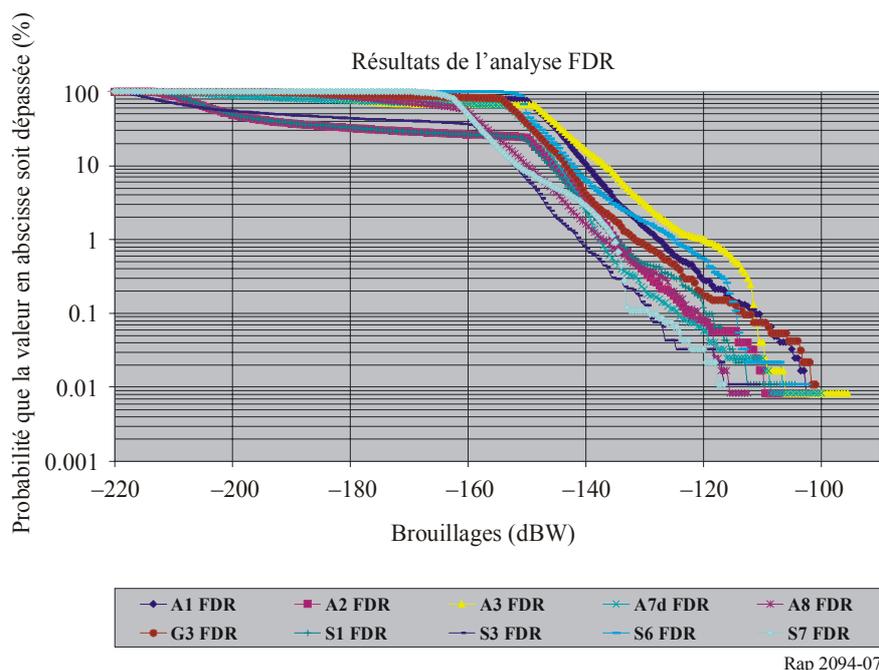


TABLEAU 12

Résumé des brouillages causés par un radar unique dans le SAR3 exploitant le FDR

Radar	Valeur du brouillage au seuil de 1,0% (dBW)	Valeur de brouillage maximum (dBW)
Radars aéroportés		
A1	-128,0	-100,5
A2	-135,0	-102,5
A3	-120,0	-95,5
A7d	-137,5	-100,0
A8	-137,5	-112,5
Radars installés sur des navires		
S1	-135,0	-104,5
S3	-141,5	-111,0
S6	-125,0	-103,0
S7	-135,0	-116,5
Radars terrestres		
G3	-132,0	-101,0

5.1.2.4 Analyse FDR – Cas des brouilleurs multiples

Pour l'analyse FDR, on a utilisé la même configuration de déploiement satellitaire et les mêmes hypothèses que dans l'analyse cofréquence. La Fig. 8 montre la courbe de fonction de distribution cumulative des brouillages cumulés du SAR spatioporté causés par 1 000 émetteurs radars aéroportés, installés sur des navires et au sol. Le Tableau 13 fournit les valeurs statistiques de

brouillage: niveaux de dépassement du seuil de 1%, d'une part, et niveaux de brouillage maximum, d'autre part. La Fig. 8 montre que le critère de brouillage du SAR aéroporté a été dépassé pendant 0,0035% du temps. Lorsque l'on fait intervenir le FDR en provoquant aléatoirement des sauts de fréquence de transmission des radars, le niveau cumulé des brouillages du SAR3 est approximativement inférieur de 4,5 dB au point de dépassement de 1% par rapport à sa valeur dans l'hypothèse d'un fonctionnement en cofréquence.

5.1.3 Techniques de limitation des brouillages au niveau des SAR

Les résultats de l'étude montrent certes que les techniques de limitation des brouillages des SAR par le service de radiorepérage ne sont pas indispensables. Cependant, des techniques de traitement au niveau des SAR permettent de supprimer les brouillages de certaines formes d'onde de façon appréciable. Les données brutes reçues par les radars SAR sont traitées en distance et en azimut pour construire une image radar. Le signal retour d'une cible ponctuelle subit ainsi un étalement fréquentiel linéaire à la fois en distance et en azimut. Lorsque le processeur du SAR corrèle les données dans les deux dimensions, le gain de traitement se situe habituellement entre 20 et 40 dB pour l'écho retour. Les gains de traitement interviennent donc dans la détermination des critères de brouillage d'un SAR spatioporté tels que spécifiés dans la Recommandation UIT R RS.1166.

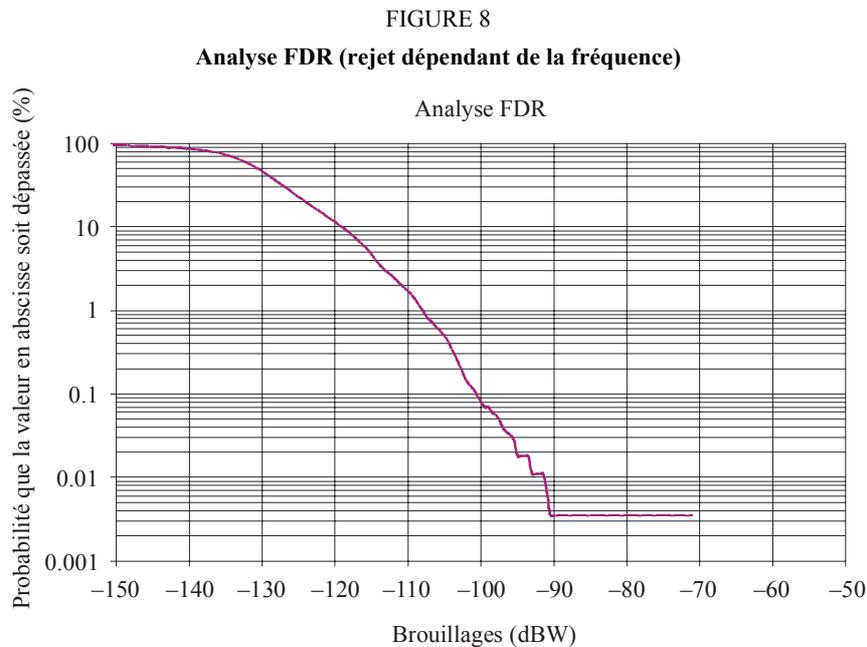


TABLEAU 13

Brouillages causés par plusieurs radars dans le SAR 3 exploitant le FDR (synthèse)

Valeur du brouillage au seuil de 1,0% (dBW)	Valeur de brouillage maximum (dBW)	Pourcentage du temps où le niveau maximal de brouillage a été observé
-108,0	-71,0	0,0035%

5.1.4 Conclusion de l'analyse

Cette étude a permis d'évaluer les niveaux de puissance des brouillages sur un récepteur SAR spatioporté causés par des émetteurs de radiorepérage aéroportés, installés sur des navires et au sol fonctionnant dans la bande 9 300-10 000 MHz. Les résultats des simulations montrent que:

- Les niveaux de brouillage maximum causés par les radars envisagés dans la présente étude, pris individuellement, en simulation cofréquence, sont nettement inférieurs aux critères de brouillage d'un SAR spatioporté, à savoir 89,9 dB(W/512 MHz), à l'exception du radar A1 qui dépasse le critère pendant moins de 0,01% du temps.
- Les niveaux de brouillage maximum causés par les radars envisagés dans la présente étude, pris individuellement, en simulation FDR, sont nettement inférieurs aux critères de brouillage d'un SAR spatioporté, à savoir 89,9 dB(W/512 MHz).
- Dans l'hypothèse d'un déploiement aléatoire mondial de 1 000 radars fonctionnant dans le même canal que le SAR3, le critère de brouillage du SAR spatioporté est dépassé pendant 0,018% du temps.
- Dans l'hypothèse d'un déploiement aléatoire mondial de 1 000 radars dont les émetteurs font des sauts de fréquence aléatoires à l'intérieur de leur gamme de syntonisation, le critère de brouillage du SAR spatioporté est dépassé pendant 0,0035% du temps.

5.2 Analyse – Etude N° 2: Evaluation de la probabilité de brouillage du SETS (actif) dans la bande 9 300-9 500 MHz causés par des radars météorologiques au sol

Des simulations dynamiques ont permis d'évaluer les risques de brouillage dus à des radars météorologiques terrestres. Les paramètres d'exploitation des systèmes SETS (actifs) ainsi que les caractéristiques des radars météorologiques sont bien connus, mais on possède peu d'information sur le déploiement des radars météorologiques terrestres exploitant la bande 9 300-9 500 MHz (nombre de systèmes, densité, localisation). Il a donc fallu faire des hypothèses sur les localisations, la densité et le nombre total de ces systèmes à l'échelle mondiale. Les simulations ont été faites sur une période de 20 jours et ont mis en jeu 30, 60 et 120 radars météorologiques terrestres placés aléatoirement sur l'ensemble du globe. Par hypothèse, tous les radars fonctionnent dans la bande 9 300-9 500 MHz, c'est-à-dire à l'intérieur de la largeur de bande opérationnelle du SAR.

5.2.1 Paramètres simulés du SETS (actif)

L'étude a porté sur un SAR unique dont les paramètres orbitaux étaient ceux du SAR3 décrits dans le Tableau 1. Pour déterminer la compatibilité entre le SETS et les radars météorologiques, on a utilisé le critère de $-95,9$ dB(W/512 MHz) pendant moins de 1% du temps. On a collecté les statistiques des brouillages cumulés au niveau du récepteur du SAR causés par les radars météorologiques terrestres.

5.2.2 Paramètres simulés des radars météorologiques

Une feuille de calcul a permis de générer des localisations aléatoires de zones terrestres, qui ont servi à positionner les radars météorologiques. En outre, la vitesse de rotation d'antenne ainsi que l'élévation initiale ont aussi été choisies aléatoirement pour chaque radar. Bien que le nombre exact de radars météorologiques exploitant la bande 9 300-9 500 MHz sur Terre ne soit pas connu, on peut l'estimer entre 30 et 60. Une simulation mettant en œuvre 120 radars a par ailleurs été effectuée de façon à prendre en compte la probable multiplication des radars météorologiques exploitant la bande 9 300-9 500 MHz à l'avenir.

Bien que les radars météorologiques puissent adopter différentes stratégies de balayage de l'antenne, les radars utilisés pour la simulation ont tous été configurés en balayage volumique. Pour effectuer un balayage volumique, le radar démarre avec une faible élévation (habituellement de l'ordre

de $0,5^\circ$), accomplit une rotation complète en azimut, augmente son élévation de quelques degrés, effectue une autre rotation en azimut et répète cette procédure jusqu'à une élévation maximale de 20° à 30° . Puis l'antenne retourne à son angle d'élévation minimal pour répéter l'ensemble du processus. La courbe d'élévation de l'antenne pendant le balayage volumique utilisé lors des simulations est reproduite en Fig. 9.

5.2.3 Résultats

Comme le montrent les résultats de la simulation en Fig. 10, pour le déploiement actuel des radars météorologiques – soit 30 à 60 radars dans le monde – le critère de brouillage du SAR de $-95,9$ dBW dans une largeur de bande de 512 MHz est dépassé pendant moins de 0,015% à 0,025% du temps, ce qui est nettement inférieur aux spécifications de non-disponibilité de 1%. La simulation mettant en œuvre 120 radars n'a montré qu'une légère augmentation des brouillages au niveau du SAR, le critère étant dépassé pendant 0,04% du temps.

FIGURE 9

Mouvement en élévation de l'antenne pour la stratégie de balayage volumique utilisée lors des simulations

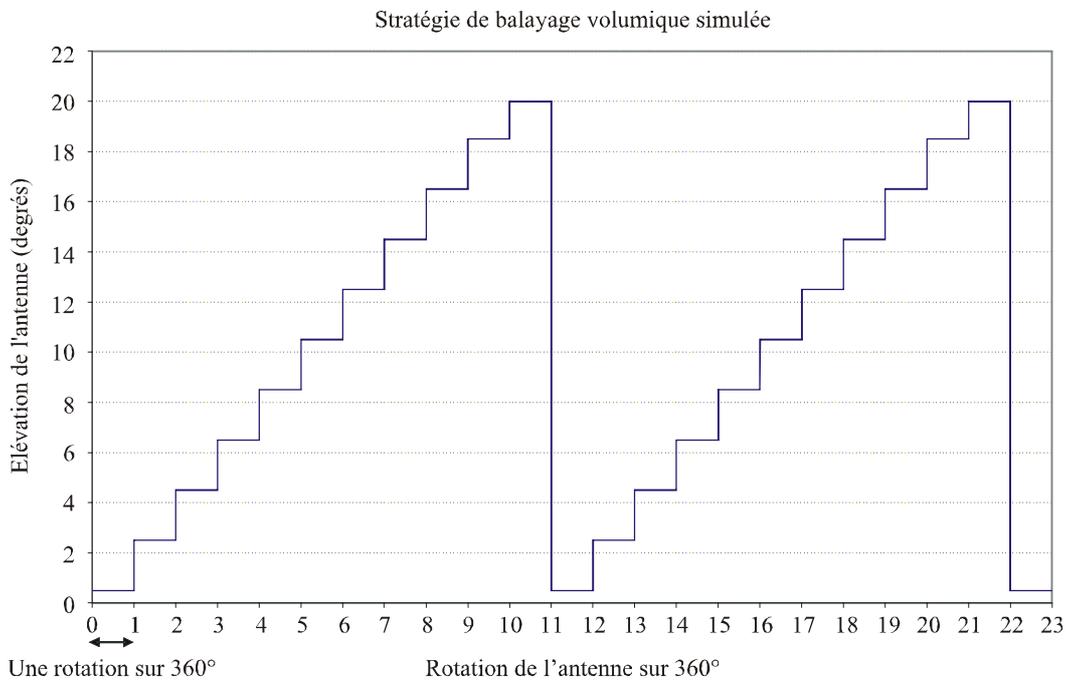
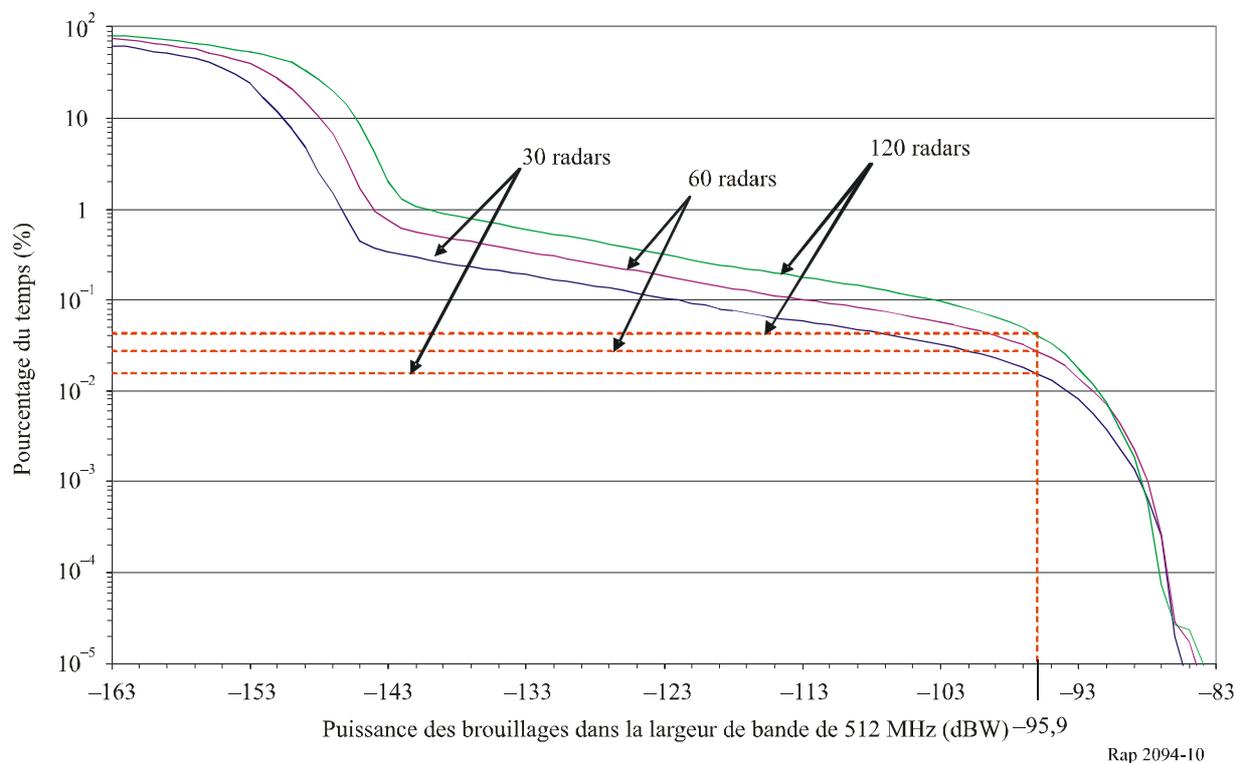


FIGURE 10
Courbe de fonction de distribution cumulative (FDC) pour 30, 60 et 120 radars
 Courbe de FDC pour 30, 60 et 120 radars - 20 jours de simulation



Rap 2094-10

5.2.4 Conclusion

Les simulations montrent que les niveaux de brouillage du SETS (actif) dans les cas de 30 et 60 radars répartis sur le globe dépassent $-95,9$ dBW pendant 0,015% et 0,025% du temps respectivement. Une des simulations mettant en jeu 120 radars disposés aléatoirement sur le globe a permis d'étudier l'impact futur d'un accroissement du nombre de radars sur le fonctionnement du SETS (actif). Un déploiement aléatoire de 120 radars produit des niveaux de brouillage cumulés de $-95,9$ dBW pendant 0,04% du temps. On peut donc conclure de ces résultats que les brouillages cumulés dus aux radars météorologiques terrestres – actuels et futurs – se situent nettement au-dessous des critères de brouillage du SETS (actif). S'agissant des brouillages causés par les radars météorologiques terrestres sur le SETS (actif), la compatibilité de fonctionnement est donc assurée.

5.3 Analyse – Etude N° 3: Evaluation des niveaux de brouillage maximums causés par le SETS (actif) dans le service de radiolocalisation dans les bandes 9 300-9 500 MHz et 9 800-10 000 MHz

5.3.1 Démarche de l'analyse

Un modèle de simulation par ordinateur a été développé pour calculer le rapport brouillage sur bruit maximum causé par un capteur actif SAR aéroporté fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz dans le récepteur des systèmes de radiopéage à la surface ou à proximité de la Terre. L'étude a été effectuée pour des fréquences situées dans la gamme 9 300-9 500 MHz, mais de nombreux systèmes de radiopéage utilisés pour l'étude exploitent aussi la bande 9 800-10 000 MHz. Par conséquent, les caractéristiques des radars exploitant la bande 9 800-10 000 MHz ont également été prises en compte; les résultats de l'étude s'appliquent aussi à cette bande.

Pour la simulation, les radars aéroportés (systèmes A1, A2, A8, et A10) ont été placés sur un aéronef unique à une altitude de 9,1 km décrivant un carré de 500 km de côté environ et volant à une latitude comprise entre 30° N et 35° N et une longitude comprise entre 90° O et 95° O. De même, les quatre radars S1, S3, S4 et S9 ont été placés sur un navire unique décrivant un carré de 500 km de côté environ et naviguant à une latitude comprise entre 30° N et 35° N et une longitude comprise entre 30° O et 35° O. Les radars terrestres (systèmes G2 et G3) ont été placés sur terre à des positions fixes (latitude 30° N, longitude 115° O). Le balayage de l'antenne a été simulé pour tous les radars conformément aux paramètres des Tableaux 5, 6 et 7. Pour les systèmes radars dont l'angle de bascule (élévation) verticale est paramétrable, l'antenne a été positionnée à l'angle de bascule maximal.

Les simulations prennent l'hypothèse d'un fonctionnement copolaire cofréquence. Pour déterminer la valeur du rapport brouillage sur bruit (ci-après I/N) maximum au niveau d'un récepteur radar, les simulations ont été effectuées sur une durée de 10 jours par incréments de 10 ms. A chaque incrément, l'élévation et l'azimut de l'antenne radar ont été déterminés à partir de la fréquence de balayage de l'antenne. La distance entre chaque émetteur SAR et les récepteurs radars a été calculée à partir des paramètres orbitaux du SAR et de la localisation des stations radars. La puissance des brouillages causés par le SAR au niveau des stations radars brouillées ainsi que la valeur de crête de l'OTR ont été calculées par les équations (15) et (16) de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R M.1461-1.

5.3.2 Résultats de l'analyse

Les valeurs de crête de la puissance d'émission du SAR reçue par les radars de radiolocalisation ont été déterminées sous forme de niveaux maximum du rapport I/N . Le niveau de bruit dans le récepteur radar a été calculé à partir de la largeur de bande FI du récepteur et des facteurs de bruit fournis par les tables de caractéristiques du radar. Lorsque le facteur de bruit n'était pas disponible, une valeur de 5 dB a été appliquée lors du calcul de la puissance de bruit dans le récepteur.

Pour prendre en compte la différence entre les largeurs de bande de l'émetteur SAR et celles des récepteurs radars, on a calculé le rejet à la fréquence d'accord (OTR). A cet effet, les valeurs d'OTR du Tableau 14 ont été utilisées lors du calcul des rapports I/N dans la simulation. Le calcul a été effectué en prenant une durée d'impulsion SAR de 1 μ s de façon à obtenir une valeur d'OTR correspondant au cas le plus défavorable.

TABLEAU 14

Rejet à la fréquence d'accord calculé (dB)

	Systèmes radars aéroportés				Systèmes radars installés sur le navire				Systèmes radars terrestres	
	A1	A2	A8	A10	S1	S3	S4	S9	G2	G3
SAR3	6,7	2,6	0,0	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,5

Les Tableaux 15, 16 et 17 indiquent les niveaux maximums du rapport I/N respectivement dans les radars aéroportés, embarqués sur le navire et installés au sol.

TABLEAU 15

Synthèse des brouillages SAR dans les radars aéroportés

Système radar	Rapport I/N maximum (dB)
A1	32
A2	38
A8	42
A10	45

TABLEAU 16

Synthèse des brouillages SAR dans les radars installés sur le navire

Système radar	Rapport I/N maximum (dB)
S1	32
S3	37
S4	52
S9	28

TABLEAU 17

Synthèse des brouillages SAR dans les radars terrestres

Système radar	Rapport I/N maximum (dB)
G2	11
G3	23

5.3.3 Discussion sur la limitation des brouillages

Lors de l'évaluation de la dégradation des systèmes radars de radiorepérage par des signaux à impulsions, il convient de prendre en compte d'autres facteurs pour déterminer les effets du rapport I/N : circuits de suppression des brouillages, gain de traitement des systèmes de radiorepérage, etc. La Recommandation UIT-R M.1372 montre par exemple qu'on peut supprimer les impulsions de brouillage asynchrones au niveau d'un récepteur radar grâce à un discriminateur d'amplitude d'impulsion et, sous certaines conditions, éliminer une valeur de crête du rapport I/N de 14 dB ou plus en vue des traitements ultérieurs du récepteur. On peut aussi utiliser une technique CFAR (taux de fausse alarme constant) au niveau du récepteur radar pour limiter les impulsions de brouillage asynchrones à faible rapport cyclique. Un traitement CFAR permet de déterminer un seuil de détection qui s'adapte aux niveaux des brouillages et des échos parasites. Comme indiqué dans la Recommandation UIT-R M.1372, les impulsions de brouillage n'ont pas d'incidence sur le seuil de détection tant que les rapports I/N sont de l'ordre de 30 dB ou plus.

En outre, les radars qui effectuent un traitement Doppler sur le signal reçu étalent les diverses composantes du signal pulsé sur un certain nombre de cases Doppler, ce qui équivaut à un moyennage du niveau du signal brouilleur. L'utilisation de la puissance SAR moyenne plutôt que la puissance de crête dans cette étude abaisserait les niveaux de brouillage d'environ 23 dB.

Le niveau d'élimination des brouillages varie pour chaque radar et sa valeur réelle ne peut être déterminée qu'en effectuant des essais avec le signal SAR étudié. Il est prévu de faire des essais de signaux SETS sur plusieurs types de radars: radionavigation maritime, radar de surveillance des mouvements de surface des aéroports (ASDE), radars météorologiques aéroportés ou terrestres, etc. Pour les essais, on utilisera des signaux SETS qui produisent les niveaux de rapport I/N des Tableaux 15, 16 et 17.

Des études et essais précédents avec un radar de surveillance d'espace aérien équipé du traitement CFAR et un signal SAR spécifique ont montré qu'il fallait un rapport I/N d'environ +35 dB pour dégrader de façon significative la qualité de fonctionnement du radar. Pour permettre au radar de supporter un rapport I/N de 35 dB dû au signal SAR, deux facteurs se sont révélés essentiels: les techniques de limitation des brouillages et un gain de traitement dans le récepteur radar.

5.3.4 Conclusion de l'analyse

Cette étude consistait à évaluer les rapports I/N à l'entrée d'un récepteur radar soumis à des brouillages venant d'un SAR aéroporté fonctionnant en cofréquence dans la bande 9 300-9 500 MHz. De nombreux systèmes de radiolocalisation utilisés lors de cette étude fonctionnant aussi dans la bande 9 800-10 000 MHz, les résultats sont également valables pour cette bande de fréquences. La Recommandation UIT-R M.1461 indique que l'effet des impulsions de brouillage est relativement difficile à quantifier et dépend fortement de la conception du récepteur/processeur et du mode de fonctionnement du système. En particulier, les gains de traitement différentiel entre un écho de cible valable pulsé de façon synchrone et des impulsions de brouillage généralement asynchrones ont souvent des effets importants sur des niveaux donnés d'impulsions de brouillage.

Or la désensibilisation peut être à l'origine de différents types de dégradation de la qualité de fonctionnement. L'évaluation de la désensibilisation constituera donc un objectif d'analyse des interactions entre plusieurs types de radar. On peut s'attendre, de façon générale, à ce que de nombreuses fonctions des radars de radiorepérage contribuent à supprimer les brouillages par impulsions à faible rapport cyclique, en particulier lorsqu'ils proviennent de quelques sources isolées. A cet égard, la Recommandation UIT-R M.1372 présente différentes techniques de suppression des impulsions de brouillage à faible rapport cyclique.

5.4 Analyse – Etude N° 4: Analyse des risques de brouillage causés par le SETS (actif) sur des radars météorologiques au sol utilisés dans le service de radiolocalisation dans la bande 9 300-9 500 MHz

Les résultats de l'analyse de compatibilité entre les radars météorologiques terrestres et le SETS sont issus de simulations dynamiques utilisant un package logiciel du commerce. Seuls les brouillages causés par le SETS sur un radar météorologique terrestre sont pris en compte dans la présente étude. Les simulations ont été effectuées de façon à couvrir une période d'environ 23 jours pour chaque scénario. L'analyse comporte deux parties. Une analyse préliminaire a consisté à déterminer rapidement s'il existait effectivement un problème de compatibilité, en prenant l'hypothèse de deux valeurs de protection I/N : -6 dB et +10 dB. Les résultats de cette première analyse montrant que les seuils de rapport I/N de -6 dB et +10 dB pouvaient être dépassés pendant des périodes de temps importantes, une analyse complémentaire a été menée pour déterminer la capacité des radars météorologiques à limiter des niveaux de brouillage supérieurs.

5.4.1 Analyse préliminaire

Cette partie de l'analyse prend pour hypothèse élémentaire l'incapacité du radar brouillé à limiter des niveaux élevés de brouillage pulsé.

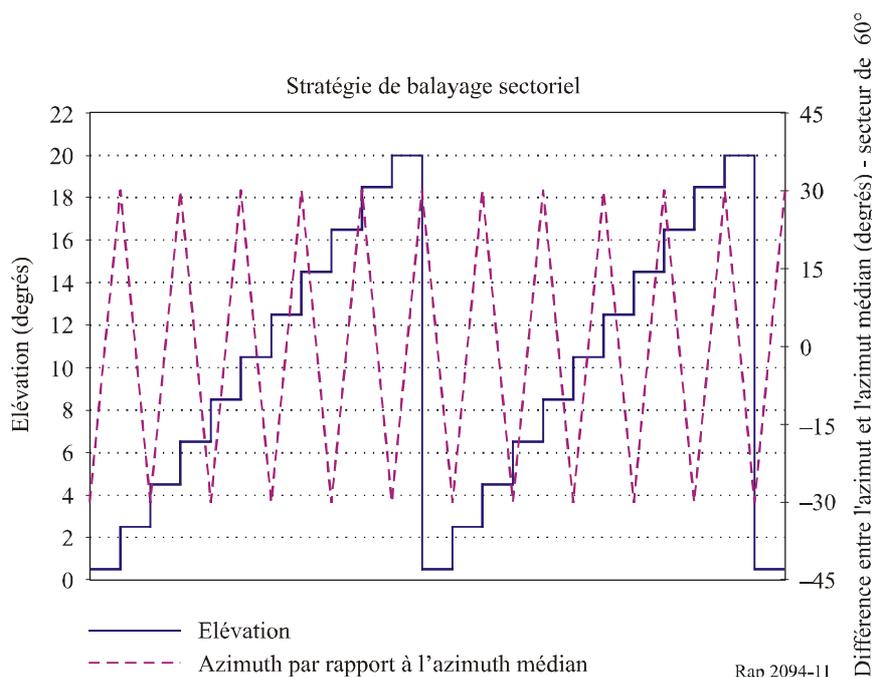
5.4.1.1 Paramètres du radar météorologique terrestre

Les radars météorologiques terrestres peuvent fonctionner dans plusieurs modes caractérisés par différentes vitesses de rotation et différentes stratégies de mouvement de l'antenne. En mode «balayage volumique» (stratégie la plus courante), l'antenne effectue une série de rotation complètes à différentes élévations. Les élévations sont modifiées de façon incrémentale d'une valeur minimale proche de 0° à une valeur maximale comprise entre 20° et 30° . La Fig. 9 du § 5.2.3 reproduit la courbe de balayage volumique de l'antenne utilisée lors des simulations.

En outre, pour répondre à certaines exigences opérationnelles, les radars météorologiques terrestres utilisent aussi d'autres stratégies de balayage. Ainsi, pour surveiller de près une zone atmosphérique donnée, le radar peut effectuer des balayages sectoriels ou travailler en mode spotlight. En mode de balayage volumique sectoriel, l'antenne se concentre sur un secteur en azimut et augmente son élévation par pas successifs. En mode spotlight, l'azimut et l'élévation de l'antenne sont maintenus à des valeurs constantes de façon à éclairer une petite zone atmosphérique pendant une longue période de temps. Pour la présente étude, le balayage volumique sectoriel a été simulé en balayant un secteur azimutal de 60° , c'est-à-dire $\pm 30^\circ$ autour d'une valeur médiane d'azimut. On a choisi pour les simulations les valeurs d'azimut médian suivantes: 0° , 90° et 135° . La Fig. 11 représente la courbe de stratégie volumique sectorielle utilisée pendant les simulations.

FIGURE 11

Mouvement de l'antenne dans le mode de balayage sectoriel utilisé pendant les simulations (largeur de secteur de 60°)



Comme indiqué au Tableau 7, la vitesse de rotation de l'antenne du radar G9 peut varier entre deux extrêmes. Les stratégies de balayage volumique et de balayage sectoriel sont donc simulées à des vitesses de rotation d'antenne de $5^\circ/\text{s}$ et $20^\circ/\text{s}$. On suppose par ailleurs que le radar météorologique terrestre reste à un endroit fixe. Trois localisations sont envisagées étant donné que la durée de visibilité du radar par le SAR peut dépendre de la latitude du radar. Lors des simulations, le radar a ainsi été placé à une latitude basse, à une latitude moyenne et à une latitude élevée (0° , 45° N et 60° N). Etant donné que la largeur de bande FI du radar est paramétrable, il aurait fallu effectuer un grand nombre de simulations pour couvrir toutes les combinaisons possibles. On a donc choisi la largeur de bande FI correspondant au cas de brouillage le plus défavorable, à savoir 10 MHz.

5.4.1.2 Paramètres des SAR

On a également simulé les caractéristiques orbitales des SAR. Les simulations mettent en jeu quatre SAR séparés de 90° en longitude. Le signal SAR est de type modulé linéairement en fréquence (chirp) avec une durée d'impulsion variable de 1 à 10 µs. Pour limiter le nombre de simulations, on a retenu une largeur d'impulsion de 10 µs, ce qui correspond au FDR minimal et au cas de partage le plus défavorable. En outre, on a pris l'hypothèse d'un fonctionnement en cofréquence avec le radar météorologique. Les tests ont montré que la réponse des circuits FI du récepteur réduit la largeur d'impulsion équivalente d'un signal modulé linéairement en fréquence lorsque la largeur de bande du signal est nettement plus grande que la largeur de bande du récepteur. Par conséquent, l'impulsion de 10 µs modulée linéairement en fréquence du SAR3 est considérablement diminuée dans le récepteur du radar recevant l'impulsion. Cette caractéristique peut contribuer à la compatibilité des systèmes.

5.4.1.3 Rejet dépendant de la fréquence

Le rejet dépendant de la fréquence (FDR) entre une source de brouillage et un récepteur brouillé est la somme de deux composantes: le rejet hors fréquence (OFR) et le rejet à la fréquence d'accord (OTR).

$$FDR = OFR + OTR$$

Dans le cas où le SAR et le radar fonctionnent en cofréquence, OFR est nul.

L'OTR des signaux modulés linéairement en fréquence se calcule de la façon suivante:

$$OTR = 10 \log (B_c / (B_R^2 T)) \quad \text{pour } B_c / (B_R^2 T) > 1$$

où:

- T: largeur d'impulsion du chirp (s)
- B_c : largeur de bande du chirp émis pendant la durée d'impulsion T (Hz)
- B_R : largeur de bande du récepteur à 3 dB

Dans le cas des systèmes étudiés, la largeur de bande des radars météorologiques est de 10 MHz et la largeur d'impulsion chirp du SAR est de 10 µs; l'OTR est donc nul. Une valeur de FDR de 0 dB a donc été utilisée pour les simulations.

5.4.1.4 Résultats de l'analyse

Etant donné que la capacité des radars météorologiques terrestres à limiter les brouillages SAR n'était pas connue lors de l'analyse préliminaire, on a pris comme référence un rapport I/N générique de -6 dB. Cependant, le rapport de -6 dB correspond à une onde entretenue ou à un signal de brouillage assimilable à du bruit; il n'est donc peut-être pas applicable au signal d'un SAR spatioporté caractérisé par des impulsions modulées linéairement en fréquence. Il importe par ailleurs de souligner que le radar utilisé lors des simulations ainsi que d'autres types de radars météorologiques terrestres exploitant la bande étudiée ne possèdent pas nécessairement de techniques de limitation des brouillages telles que celles décrites dans la Recommandation UIT-R M.1372 pour éliminer les effets des impulsions de brouillage. Les résultats préliminaires présentés ne doivent donc pas être utilisés pour déterminer la compatibilité à partir de considérations de traitement du signal.

5.4.1.5 Résultats du balayage volumique du radar

Le Tableau 18 présente les résultats des simulations en balayage volumique. Les durées sont indépendantes de la valeur maximale du rapport I/N . Elles fournissent des informations sur le temps pendant lequel un opérateur peut être gêné par des brouillages causés par un SAR avant que toute technique de limitation ou tout gain de traitement ne soit appliqué aux résultats. Le Tableau fournit

aussi des données correspondant à un seuil I/N de +10 dB, qui montrent comment certains traitements du radar susceptibles de limiter les effets des brouillages à des niveaux I/N supérieurs à -6 dB influencent les résultats. Tout comme le rapport I/N de -6 dB, la valeur de +10 dB n'est pas significative en soi; elle a simplement été choisie pour montrer que lorsque le radar est capable de supporter des niveaux de brouillage supérieurs, le nombre et la durée des phénomènes de brouillage varient.

Aux Etats-Unis, les radars météorologiques terrestres exploitant cette bande sont habituellement utilisés pour la veille atmosphérique et d'autres applications capables de supporter effectivement quelques phases de brouillage par impulsions. Dans d'autres pays, les exigences officielles de protection concernant les radars exploitant la bande 9 300-9 500 MHz peuvent toutefois être plus strictes.

TABLEAU 18
Résultats des simulations en balayage volumique

Vitesse de rotation de 5°/s							
Localisation du radar	I/N max. (dB)	Durée maximale au-dessus de $I/N = -6$ dB (s)	Durée moyenne au-dessus de $I/N = -6$ dB (s)	Nombre de cas où $I/N > -6$ dB sur une période de 23 jours	Durée maximale au-dessus de $I/N = +10$ dB (s)	Durée moyenne au-dessus de $I/N = +10$ dB (s)	Nombre de cas où $I/N > +10$ dB sur une période de 23 jours
Latitude basse	23,8	0,55	0,34	225	0,40	0,22	139
Latitude moyenne	27,3	2,50	0,38	366	0,35	0,22	231
Latitude élevée	24,6	0,55	0,34	488	0,40	0,22	371
Vitesse de rotation de 20°/s							
Latitude basse	23,9	0,15	0,09	853	0,10	0,06	523
Latitude moyenne	24,2	2,5	0,10	1321	0,10	0,06	836
Latitude élevée	24,2	0,15	0,09	2205	0,01	0,06	1330

Les résultats du Tableau 18 montrent que le radar météorologique terrestre peut être confronté à des valeurs maximales de I/N de l'ordre de 24 à 27 dB en mode balayage volumique classique. On a également lancé un nombre limité de simulations pour confirmer que le nombre de cas de brouillage était directement proportionnel au nombre de SAR utilisés en simulation. Les résultats ont montré qu'avec un seul SAR le nombre de cas de brouillage était réduit d'un facteur 4, mais que les valeurs et durées maximales étaient à peu près identiques.

5.4.1.6 Résultats du balayage volumique sectoriel du radar

Le Tableau 19 présente les résultats des simulations en mode balayage volumique sectoriel. Dans ce mode, les caractéristiques du récepteur radar restent identiques à celles du mode étudié précédemment. L'antenne décrit des mouvements tels que spécifiés à la Fig. 11. Seule la latitude de 45° a été simulée.

TABLEAU 19

Résultats des simulations en balayage sectoriel (latitude 45°)

Azimuts de départ/fin du secteur de 60°	Vitesse de rotation de 5°/s			Vitesse de rotation de 20°/s		
	<i>I/N</i> max. (dB)	Durée maximale au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	Durée moyenne au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	<i>I/N</i> max. (dB)	Durée maximale au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	Durée moyenne au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)
Secteur nord (330° à 60°)	24,0	2,50	0,36	28,3	2,50	0,10
Secteur est (60° à 120°)	23,6	2,50	0,37	24,3	2,50	0,10
Secteur sud-est (105° à 165°)	24,1	2,50	0,38	23,0	2,50	0,10

5.4.1.7 Résultats du mode spotlight du radar

Le Tableau 20 présente les résultats des simulations en mode spotlight. Les radars météorologiques terrestres utilisant la bande 9 300-9 500 MHz pour la veille atmosphérique fonctionnent périodiquement en mode spotlight, ce qui leur permet d'éclairer un endroit précis de l'atmosphère pendant une longue période de temps. Dans ce mode, l'élévation et l'azimut de l'antenne restent constants. Pour les simulations, le radar a été placé à une latitude de 45°, l'antenne restant fixe en azimut et en élévation. Les azimuts 0° N et 90° E ainsi que les élévations 0,5, 20 et 45° ont été étudiés.

TABLEAU 20

Résultat des simulations en mode spotlight (latitude 45° uniquement)

	Azimut 0° (N)			Azimut 90° (E)		
	<i>I/N</i> max. (dB)	Durée maximale au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	Durée moyenne au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	<i>I/N</i> max. (dB)	Durée maximale au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)	Durée moyenne au-dessus de <i>I/N</i> = -6 dB (s)
Elévation de l'antenne: 0,5°	17,0	23,0	14,0	18,0	13,55	7,14
Elévation de l'antenne: 20°	24,6	11,75	6,98	15,6	5,65	2,83
Elévation de l'antenne: 45°	24,5	4,75	3,36	3,3	2,5	1,86

5.4.1.8 Conclusion de l'analyse préliminaire

Sans une meilleure connaissance des capacités d'un radar météorologique à limiter les effets des brouillages causés par un SAR, il est difficile de conclure sur la compatibilité entre le SETS et les radars météorologiques terrestres. Dans le cadre de cette étude, des seuils I/N génériques de -6 dB et $+10$ dB ont été retenus afin de déterminer les durées pendant lesquelles le SAR pouvait éventuellement influencer le fonctionnement du radar. Ces valeurs de seuil ne sont probablement pas correctes; le seuil devrait en effet se situer entre 0 dB et $+40$ dB. Le rapport I/N maximal obtenu pendant les simulations a été de $+28,3$ dB, la plupart des valeurs maximales se situant autour de $+24$ dB. A noter que ces résultats concernent les brouillages pulsés alors que les seuils I/N typiques de -6 dB et $+10$ dB des radars météorologiques ne s'appliquent normalement qu'aux brouillages de type à onde entretenue ou assimilables à du bruit. La différence de durée de brouillage entre une utilisation avec un critère de protection de -6 dB et un critère de $+10$ dB est minime. L'utilisation d'un critère de $+10$ dB réduit les durées de brouillage d'environ 30% à 36% . Le critère le plus élevé de protection agit surtout sur le nombre de cas de brouillage. Par conséquent, pour réduire de façon importante les durées et le nombre des cas de brouillage, les radars météorologiques doivent pouvoir supporter des niveaux de rapport I/N supérieurs à $+10$ dB.

5.4.2 Autres facteurs de limitation des brouillages dans les radars météorologiques

Les résultats de l'analyse préliminaire indiquent que la compatibilité entre le SETS et les radars météorologiques terrestres peut poser problème si l'on considère que les radars météorologiques ne sont pas en mesure de limiter les brouillages pulsés. Cette section étudie plus avant la capacité des radars météorologiques à fonctionner en présence de signaux de brouillage pulsés venant du SETS (actif). L'analyse préliminaire ne prenait en compte ni la limitation des brouillages pulsés résultant du traitement classique des signaux dans les radars météorologiques, ni les caractéristiques d'exploitation du SETS. La présente section se donne donc pour objet d'étudier ces facteurs en détail. Des techniques de limitation intentionnelle pourraient être mises en œuvre, mais elles ne sont pas envisagées ici car les radars météorologiques ne les utilisent habituellement pas. Elles entraînent en effet une dégradation de la qualité de fonctionnement.

5.4.2.1 Périodes de fonctionnement du SETS (actif)

Du fait de la puissance nécessaire au fonctionnement du SAR, le SETS est conçu pour ne fonctionner que 20% du temps au maximum. Il convient de ne pas confondre ce coefficient d'utilisation en exploitation – pourcentage du temps pendant lequel le SAR collecte des données – et le rapport cyclique des impulsions. Sur une année ($8\,766$ h), le SAR ne fonctionne généralement que pendant $1\,753$ h au maximum, ce qui réduit considérablement le nombre de cas de brouillage. Lorsque le SAR est en fonctionnement, les durées pendant lesquelles les niveaux maximums de brouillage sont atteints figurent dans les Tableaux 18, 19 et 20. Etant donné que les simulations préliminaires prenaient comme hypothèse un fonctionnement continu du SAR sur toute la durée de simulation, les nombres de cas de brouillage peuvent être divisés par 5.

5.4.2.2 Considérations sur le rejet à la fréquence d'accord

Lors de l'analyse préliminaire, pour obtenir rapidement les premiers résultats, seule la situation de partage dans le cas le plus défavorable a été envisagée. Aussi a-t-on choisi une largeur de bande FI de 10 MHz pour le radar météorologique, d'où une valeur de rejet à la fréquence d'accord (OTR) de 0 dB. Une étude plus poussée a montré que la plupart des radars météorologiques fonctionnent classiquement avec une largeur de bande FI inférieure à 10 MHz. En réalité, la plupart des radars météorologiques ont une largeur de bande FI comprise entre 1 et 4 MHz, ce qui améliore la situation de partage. Si l'on considère une largeur d'impulsion SAR comprise entre 1 et 10 μ s et une largeur de bande FI de 4 MHz, les valeurs du rejet à la fréquence d'accord sont comprises entre $14,5$ et $4,5$ dB. Cependant, cette largeur de bande plus étroite entraîne une augmentation de la sensibilité

du radar: son plancher de bruit est diminué de 4 dB. Par conséquent, on peut obtenir grâce à l'OTR une amélioration de 10,5 dB à 0,5 dB par rapport à la situation de partage étudiée dans l'analyse préliminaire. De même, pour une largeur de bande FI du radar météorologique de 1 MHz, en tenant compte de l'OTR et de la diminution du plancher de bruit du radar, l'amélioration du partage est comprise entre 6,5 et 15,5 dB. Le Tableau 21 présente une synthèse des largeurs de bande FI, des niveaux de bruit du récepteur et des valeurs d'OTR correspondantes.

TABLEAU 21

Valeurs de rejet à la fréquence d'accord

Largeur de bande du chirp SAR (MHz)	Largeur d'impulsion du SAR (μ s)	Largeur de bande FI du radar météorologique (MHz)	OTR (dB)	Plancher de bruit du radar (dBm)
450 MHz	1,0	1 MHz	25,5	-110
	5,0		19,5	
	10,0		16,5	
	1,0	4 MHz	14,5	-104
	5,0		7,5	
	10,0		4,5	
	1,0	10 MHz	6,5	-100
	5,0		0,0	
	10,0		0,0	

5.4.2.3 Calcul des niveaux I/N pour des impulsions de brouillage

Les radars météorologiques effectuent des traitements sur les signaux de retour pour mesurer la configuration des précipitations et des vents. Pour ce faire, le radar collecte et traite des produits de données bruts: réflectivité, vitesse radiale moyenne et largeur de spectre. Plus simplement, le radar moyenne un échantillon de signaux de retour pour calculer les estimations nécessaires à la création des produits météorologiques. La fonction de moyennage permet au radar météorologique de traiter des niveaux de brouillage de type pulsé supérieurs à des niveaux de brouillage de type à onde entretenu ou assimilables à du bruit.

Pour produire une estimation d'une case distance, les radars météorologiques traitent plusieurs signaux de retour situés dans la case. Les multiples signaux forment un échantillon, de taille paramétrable par l'utilisateur, moyennés pour produire l'estimation. Or les systèmes SETS et les radars météorologiques proposés ici fonctionnent à des fréquences de répétition d'impulsions nettement différentes. Par conséquent, pour une petite taille d'échantillon, la probabilité qu'un échantillon donné contienne plus d'une impulsion de brouillage est faible. L'approche consiste à déterminer le niveau maximum d'une impulsion unique n'entraînant pas de dégradation de la moyenne de l'échantillon au-delà des objectifs de qualité des produits de données bruts du radar.

Pour déterminer un critère de protection, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des éléments suivants: niveau de bruit du récepteur du radar, valeur minimale du rapport signal sur bruit (S/N) utilisée pour les traitements et précision requise des produits de données bruts du radar (réflectivité, vitesse radiale moyenne et largeur de spectre). De nombreux radars météorologiques fonctionnant dans la bande qui nous intéresse, il est nécessaire de faire quelques hypothèses. D'une part, le radar utilisé pour la présente étude possède un plancher de bruit du récepteur de -110 dBm à

la plus étroite largeur de bande FI. D'autre part, la précision des produits de données bruts requise pour les radars fonctionnant dans cette bande n'est pas facile à obtenir. On peut cependant supposer que les valeurs de précision spécifiées à l'Annexe 3 de la Recommandation UIT-R M.1464 sont applicables. Enfin, le rapport S/N minimal est probablement le paramètre le plus difficile à fixer dès lors qu'on ne fait pas référence à un radar précis. Les radars à basse fréquence sont généralement utilisés pour la détection longue portée. On utilise donc des rapports S/N de 0 à -3 dB pour les radars fonctionnant dans la bande 2 700-2 900 MHz.

Par ailleurs, les radars météorologiques fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz sont généralement utilisés pour des détections de plus courte portée et de meilleure résolution; ils peuvent fonctionner à des valeurs de rapport S/N minimal plus élevées. Dans le cadre de la présente analyse, on prend l'hypothèse d'un rapport S/N de +3 dB.

Comme indiqué à l'Annexe 3 de la Recommandation UIT-R M.1464, la limite maximale du biais de réflectivité pour un radar météorologique est en pratique de 1 dB, ce qui se traduit par un rapport brouillage sur signal minimum (I/S) de 0,26, soit un rapport de puissance de 1,26. On considère une taille d'échantillon de réflectivité de 25. Il serait possible de prendre une taille d'échantillon supérieure à 25, ce qui réduirait les effets de chaque impulsion unitaire mais augmenterait aussi la probabilité qu'une deuxième impulsion de brouillage apparaisse dans le même échantillon:

$$\frac{25 * S_{min} + P_i}{25 * S_{min}} = 1,26 \quad \text{ou} \quad P_i = 6,5 S_{min} \quad (1)$$

où:

S_{min} : niveau minimal de signal reçu

P_i : puissance de crête du signal de brouillage pulsé

d'où:

$$P_i = S_{min} + 8,2 \text{ dB} \quad (2)$$

Comme indiqué plus haut, on a pris pour les radars fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz l'hypothèse d'un rapport signal sur bruit minimal de 3 dB; on obtient donc un rapport maximal brouillage sur bruit de 11,2 dB pour les signaux SETS pulsés.

5.4.2.4 Réduction du rapport cyclique des impulsions SETS modulées linéairement en fréquence dans le filtre FI du radar brouillé

Les résultats des essais montrent la capacité de l'étage de filtrage FI d'un récepteur brouillé à réduire efficacement la largeur d'impulsion d'un signal modulé linéairement en fréquence. Les essais préliminaires indiquent qu'en fonction du taux de fluctuation du signal brouilleur, sa largeur d'impulsion peut être réduite comme suit:

Pour des taux de fluctuation faibles ($\sim < 5 \text{ MHz}/\mu\text{s}$), le facteur de réduction de la largeur d'impulsion se calcule ainsi:

$$C \approx \frac{B_{IF}}{B_c} \quad (3)$$

où:

B_{IF} : largeur de bande FI du récepteur brouillé

B_c : largeur de bande du chirp du signal brouilleur

Pour des taux de fluctuation élevés ($\sim > 40$ MHz/ μ s), le facteur de réduction de la largeur d'impulsion se calcule ainsi:

$$C \approx \frac{2 * B_{IF}}{B_c} \quad (4)$$

S'agissant du SAR3 ($B_c = 450$ MHz) utilisé dans les simulations précédentes, on peut donc prévoir une réduction minimale du rapport cyclique. Le Tableau 22 présente les facteurs de réduction de rapport cyclique pour un taux de fluctuation bas et pour un taux de fluctuation élevé.

TABLEAU 22

Facteur de réduction du rapport cyclique (pour $B_c = 450$ MHz)

B_{IF} (MHz)	Faible taux de fluctuation	Taux de fluctuation élevé
1,0	0,0022	0,0044
4,0	0,0089	0,018
10,0	0,022	0,044

La section 5.4.2.3 indiquait que pour calculer les produits de données bruts, les radars météorologiques moyennent un jeu d'échantillon d'impulsions observées à l'intérieur d'une case distance. Les jeux d'échantillons des cases distance étant moyennés, il est difficile d'estimer l'influence de la réduction du rapport cyclique. Etant donné que la case distance reçoit une puissance plus faible, il est possible cependant qu'une réduction du rapport cyclique du signal brouilleur se traduise directement par une réduction de la sensibilité aux brouillages. Dans ce cas, les facteurs de réduction du rapport cyclique compris entre 0,0022 et 0,044 entraîneraient un gain de traitement par limitation des brouillages de 26,6 à 13,6 dB respectivement. Il importe toutefois de noter que ces valeurs sont probablement trop optimistes et qu'une étude complémentaire s'impose.

5.4.2.5 Résumé – Partage entre le SETS et les radars météorologiques

On a exposé dans la seconde partie de l'analyse (§ 5.4.2.1 à 5.4.2.4) différentes techniques permettant d'améliorer les résultats des études préliminaires concernant le partage entre le SETS (actif) émettant des signaux à impulsions et les radars météorologiques. Le partage peut être amélioré par les techniques suivantes: élévation du critère de protection I/N contre les impulsions de brouillage SETS dans les radars météorologiques, prise en compte du rejet à la fréquence d'accord dans le cas d'une largeur de bande FI plus représentative des radars météorologiques, réduction du rapport cyclique du SETS du fait de la largeur de bande FI plus étroite des radars météorologiques. Le Tableau 23 présente une synthèse de ces améliorations.

TABLEAU 23

**Synthèse des résultats concernant les techniques complémentaires
de limitations des brouillages**

Description	Valeur utilisée dans les études préliminaires	Valeur mise à jour	Commentaires
Critère de protection I/N (dB)	-6 et +10	Au moins +11,2	Fonction du nombre d'impulsions moyennées par échantillon pour une case distance
Rejet à la fréquence d'accord (dB)	0	De 0,5 à 15,5	Fonction de la largeur de bande FI du radar et de la largeur des impulsions SAR
Réduction du rapport cyclique du fait que le filtre FI est plus étroit que la largeur de bande du chirp	Non étudié	Valeur réelle non connue – amélioration possible entre 13,6 et 26,6 dB	Nécessité d'une étude complémentaire avant de pouvoir appliquer une valeur précise aux mesures

Il est possible d'appliquer aux résultats des simulations préliminaires les données du Tableau 23 de façon à déterminer des durées de brouillage des radars météorologiques plus représentatives. Malheureusement, du fait de la variabilité de certaines valeurs du Tableau due aux nombreux paramètres du SAR et des radars météorologiques, il n'est pas possible de déterminer un seuil de brouillage unique. Au minimum, le radar météorologique devrait pouvoir fonctionner en présence d'impulsions de brouillage SETS (actif) présentant un rapport I/N de 11,2 dB. En tenant compte des nouvelles valeurs de l'OTR, la limitation des brouillages pourrait être améliorée de sorte que le radar supporte une augmentation supplémentaire de I/N de 0,5 à 15,5 dB, soit un rapport I/N acceptable maximum compris entre 11,7 et 26,7 dB. La capacité des radars météorologiques à limiter les brouillages en réduisant le rapport cyclique (étudiée en 5.4.2.4) restant incertaine, des valeurs précises ne peuvent être appliquées aux résultats de la présente étude. Il est simplement fait mention que la réduction du rapport cyclique devrait encore améliorer la situation de partage.

5.4.3 Conclusion – Réévaluation des données de l'analyse préliminaire

L'analyse préliminaire a fourni pour résultat les durées pendant lesquelles les brouillages dépassaient les seuils -6 dB et +10 dB du rapport I/N . Cependant, à la lumière de l'analyse complémentaire et de données sur le traitement du signal et sur les caractéristiques d'exploitation, les valeurs maximales de rapport I/N des signaux pulsés venant du SETS (actif) que les radars météorologiques fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz pourraient supporter se situent entre 11,7 et 26,7 dB, voire au-delà. Les résultats des simulations ont donc été retravaillés avec les seuils suivants: +19,2 dB (seuil médian entre 11,7 et 26,7 dB) et +26,7 dB (valeur haute de la fourchette). Les résultats correspondant au seuil de 11,7 dB sont proches des résultats présentés précédemment pour $I/N = +10$ dB. Le lecteur doit garder à l'esprit que ces résultats n'intègrent pas les effets de réduction du rapport cyclique étudiés au § 5.4.2.4 ou d'autres techniques de limitation des brouillages mises en œuvre au niveau du radar.

Les résultats, synthétisés dans le Tableau 24, montrent que, même si les radars météorologiques terrestres classiques subissent des niveaux de brouillage pulsé venant du SETS (actif) de l'ordre de 24 à 28 dB par rapport à leur plancher de bruit, la dégradation de leur qualité de fonctionnement n'est pas significative. Le rejet à la fréquence d'accord et le traitement des données dans le radar, qui n'avaient pas été pris en compte dans l'analyse préliminaire, rendent le partage entre les radars météorologiques terrestres du service de radiorepérage et le SETS (actif) réalisable. A noter que ces résultats ne s'appliquent qu'au partage entre le SETS (actif) et les radars météorologiques terrestres fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz et ne peuvent être étendus aux autres systèmes de brouillage ou aux autres bandes. D'autres facteurs étudiés dans le présent document mais non pris en compte sont aussi susceptibles d'améliorer la situation de partage.

TABLEAU 24

Résultats des simulations tenant compte de la limitation des brouillages

Vitesse de rotation de 5°/s									
		Seuil $I/N = +19,2$ dB				Seuil $I/N = +26,7$ dB			
Localisation du radar	I/N max. (dB)	Plus longue durée au-dessus du seuil (s)	Durée moyenne au-dessus du seuil (s)	Nombre de violations du seuil sur 23 jours ⁽¹⁾	Secteur en azimuth corrompu moyen (degrés)	Plus longue durée au-dessus du seuil (s)	Durée moyenne au-dessus du seuil (s)	Nombre de violations du seuil sur 23 jours ⁽¹⁾	Secteur en azimuth corrompu moyen ⁽³⁾ (degrés)
Latitude basse	23,8	0,20	0,12	8	0,6	0	0	0	0
Latitude moyenne	27,3	0,25	0,13	13	0,65	0,05	0,05	1	0,25
Latitude élevée	24,6	0,25	0,12	19	0,6	0	0	0	0
Vitesse de rotation de 20°/s									
		Seuil $I/N = +19,2$ dB				Seuil $I/N = +26,7$ dB			
Latitude basse	23,9	0,10	0,05 ⁽²⁾	97	1	0	0	0	0
Latitude moyenne	24,2	0,05	0,05 ⁽²⁾	31	1	0	0	0	0
Latitude élevée	24,2	0,05	0,05 ⁽²⁾	42	1	0	0	0	0

⁽¹⁾ Tient compte du fait que le SAR a un coefficient d'utilisation en exploitation maximum de 20%.

⁽²⁾ L'incrément temporel de simulation était de 0,05 s. Les durées de 0,05 s figurant au Tableau 24 sont donc en réalité éventuellement plus courte.

⁽³⁾ Les radars météorologiques classiques ont une résolution radiale de l'ordre de 1° environ. Un azimuth corrompu inférieur à 1° entraîne la corruption d'une radiale au minimum, éventuellement de deux si le brouillage intervient à la frontière entre deux radiales. Un petit nombre de radars météorologiques ont une résolution radiale de quelques dixièmes de degré.

5.5 Analyse – Etude N° 5: Etudes de compatibilité entre le SETS (actif) et le service fixe dans la bande 9 800-10 000 MHz

5.5.1 Démarche de l'analyse

Un modèle de simulation informatique a été utilisé pour déterminer d'une part les statistiques de brouillage sur des récepteurs du service fixe causés par l'émetteur d'un SAR spatioporté que l'on se propose d'étudier, et d'autre part les statistiques de brouillage causés par les émetteurs du service fixe sur le récepteur du SAR.

5.5.1.1 Brouillages causés par le service fixe point à point (SF P-P) sur le récepteur du SAR3

Il a été développé un modèle de simulation informatique qui calcule, en fonction du temps, le niveau de puissance des brouillages dans le récepteur d'un capteur SAR actif spatioporté causés par des émetteurs du service fixe. Ce modèle de simulation a permis de collecter des statistiques de brouillage: d'une part, la probabilité qu'un niveau de puissance de brouillage soit dépassé, d'autre part, le niveau de puissance de brouillage maximal atteint au niveau du récepteur SAR.

Toutes les simulations ont été effectuées sur une période de 10 jours, par incrément temporel d'une seconde. A chaque incrément temporel, la distance entre le récepteur du SAR et les émetteurs du service fixe a été calculée à partir des paramètres orbitaux du SAR et de la localisation des stations du service fixe. Pour l'étude, l'antenne du SAR était dirigée à 44° en oblique par rapport au nadir dans la direction latérale. La puissance de brouillage au niveau du récepteur du SAR a été calculée à partir de la puissance de l'émetteur, de l'affaiblissement sur le trajet et de la discrimination de l'antenne. L'étude prenait pour hypothèse un fonctionnement copolaire cofréquence. Les affaiblissements d'insertion n'ont pas été pris en compte. Par hypothèse, les stations SF P-P transmettent en continu à moyenne puissance.

Les paramètres du SETS (actif) et des stations du SF P-P utilisés pour l'étude figurent respectivement au § 2 et au § 4 du présent Rapport.

Deux modèles de déploiement des stations du service fixe ont été utilisés pour les simulations:

- distribution aléatoire mondiale de 1 536 stations SF P-P;
- 1 536 stations SF P-P réparties dans les pays visés au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications.

Le critère de protection du SAR pour cette étude était de $I/N = -6$ dB. La puissance de bruit moyenne dans le récepteur du SAR est donnée par la formule suivante:

$$P_N = k T_0 B \quad (\text{W})$$

où:

k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Joule/°K)

T_0 : température de bruit du récepteur du SAR3 (600 K)

B : largeur de bande FI du récepteur du SAR3 ($512 \cdot 10^6$ Hz)

d'où:

$$P_N: -113,73 \text{ dBW}$$

Pour satisfaire au critère de protection du SAR, la puissance des brouillages à l'entrée du récepteur SAR doit être inférieure à $-119,73$ dB(W/512 MHz) pour 99% du temps.

5.5.1.1.1 Simulation pour un déploiement aléatoire mondial

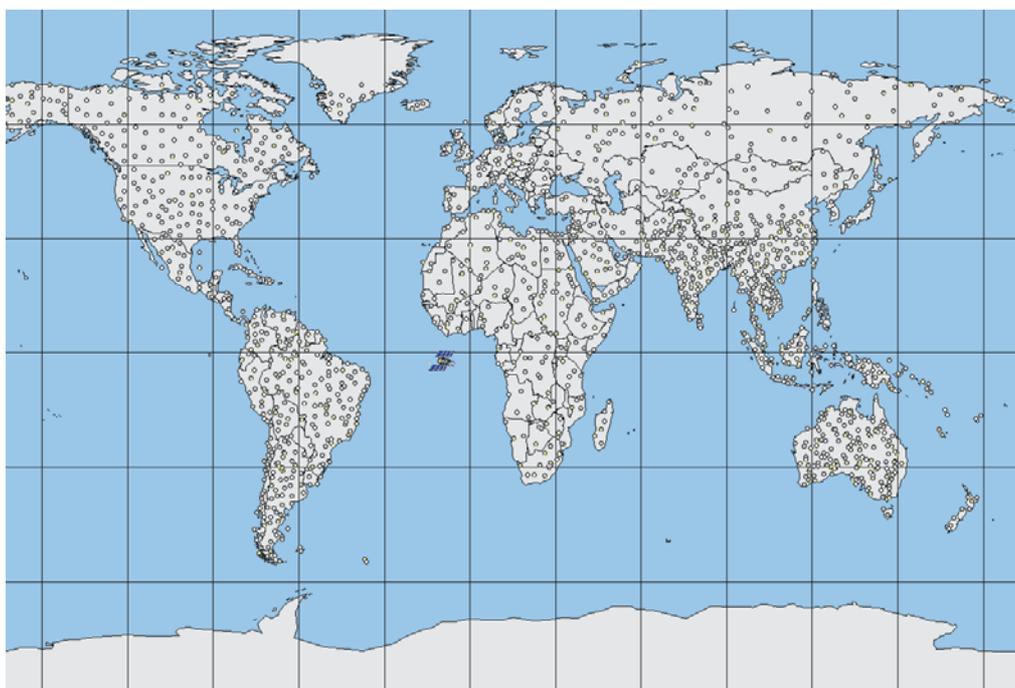
Un total de 1 536 stations SF P-P ont été réparties aléatoirement dans les limites de -55° et $+70^{\circ}$ en latitude et $\pm 180^{\circ}$ en longitude. Pour que toutes les stations soient situées sur terre, certaines localisations aléatoires ont été modifiées. Les paramètres des stations SF suivants ont été fixés initialement aux valeurs indiquées ci-dessous, et n'ont pas été modifiés pendant toute la durée des simulations:

- latitude de chaque station choisie aléatoirement entre -55° et $+70^{\circ}$;
- longitude de chaque station choisie aléatoirement entre -180° et $+180^{\circ}$;
- hauteur d'antenne de la station choisie aléatoirement entre 10 et 100 m;
- angle d'élévation du faisceau de transmission de l'antenne de la station choisi aléatoirement entre -5° et $+5^{\circ}$;
- azimut de l'antenne de la station choisi aléatoirement entre -180° et $+180^{\circ}$.

La répartition des stations SF P-P est représentée à la Fig. 12.

FIGURE 12

Localisations des stations du service fixe utilisées dans la simulation



Rap 2094-12

5.5.1.1.2 Simulation pour un déploiement conforme au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications

Les stations SF P-P ont été localisées dans les pays visés au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications. Le renvoi en bas de page stipule que:

5.477 *Catégorie de service différente:* dans les pays suivants: Algérie, Arabie saoudite, Bahreïn, Bangladesh, Brunéi Darussalam, Cameroun, Egypte, Emirats arabes unis, Erythrée, Ethiopie, Guyana, Inde, Indonésie, Iran (République islamique d'), Iraq, Jamaïque, Japon, Jordanie, Koweït, Liban, Libéria, Malaisie, Nigéria, Oman, Pakistan, Qatar, Rép. pop. dém. de Corée, Singapour, Somalie, Soudan, Trinité-et-Tobago et Yémen, l'attribution de la bande 9 800-10 000 MHz au service fixe est à titre primaire (voir le numéro **5.33**). (CMR-03)

La Fig. 13 montre les territoires de ces pays en noir.

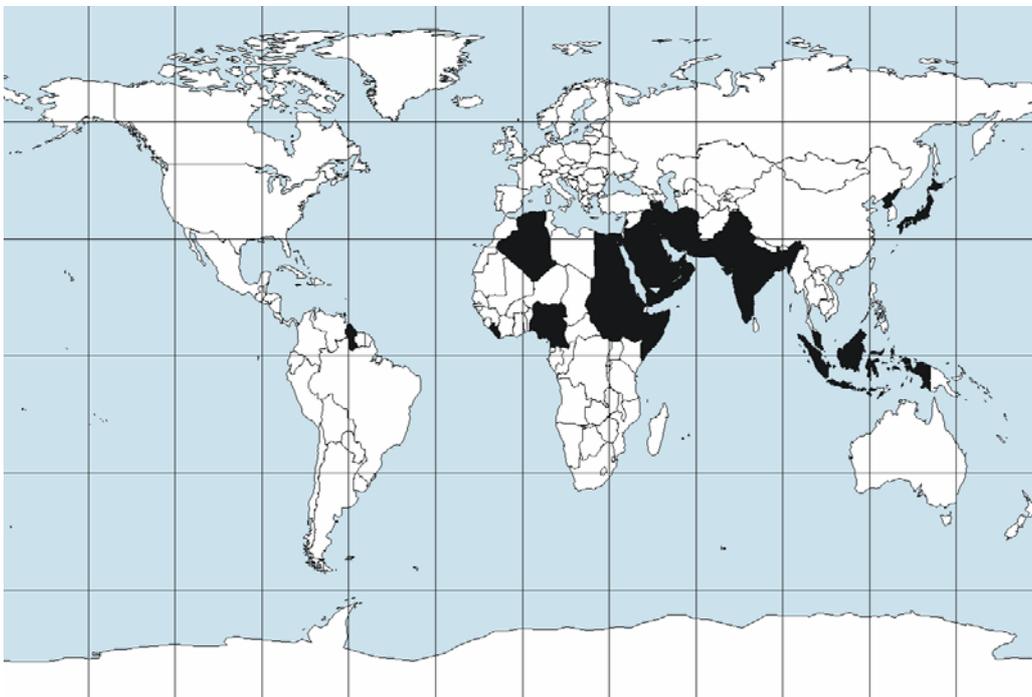
Les systèmes du SF sont majoritairement déployés dans des zones urbaines et suburbaines; peu de systèmes – voire aucun – se situent en zone rurale. Douze stations du SF P-P ont été placées aléatoirement dans chaque zone urbaine majeure des pays visés au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications. Pour simuler un cas réaliste, on a fait pointer les stations SF P-P l'une vers l'autre par paires. 128 zones urbaines ont été utilisées au total, soit 1 536 stations SF P-P.

Les paramètres des stations SF suivants ont été fixés initialement aux valeurs indiquées ci-dessous, et n'ont pas été modifiés pendant toute la durée des simulations:

- hauteur d'antenne de la station choisie aléatoirement entre 10 et 100 m,
- angle d'élévation du faisceau de transmission de l'antenne de la station choisi aléatoirement entre -5° et $+5^{\circ}$.

FIGURE 13

Pays visés au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications



Rap 2094-13

5.5.1.2 Brouillages causés par le SAR3 sur les récepteurs du SF P-P

Il a été développé un modèle de simulation informatique qui calcule, en fonction du temps, le niveau de puissance des brouillages au niveau d'un récepteur de service fixe causés par le capteur actif spatialement du SAR3. Ce modèle de simulation a permis de collecter des statistiques de brouillage: d'une part, la probabilité qu'un niveau de puissance de brouillage soit dépassé, d'autre part, le niveau de puissance de brouillage maximal atteint au niveau d'un récepteur de service fixe.

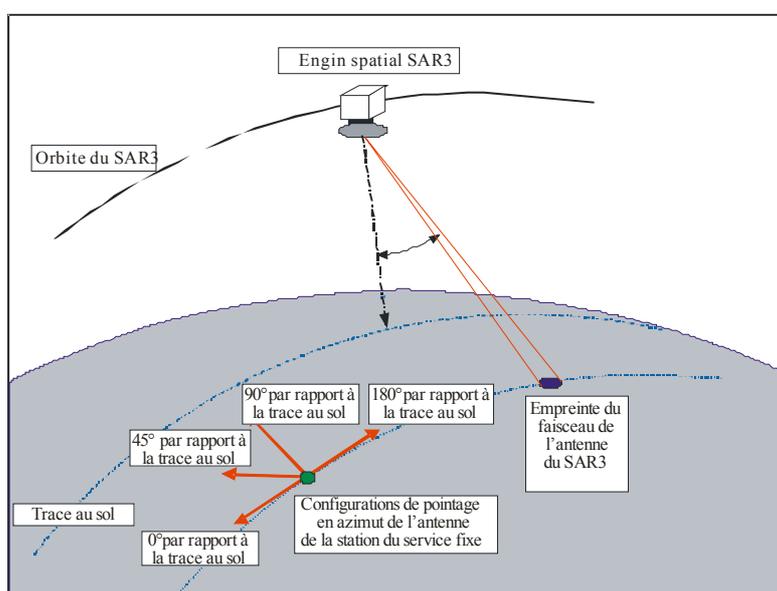
Toutes les simulations ont été effectuées sur une période de 60 jours, par incrément temporel de 0,5 s. A chaque incrément temporel, la distance entre l'émetteur du SAR et le récepteur du service fixe a été calculée à partir des paramètres orbitaux du SAR et de la localisation de la station du service fixe. La puissance de brouillage au niveau du récepteur du service fixe a été calculée à partir de la puissance de l'émetteur, de l'affaiblissement sur le trajet et de la discrimination de l'antenne. L'étude prenait pour hypothèse un fonctionnement copolaire cofréquence. Les affaiblissements d'insertion n'ont pas été pris en compte. Par hypothèse, le SAR3 transmet en continu à une puissance moyenne, calculée à partir de la valeur de crête de la puissance et du rapport cyclique des

impulsions. Les résultats présentés ci-après ne tiennent pas compte du coefficient d'utilisation du SAR de seulement 10% à 20% du trajet sur une orbite classique.

Les pays visés au numéro 5.447 du Règlement des radiocommunications sont situés approximativement entre les latitudes 15° S et 45° N. Dans le cadre de la présente étude, les configurations de pointage des antennes et les scénarios de déploiement choisis sont reproduits au Tableau 25. Les angles d'azimut de l'antenne de la station SF ont été fixés par rapport à l'azimut correspondant à l'angle d'inclinaison du SAR3, comme illustré à la Fig. 14. La hauteur de l'antenne de la station a été fixée à 20 m.

Les statistiques de brouillage ont été relevées pour cinq stations du SF P-P à différents azimuts et élévations des antennes, soit un total de 60 configurations.

FIGURE 14
Configurations de pointage en azimut des antennes du SF P-P



Rap 2094-14

TABLEAU 25

Paramètres de configuration des stations du SF P-P (60 configurations au total)

Latitude de la station (degrés)	Longitude de la station (degrés)	Direction azimutale de l'antenne par rapport à l'angle d'inclinaison du SAR3 (degrés)	Angle d'élévation de l'antenne (degrés)
45	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
30	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
15	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
0	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
-15	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5

5.5.2 Résultats de l'analyse

5.5.2.1 Brouillages causés par le service fixe point à point (SF P-P) sur le récepteur du SAR3

Les résultats de l'analyse sont donnés pour les deux modèles de déploiement des stations du service fixe:

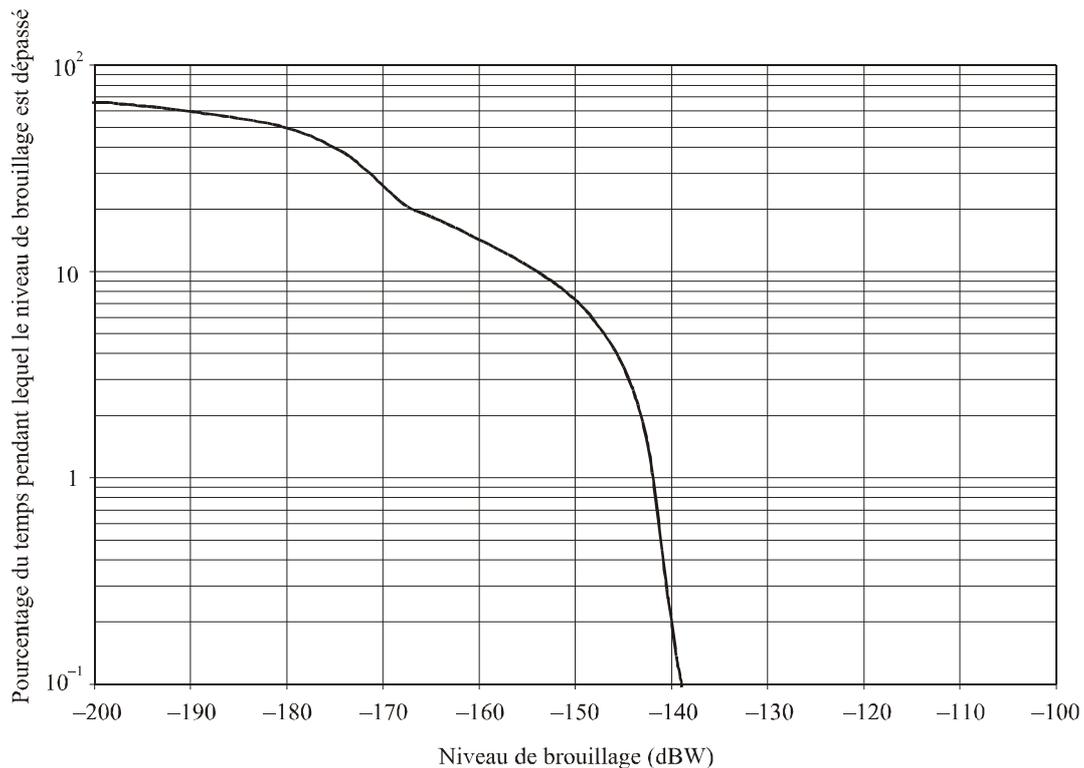
- distribution aléatoire mondiale de 1 536 stations SF P-P;
- 1 536 stations SF P-P réparties dans les pays visés au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications.

5.5.2.1.1 Déploiement mondial aléatoire

La Fig. 15 présente la courbe de la fonction de distribution cumulative (FDC) des brouillages venant des 1 536 stations du SF P-P au niveau du récepteur du SAR3. Les résultats sont exprimés en pourcentage de temps en fonction de la puissance du signal brouilleur reçu dans la largeur de bande FI de 512 MHz du récepteur du capteur spatioporté. On voit sur la courbe que la puissance du signal brouilleur est d'environ -142 dBW pour un critère de disponibilité des données de 99% (point à 1%). Le niveau maximum de brouillage reçu au niveau du récepteur du SAR3 est de -125,0 dBW, soit 5,3 dB au-dessous du critère de protection du SAR.

FIGURE 15

FDC des brouillages dus à 1 536 stations du SF P-P réparties aléatoirement sur le globe

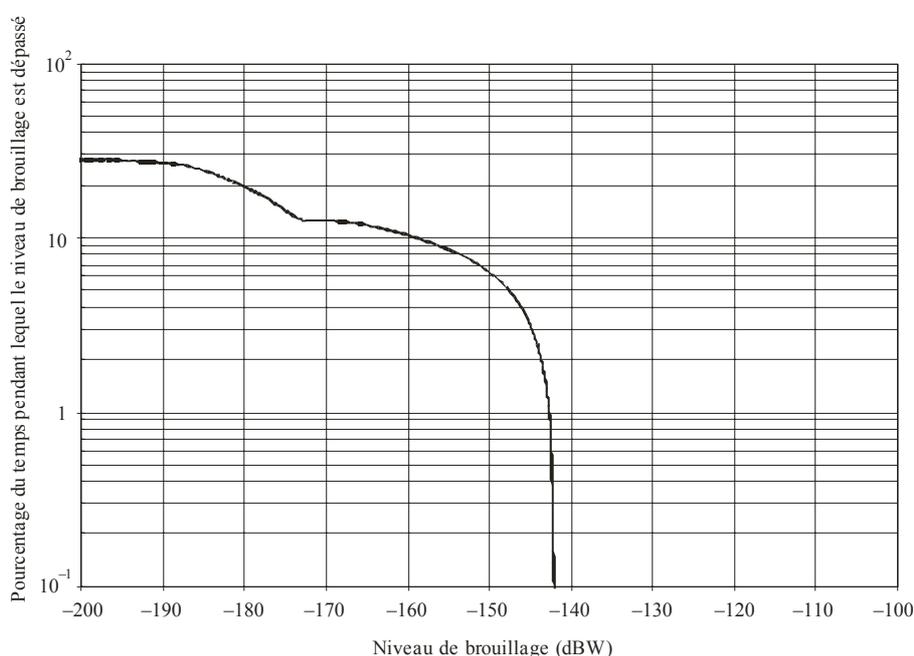


5.5.2.1.2 Simulation pour un déploiement conforme au numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications

La Fig. 16 montre la courbe FDC des brouillages dans le récepteur du SAR3 causés par 1 536 stations du SF P-P réparties dans 128 centres urbains des pays visés par le numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications. Les résultats sont exprimés en pourcentage de temps en fonction de la puissance de signal brouilleur reçu dans la largeur de bande FI de 512 MHz du récepteur du capteur spatioporté. On voit sur la courbe que la puissance du signal brouilleur est d'environ -143 dBW pour un critère de disponibilité des données de 99% (point à 1%). Le niveau maximum de brouillage dans le récepteur du SAR3 est de $-125,17$ dBW, soit 5,4 dB au-dessous du critère de protection du SAR.

FIGURE 16

FDC des brouillages dus à 1 536 stations du SF P-P réparties dans les pays visés par le numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications



Rap 2094-16

5.5.2.2 Brouillages causés par le SAR3 sur le SF P-P

5.5.2.2.1 Résultats de l'analyse – Effet de l'angle d'élévation de l'antenne des stations du SF

Pour chaque azimut et chaque latitude des stations du SF, la simulation a été effectuée pour les angles d'élévation suivants: -5° , 0° et 5° . Pour déterminer l'influence de l'angle d'élévation sur les niveaux de rapport I/N dans une station du SF, on a effectué une comparaison à partir des résultats des simulations reportés en Fig. 17.

La Fig. 17 fournit les résultats sous forme d'une fonction de distribution cumulative (FDC) des valeurs de I/N au niveau d'un récepteur du SF situé à la latitude 0° . Comme le montre la Figure, au point 0,1%, les niveaux I/N à l'élévation -5° sont approximativement inférieurs de 5 dB à ceux de l'élévation $+5^\circ$. De même, au point 0,1%, les niveaux I/N à l'élévation 0° sont approximativement inférieurs de 3 dB à ceux de l'élévation $+5^\circ$. Au point 1%, les courbes FDC pour les trois élévations d'antenne du SF convergent. Les simulations aux autres latitudes des stations SF envisagées dans l'étude ont donné des résultats similaires.

5.5.2.2.2 Résultats de l'analyse – Effet de l'azimut de l'antenne des stations du SF

Pour chaque latitude considérée, on a simulé les angles d'azimut des antennes du SF 0° , 45° , 90° et 180° , mesurés par rapport à l'angle d'inclinaison du SAR3. Pour déterminer l'influence de l'angle d'azimut sur les niveaux de rapport I/N dans une station du SF, on a effectué une comparaison à partir des résultats de simulation à deux latitudes représentatives, comme illustré aux Fig. 18 et 19.

La Fig. 18 présente les résultats sous forme d'une FDC des valeurs de I/N au niveau d'un récepteur du SF situé à la latitude 0° ; les résultats pour la latitude 30° sont présentés de la même façon à la Fig. 19. Comme le montre la Fig. 18 (latitude 0°), les effets de la variation de l'azimut de l'antenne du SF sont minimales en termes de rapports I/N , toutes les valeurs au point $0,1\%$ étant séparées d'environ $0,5$ dB.

FIGURE 17

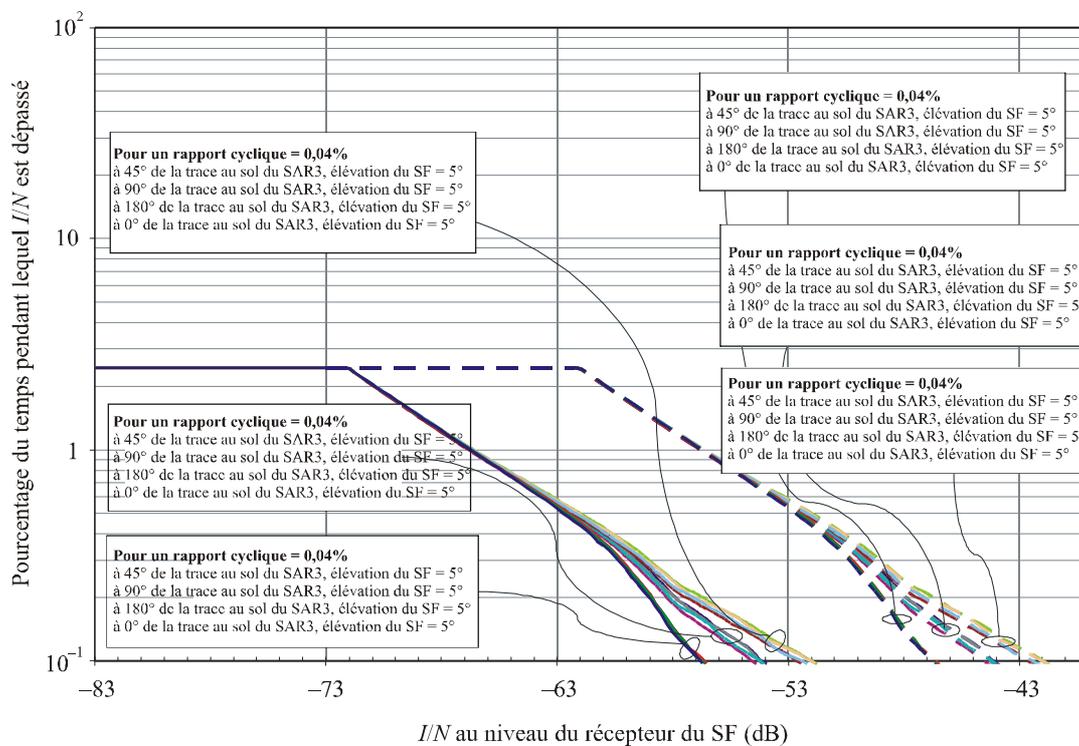
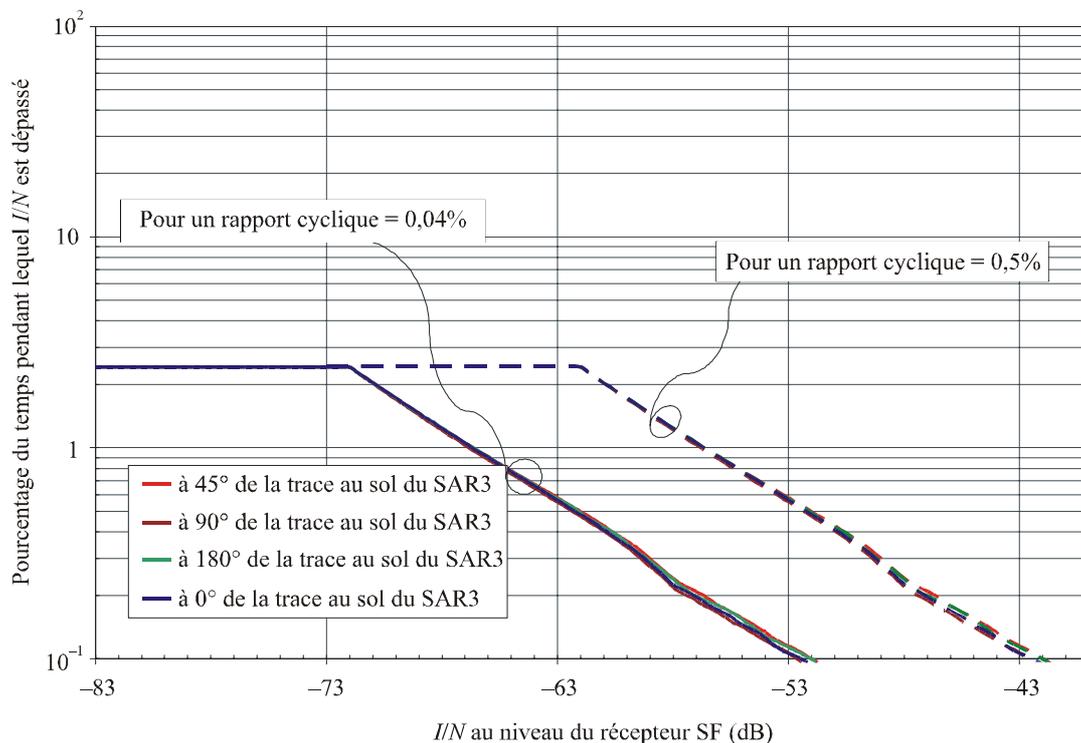
FDC des rapports I/N dans un récepteur du SF à la latitude 0° 

FIGURE 18

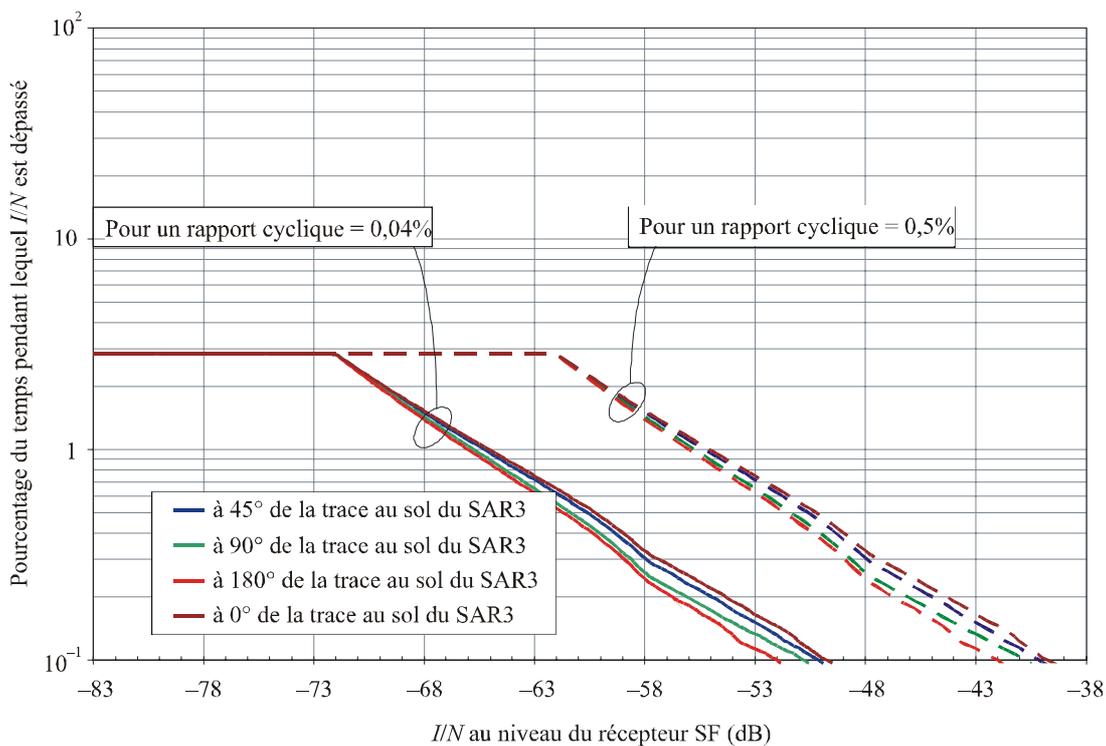
FDC des rapports I/N dans un récepteur du SF à la latitude 0°
avec une élévation d'antenne de 5°



Rap 2094-18

FIGURE 19

FDC des rapports I/N dans un récepteur du SF à la latitude 30°
avec une élévation d'antenne de 5°



Rap 2094-19

De même, sur la Fig. 19 (latitude 30°), les rapports I/N au point 0,1% sont séparés d'environ 2 dB. Au point 1%, les courbes FDC pour les quatre azimuts d'antenne du SF commencent à converger.

Les simulations aux autres latitudes des stations SF envisagées dans l'étude ont donné des résultats similaires.

5.5.2.2.3 Résultats de l'analyse – Effet de la latitude des stations du SF

Les paragraphes précédents ont montré que le cas le plus défavorable d'élévation de l'antenne du SF était 5° et que le cas le plus défavorable d'azimut par rapport à l'angle d'inclinaison du SAR spatioporté était soit 0° , soit 180° . Le présent paragraphe montre l'impact de la latitude d'une station du SF sur les rapports I/N au niveau du récepteur du SF. Les latitudes de -15° , 0° , 15° , 30° et 45° ont été simulées; la Fig. 20 présente les résultats des cas les plus défavorables. Le Tableau 26 présente une synthèse des résultats.

FIGURE 20

FDC des rapports I/N au niveau d'un récepteur du SF dans le cas le plus défavorable, pour une élévation de 5° et différentes latitudes

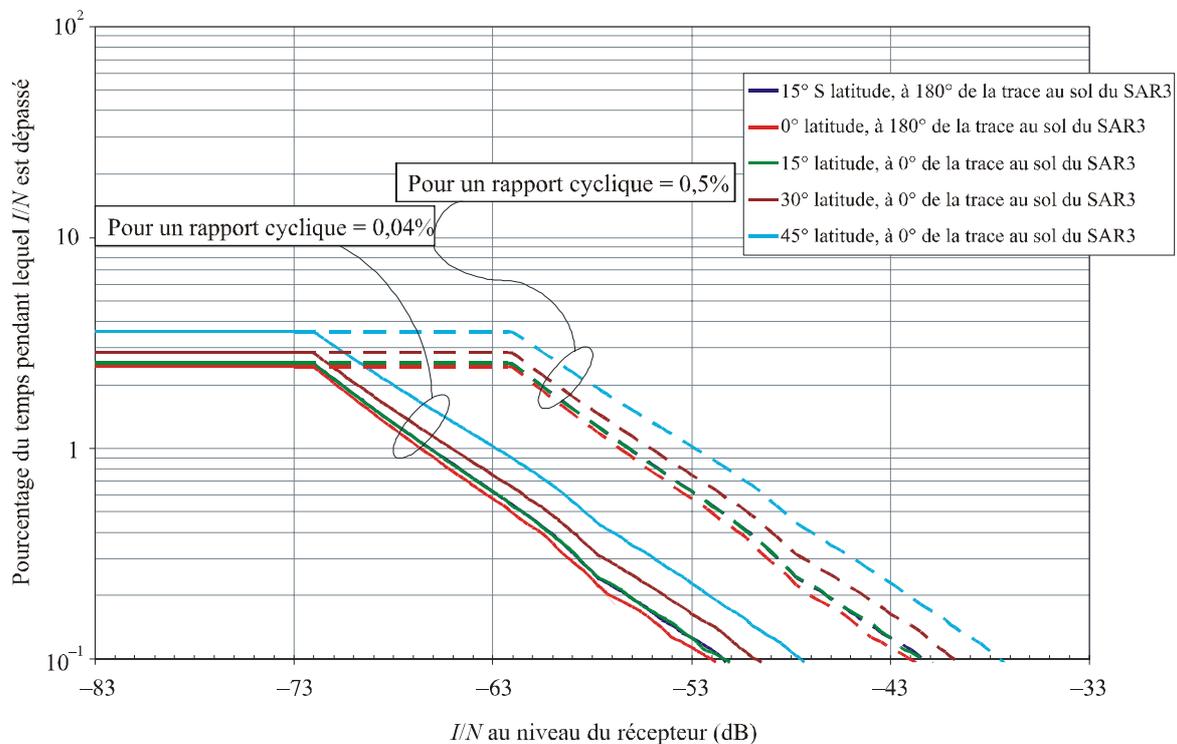


TABLEAU 26

Résumé des résultats concernant les brouillages dans les cas les plus défavorables

Latitude de la station SF (degrés)	Direction azimutale de l'antenne SF par rapport à l'angle d'inclinaison du SAR3 (degrés)	Angle d'élévation de l'antenne SF (degrés)	Rapport <i>I/N</i> au niveau du récepteur SF (dB)		Rapport <i>I/N</i> maximal au niveau du récepteur SF (dB) (rapport cyclique = 0,04% / rapport cyclique = 0,5%)	Pourcentage du temps pendant lequel <i>I/N</i> max est reçu (%)
			<i>I/N</i> dépassé pendant 1% du temps (rapport cyclique = 0,04% / rapport cyclique = 0,5%)	<i>I/N</i> dépassé pendant 0,1% du temps (rapport cyclique = 0,04% / rapport cyclique = 0,5%)		
-15	180	5	-66,0/-56,0	-51,5/-41,5	-11,5/-1,5	0,04
0	180	5	-66,5/-56,5	-52,0/-42,0	-12,0/-2,0	0,04
15	0	5	-66,0/-56,0	-51,5/-41,5	-12,0/-2,0	0,06
30	0	5	-65,0/-55,0	-49,8/-39,8	-11,2/-1,2	0,07
45	0	5	-63,0/-53,0	-47,5/-37,5	-11,2/-1,2	0,03

5.5.3 Conclusion de l'analyse

La présente étude consistait à évaluer la compatibilité entre un SAR spatioporté du SETS (actif) et des stations du SF P-P fonctionnant dans la bande 9 800-10 000 MHz. Les résultats des simulations montrent que:

- Les niveaux de brouillage maximums dans le SAR spatioporté se situent approximativement à 5,3 dB au-dessous du critère de brouillage du SAR à la fois pour une répartition aléatoire sur le globe de 1 536 stations du SF P-P et pour une répartition de 1 536 stations du SF P-P dans les pays visés par le numéro 5.477 du Règlement des radiocommunications.
- Les rapports *I/N* les plus défavorables au niveau des récepteurs du SF P-P dus à un SAR spatioporté se présentent lorsque l'antenne SF est dirigée selon une élévation de 5° et un azimut de 0° ou 180° par rapport à l'angle d'inclinaison du SAR3. Les rapports *I/N* varient en fonction de la latitude de la station SF. Le rapport le plus défavorable est de -53,0 dB, dépassé pendant 1% du temps dans le cas d'un rapport cyclique d'impulsion de 0,5% et pour une latitude de la station du SF de 45°.

6 Exemples de techniques de limitation des brouillages des SAR spatioportés**6.1 Exemple 1: Choix des caractéristiques d'émission des capteurs spatioportés actifs du SETS (actif) visant à limiter les brouillages pour une utilisation dans la largeur de bande de 500 MHz au voisinage de 9,6 GHz****6.1.1 Choix des caractéristiques du SETS (actif) visant à limiter les brouillages**

Le niveau de puissance moyen du signal brouilleur a été calculé en suivant la méthode fournie dans la Recommandation UIT-R RS.1280.

Le Tableau 1 permet de comparer les paramètres clés qui entrent en jeu dans le calcul des brouillages pour les SAR à l'étude.

La différence la plus frappante entre SAR1, SAR2 et SAR3 correspond aux plages des largeurs d'impulsion et des fréquences de répétition des impulsions (ci-après FRI). Le minimum et le

maximum des largeurs d'impulsion différent d'un facteur 8 sur le SAR2 et d'un facteur 10 sur le SAR3. S'agissant de la fréquence de répétition des impulsions, la valeur maximale du SAR2 correspond à environ 250% de la valeur minimale.

Pour prendre en compte ces particularités, on a estimé qu'il était justifié d'effectuer un calcul pour chaque extrême des plages de caractéristiques du SAR2. Dans les Tableaux 27 et 28, le SAR2 apparaît donc comme suit:

- SAR2a avec une largeur d'impulsion de 10 μ s, une FRI de 2 000 Hz et un gain d'antenne de 44,0 dBi.
- SAR2b avec une largeur d'impulsion de 80 μ s, une FRI de 4 500 Hz et un gain d'antenne de 46,0 dBi.

De cette façon, il est possible de couvrir la plage complète des brouillages, des valeurs minimales aux valeurs maximales.

TABLEAU 27

Exemple de réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite, obtenue en modifiant la durée d'impulsion du capteur et la largeur de bande des impulsions chirp pour le SAR2a

	Nouvelles valeurs des paramètres du SAR2a			Δ OTR (dB)	ΔP_{moy} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μ s)	FRI (Hz)	B_c (MHz)			
Radar 1 (poursuite)	10	2 000	400	-16,0	1,4 ⁽¹⁾	-14,6
Radar 2 (veille)	10	2 000	400	-19,0	-3,2	-22,3

⁽¹⁾ On a estimé qu'il était justifié d'utiliser la puissance du signal brouilleur moyenne pour le radar aéroporté et la puissance de crête du signal brouilleur pour le radar de poursuite.

TABLEAU 28

Exemple de réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite, obtenue en modifiant la durée d'impulsion du capteur et la largeur de bande des impulsions chirp pour le SAR2b

	Nouvelles valeurs des paramètres du SAR2b			Δ OTR (dB)	ΔP_{moy} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μ s)	FRI (Hz)	B_c (MHz)			
Radar 1 (poursuite)	80	4 500	400	-7,0	3,4 ⁽¹⁾	-3,6
Radar 2 (veille)	80	4 500	400	-19,0	11,3	-7,7

⁽¹⁾ On a estimé qu'il était justifié d'utiliser la puissance du signal brouilleur moyenne pour le radar aéroporté et la puissance de crête du signal brouilleur pour le radar de poursuite.

Le SAR3 possède une largeur d'impulsion comprise entre 1 et 10 μs , une FRI comprise entre 410 et 515 Hz, et un gain d'antenne compris entre 39,5 et 42,5 dB. Les Tableaux 29 et 30 présentent la réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite du SAR3, en considérant une FRI de 410 Hz et un gain d'antenne de 39,5 dB. De même, les calculs ont été faits pour les maxima des plages de largeur d'impulsion et de FRI du SAR3. Dans les Tableaux 29 et 30, le SAR3 apparaît donc comme suit:

- SAR3a avec une largeur d'impulsion de 1 μs , une FRI de 410 Hz et un gain d'antenne de 39,5 dBi.
- SAR3b avec une largeur d'impulsion de 10 μs , une FRI de 515 Hz et un gain d'antenne de 42,5 dBi.

Si les capteurs spatioportés décrits au Tableau 1 peuvent être utilisés avec des valeurs différentes de largeur d'impulsion et de largeur de bande du chirp, tel qu'indiqué aux Tableaux 27 et 28, il est alors possible d'obtenir une diminution importante du niveau de puissance du signal parasite. On trouve par exemple dans la Recommandation UIT-R RS.1280 deux exemples de radars fonctionnant dans la bande 9 500-9 800 MHz:

- un radar de poursuite ayant une largeur de bande FI de 1 MHz (radar 1),
- un radar de veille ayant une largeur de bande FI de 5 MHz (radar 2).

TABLEAU 29

Exemple de réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite, obtenue en modifiant la durée d'impulsion du capteur et la largeur de bande des impulsions chirp pour le SAR3a

	Nouvelles valeurs des paramètres du SAR3a			ΔOTR (dB)	ΔP_{moy} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	FRI (Hz)	B_c (MHz)			
Radar 1 (poursuite)	1	410	450	-26,5	5,7 ⁽¹⁾	-20,9
Radar 2 (veille)	1	410	450	-19,5	-15,9	-35,4

⁽¹⁾ On a estimé qu'il était justifié d'utiliser la puissance du signal brouilleur moyenne pour le radar aéroporté et la puissance de crête du signal brouilleur pour le radar de poursuite.

TABLEAU 30

Exemple de réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite, obtenue en modifiant la durée d'impulsion du capteur et la largeur de bande des impulsions chirp pour le SAR3b

	Nouvelles valeurs des paramètres du SAR3b			ΔOTR (dB)	ΔP_{moy} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	FRI (Hz)	B_c (MHz)			
Radar 1 (poursuite)	10	515	450	-16,5	8,7 ⁽¹⁾	-7,9
Radar 2 (veille)	10	515	450	-19,5	-1,9	-21,4

⁽¹⁾ On a estimé qu'il était justifié d'utiliser la puissance du signal brouilleur moyenne pour le radar aéroporté et la puissance de crête du signal brouilleur pour le radar de poursuite.

6.1.2 Conclusion de l'analyse

La présente Annexe décrit les caractéristiques techniques et opérationnelles de plusieurs SAR à large bande. On a calculé et démontré dans quelle mesure le choix de certaines caractéristiques permet de limiter les risques de brouillage sur les radars terrestres et aéroportés. Tous les cas envisagés pour les largeurs de bande des radars 1 et 2, respectivement 1 MHz et 5 MHz, montrent effectivement une réduction des brouillages causés par le SAR1.

6.2 Exemple 2: Technique de limitation des brouillages applicables à une antenne SAR3 à capteur actif spatioporté du SETS (actif) en vue d'une utilisation dans la largeur de bande de 500 MHz au voisinage de 9,6 MHz

Cette section présente une technique de limitation des brouillages de l'antenne SAR3 applicable aux études de compatibilité et de partage.

6.2.1 Caractéristiques techniques des antennes SAR3 à capteur actif spatioporté large bande

Le Tableau 1 présente les caractéristiques techniques du capteur spatioporté actif SAR3. Le diagramme de gain en azimut de l'antenne du SAR3 est différent en émission et en réception. En azimut, la résolution résultant du traitement des sous-réseaux peut descendre jusqu'à un mètre. Dans le traitement des sous-réseaux, la longueur du réseau en azimut est divisée en sous-réseaux, chaque sous-réseau recevant simultanément les signaux de retour. La longueur équivalente du réseau de réception en azimut est donc la longueur du sous-réseau, de sorte que l'ouverture du faisceau d'antenne en azimut est plus importante, étant donné la longueur plus courte du sous-réseau. En émission, le diagramme de rayonnement d'antenne utilise tous les sous-réseaux et effectue un brouillage par la phase (*phase spoiling*) sur l'ensemble du réseau de sorte que la largeur à 3 dB du diagramme de gain en azimut est approximativement la même que celle du diagramme de gain de réception en azimut de chaque sous-réseau. Il y a deux avantages à la pondération de phase sur l'ensemble du réseau. D'une part, on peut appliquer une puissance de crête en émission de 25 kW contre $1/32^\circ$ de cette valeur pour un seul sous-réseau. D'autre part, en appliquant la technique du brouillage par la phase (*phase spoiling*) en transmission, le diagramme de gain de l'antenne diminue plus rapidement à mesure que l'angle par rapport à l'axe de visée augmente, limitant ainsi le niveau dans les lobes latéraux et donc les brouillages.

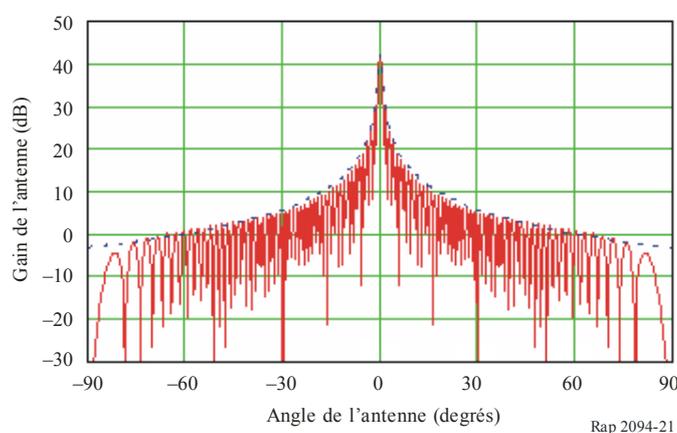
6.2.1.1 Paramètres de conception

Comme indiqué au Tableau 1, il est prévu que le SAR3 transmette des impulsions modulées linéairement en fréquence centrées autour de 9,6 GHz avec une fréquence de répétition des impulsions comprise entre 410 et 515 Hz. Le signal est polarisé de la même façon en émission et en réception – verticalement ou horizontalement – soit une polarisation paramétrable HH ou VV. La largeur d'impulsion est comprise entre 1 et 10 μ s et la largeur de bande est de 450 MHz.

6.2.1.2 Diagramme de gain d'antenne

La Fig. 21 représente, en fonction de l'azimut compris entre -90° et $+90^\circ$, le diagramme de gain d'antenne pour une pondération uniforme sur un panneau donné. L'enveloppe du diagramme est aussi représentée.

FIGURE 21
Transmission uniforme du SAR3 spatioporté (trait continu, pondération uniforme sur un panneau), enveloppe de la courbe de pondération uniforme (pointillés) à 9 600 MHz ($-4,5^\circ$ à $+4,5^\circ$)



Que ce soit en pondération uniforme ou en pondération de phase, l'effet «arête en lame de couteau» du diagramme d'antenne des réseaux linéaires à commande de phase permet également de limiter les brouillages du fait de la diminution importante du gain hors axes principaux.

Le Tableau 31 fournit les équations de gain d'antenne révisées. Dans ces équations, le plancher de -48 dBi le long de l'axe principal en azimut est conservé, mais le plancher global de -5 dBi hors axe est éliminé. La Fig. 22 représente le diagramme de gain d'antenne pour une élévation de $-90^\circ < \theta_v < +90^\circ$ et un azimut de $-90^\circ < \theta_h < +90^\circ$. L'effet «arête en lame de couteau» le long des axes principaux en élévation et en azimut apparaît très nettement avec ces équations, le gain de l'antenne tombant au-dessous de -40 dBi dans les zones hors axe de la courbe.

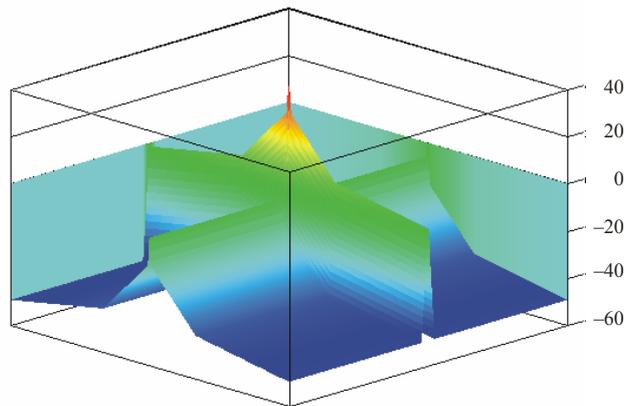
TABLEAU 31

Equations révisées du gain de l'antenne du SAR3 spatioporté à 9 600 MHz

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire (degrés)
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 42,5 - 9,92(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 31,4 - 0,83 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = 10,5 - 0,133 \theta_v$	$0 < \theta_v < 1,1$ $1,1 \leq \theta_v < 30$ $\theta_v \geq 30$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 9,07(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = +1,9 - 12,08 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -48$	$0 < \theta_h < 1,15$ $1,15 \leq \theta_h < 4,13$ $\theta_h \geq 4,13$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h)$	

FIGURE 22

Diagramme 3D du gain d'antenne du SAR3 spatioporté à 9 600 MHz
 $(-90^\circ < \theta_h < +90^\circ$ et $-90^\circ < \theta_v < +90^\circ)$ à partir des équations du Tableau 31



Rap 2094-22

6.2.2 Caractéristiques techniques des systèmes radars terrestres

Le système G3 décrit au Tableau 7 est un radar fixe qui possède une élévation de 0° et une ouverture de faisceau de $0,81^\circ$. Le SAR3 éclairant la terre avec une inclinaison de 50° , le système G3 voit le SAR3 dans ses lobes latéraux en élévation à 40° , soit, pour une ouverture de faisceau de $0,81^\circ$, approximativement le 48^e lobe latéral et un gain de -4 dBi pour une illumination uniforme. Cependant, pour accélérer la diminution des lobes latéraux, une pondération d'amplitude en élévation est probablement appliquée sur l'illumination réelle.

6.2.3 Profils de puissance reçue au niveau des stations terrestres

Les profils de puissance des brouillages causés par le SAR3 dans le G3 sont calculés en considérant que le satellite passe au-dessus d'une station terrestre G3 donnée. Le premier profil correspond à une pondération de phase sur l'ensemble de la longueur de l'antenne, soit 50 m, et le second profil à une transmission par un sous-réseau unique possédant la même valeur de crête de p.i.r.e.

La puissance des brouillages venant du SAR au niveau de la station radar terrestre a été calculée par les équations (15) et (16) de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R M.1461-1.

Les caractéristiques du SAR3 sont fournies au Tableau 1. Dans notre exemple de brouillage du G3 par le SAR3, la largeur d'impulsion est de $10 \mu\text{s}$ et la valeur de crête du gain d'antenne de 42,5 dBi.

La courbe de la Fig. 23 représente les niveaux de brouillage du G3 par le SAR3 lorsque ce dernier passe au-dessus du G3 fixe avec un angle d'ouverture de 44° pendant une durée orbitale de 2 min.

Par hypothèse, le seuil de brouillage est défini par $I/N = -10$ dB. En pondération uniforme sur un seul panneau, le SAR est au-dessus du seuil pendant environ 118 s; pour une pondération de phase sur l'ensemble du réseau, le seuil est dépassé pendant environ 14 s. Dans cet exemple, la technique de pondération de phase sur l'ensemble du réseau permet donc de limiter les brouillages: la durée pendant laquelle les brouillages venant du SAR dépassent le seuil du radar terrestre est réduite de plus d'un facteur 8.

Si l'on utilise les équations révisées du Tableau 31, le gain d'antenne du SAR3 ne présente plus de plancher à -5 dBi. Supposons que le radar terrestre se situe 23° plus loin dans la zone des lobes latéraux du SAR3 lorsque ce dernier passe au-dessus de lui. Dans ce cas de figure, les niveaux de brouillage du G3 par le SAR3 lorsque ce dernier passe au-dessus du G3 fixe pour une durée orbitale de 2 min se présentent comme indiqué à la Fig. 24. La courbe supérieure, qui correspond aux équations de gain du SAR3 avec un plancher de -5 dBi, représente la puissance des brouillages reçus lorsque le lobe principal du SAR3 rencontre le radar terrestre. La courbe inférieure, qui correspond aux équations de gain du SAR3 révisées (Tableau 31), représente la puissance des brouillages reçus lorsque le radar se situe à 23° dans la zone des lobes latéraux du SAR3.

FIGURE 23

**Niveaux de brouillage dans le radar terrestre G3 en provenance du SAR3
(soit en pondération de phase sur l'ensemble du réseau, soit en pondération
uniforme sur un panneau) à 506 km d'altitude orbitale**

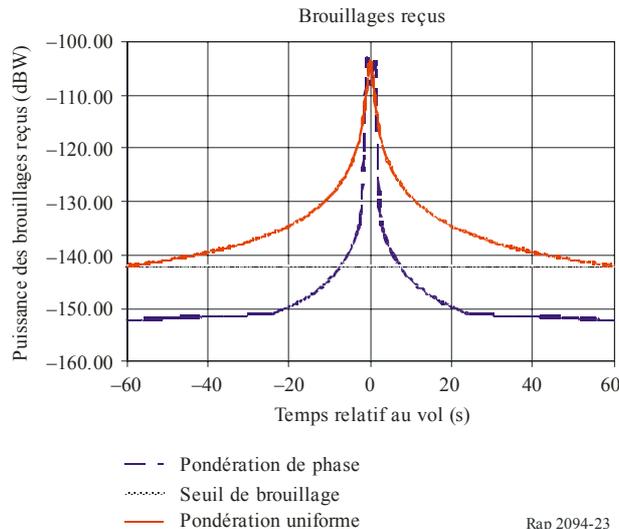
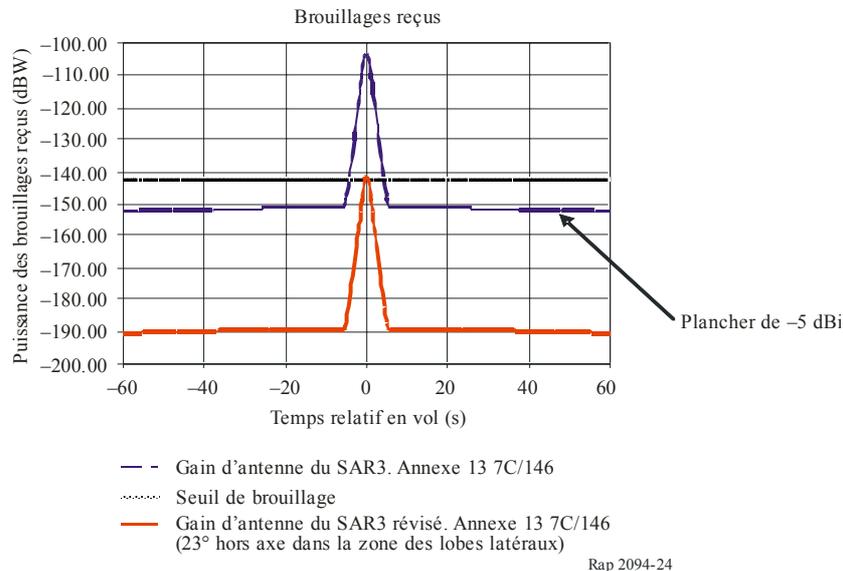


FIGURE 24

Niveaux de brouillage dans le radar terrestre G3 en provenance du SAR3
(avec les équations de gain d'antenne du SAR3 initiales et les équations révisées du Tableau 31) à 506 km d'altitude orbitale



6.2.4 Conclusion de l'analyse

On a exposé dans les paragraphes précédents la technique de limitation des brouillages fondée sur une pondération de phase sur l'ensemble du réseau de l'antenne du SAR3 large bande. Comme il a été démontré, l'utilisation de cette technique peut réduire de façon importante les brouillages causés par les lobes latéraux de l'antenne du SAR3 dans les radars terrestres. Cette technique de limitation des brouillages pourrait améliorer les conditions de partage entre un SAR et des radars terrestres.

7 Résumé et conclusion

Le présent Rapport apporte des précisions sur les études relatives à la compatibilité, d'une part, entre le SETS (actif) et le service de radiorepérage dans les bandes 9 300-9 500 MHz et 9 800-10 000 MHz et, d'autre part, entre le SETS (actif) et le service fixe dans la bande 9 800-10 000 MHz. En plus de ces études de compatibilité et de brouillage, le Rapport fournit également des informations sur des techniques de limitation des brouillages causés par le SETS (actif).

8 Documents de référence

Textes UIT-R

Recommandation UIT-R M.1796 – Caractéristiques des radars terrestres du service de radiorepérage fonctionnant dans la bande de fréquences 8 500-10 500 MHz, et critères de protection applicables à ces radars.

Rapport UIT-R M.2081 – Résultats d'essais illustrant la compatibilité entre des systèmes de radionavigation représentatifs et des systèmes de radiolocalisation et du SETS dans la bande 8,5-10 GHz.

Recommandation UIT-R F.758-4 – Considérations relatives à la mise au point de critères de partage entre le service fixe terrestre et d'autres services (janvier 2005).

Recommandation UIT-R SM.337-4 – Séparations en fréquence et en distance (octobre 1997).

- Recommandation UIT-R SM.1541-1 – Rayonnements non désirés dans le domaine des émissions hors bande (novembre 2002).
- Recommandation UIT-R RS.1166-2 – Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage applicables aux capteurs spatiaux actifs (octobre 1999) (remplace UIT-R SA.1166-2).
- Recommandation UIT-R M.1461-1 – Procédures d'évaluation des risques de brouillage entre des radars fonctionnant dans le service de radiorepérage et les systèmes d'autres services (juin 2003).
- Recommandation UIT-R M.1372-1 – Utilisation efficace du spectre radioélectrique par les stations radar du service de radiorepérage (juin 2003).
- Recommandation UIT-R RS.1280 – Choix des caractéristiques d'émission des capteurs actifs spatioportés visant à atténuer les risques de brouillage causé aux radars terrestres fonctionnant dans les bandes comprises entre 1 et 10 GHz (octobre 1997).
-