

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R M.1477
(05/2000)

**Caractéristiques techniques et
fonctionnelles des récepteurs actuels
et futurs du service de radionavigation
par satellite (espace vers Terre)
et du service de radionavigation
aéronautique à prendre en compte
dans les études de brouillage
dans la bande 1 559-1 610 MHz**

Série M

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



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2010

© UIT 2010

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

RECOMMANDATION UIT-R M.1477*

**Caractéristiques techniques et fonctionnelles des récepteurs actuels
et futurs du service de radionavigation par satellite (espace vers
Terre) et du service de radionavigation aéronautique à
prendre en compte dans les études de brouillage
dans la bande 1 559-1 610 MHz**

(Questions UIT-R 91/8 et UIT-R 217/8)

(2000)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la bande 1 559-1 610 MHz est attribuée à titre primaire au SRNS (espace vers Terre) et au SRNA;
- b) que les Recommandations UIT-R M.1088 et UIT-R M.1317 définissent les caractéristiques et présentent des descriptions de plusieurs types de récepteurs utilisés avec les systèmes de radionavigation par satellite, connus sous le nom de GPS et GLONASS;
- c) qu'il est absolument nécessaire de protéger les systèmes qui fonctionnent dans le cadre du SRNA et du SRNS utilisant la bande 1 559-1 610 MHz;
- d) que les services GPS et GLONASS destinés à assurer la sécurité de la navigation sont disponibles pour différentes applications, notamment les applications aéronautiques, terrestres et maritimes, et que l'utilisation de ces services se développera à l'avenir;
- e) que toute station terrienne convenablement équipée peut recevoir dans le monde entier des données de navigation provenant des systèmes GPS, GLONASS et des différents systèmes du SRNS;
- f) que l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) élabore des normes applicables au GNSS dont les éléments comprennent notamment les systèmes GPS et GLONASS;
- g) que l'Organisation maritime internationale (OMI) exige que les navires soient équipés du SRNS pour la navigation dans les détroits et pour les manoeuvres d'accostage;
- h) qu'aux termes du numéro 4.10 du RR, le rôle joué en matière de sécurité par le service de radionavigation et les autres services de sécurité nécessite des dispositions spéciales pour les mettre à l'abri des brouillages préjudiciables (voir également le numéro 1.169 du RR),

reconnaissant

- a) qu'un certain nombre de récepteurs du GPS et de ses systèmes complémentaires utilisés dans des applications liées à la sécurité de la vie humaine traitent les signaux GPS de différentes façons, tel qu'indiqué à l'Annexe 1, à l'intérieur de la bande SRNS/SRNA;

* En accord avec la Résolution UIT-R 44, la Commission d'études 8 des radiocommunications a apporté des modifications éditoriales à la présente Recommandation en 2004.

- b) qu'un certain nombre de récepteurs du système GLONASS utilisés dans des applications liées à la sécurité de la vie humaine traitent les signaux GLONASS de différentes façons tel qu'indiqué à l'Annexe 2, à l'intérieur de la bande SRNS/SRNA;
- c) qu'à l'heure actuelle, les normes et pratiques recommandées (SARP) de l'OACI ne reconnaissent pas l'utilisation en aéronautique des signaux large bande des systèmes GPS ou GLONASS, ni l'utilisation de fréquences porteuses supérieures à 1 604,25 MHz, à l'échelle mondiale, à partir de l'an 2005;
- d) qu'un certain nombre de systèmes complémentaires actuels et futurs des systèmes GPS et GLONASS prennent en charge les services de sécurité de la vie humaine dans le cadre de différentes applications, notamment aéronautiques;
- e) qu'il existe un grand nombre d'applications non aéronautiques du GNSS utilisés pour les besoins de services destinés ou non à assurer la sécurité de la vie humaine;
- f) que la Recommandation UIT-R M.1343 définit les spécifications techniques essentielles des stations terriennes mobiles (STM) pour les MSS mondiaux du service non OSG fonctionnant dans les bandes 1-3 GHz,

recommande

- 1 que les caractéristiques des récepteurs décrits aux Annexes 1 à 4 soient utilisées dans le cadre des études de brouillage portant sur les systèmes SRNA et SRNS dans la bande 1 559-1 610 MHz (voir la Note 1);
- 2 qu'une marge de sécurité, tel qu'indiqué à l'Annexe 5, soit observée dans le cadre des études de brouillage afin de protéger les applications du SRNS et du SRNA associées à la sécurité de la vie humaine.

NOTE 1 – La présente Recommandation n'est pas censée servir de point de départ à de futures modifications des niveaux maximaux des rayonnements non désirés dans la bande 1 559-1 610 MHz, spécifiées dans les annexes de la Recommandation UIT-R M.1343. Les niveaux maximaux des rayonnements non désirés dans la bande 1 559-1 610 MHz spécifiés dans la Recommandation UIT-R M.1343 ont été établis conformément à un scénario de brouillage précis et ne sont censés être appliqués à aucun autre service que les STM du SMS fonctionnant dans la bande 1-3 GHz, sans avoir préalablement fait l'objet d'un complément d'étude.

Annexe 1

Caractéristiques des signaux et des récepteurs du GPS

1 Caractéristiques des récepteurs du GPS

La présente Annexe décrit plusieurs types de récepteurs du GPS. Il existe trois récepteurs aéronautiques pour lesquels les spécifications sont relativement bien définies; à chacun d'eux correspond un équipement destiné aux applications terrestres et/ou maritimes; les caractéristiques spécifiées dans cette annexe sont censées être également valables pour les récepteurs du GPS utilisés dans le cadre de ces applications. La sensibilité au brouillage des applications non aéronautiques est pour l'instant mal connue, comme celle des applications futures, qu'il s'agisse de l'actuel système GPS et de ses systèmes complémentaires ou des mises au point ultérieures de ce même système.

Le premier type de récepteur aéronautique est un récepteur de navigation civile conçu pour fournir un guidage à l'approche d'une précision de catégorie I. Il doit observer les spécifications concernant un système complémentaire à satellites (SBAS, *satellite-based augmentation system*). Il doit poursuivre les satellites GPS et SBAS, qui utilisent des codes de type GPS et émettre sur la même fréquence centrale de 1 575,42 MHz. Le signal SBAS est modulé par des données avec un débit de symboles de 500 bit/s, puis il est décodé à l'aide d'un système de décodage convolutif de façon à obtenir un débit de données de sortie de 250 bit/s.

Le deuxième type de récepteur aéronautique est un récepteur de navigation aérienne conçu pour fournir un guidage à l'approche d'une précision de catégorie II/III; il doit être conforme aux spécifications relatives à un système complémentaire à base de stations terrestres (GBAS, *ground-based augmentation system*). Il doit poursuivre les satellites et les pseudolites GPS. Les pseudolites sont des émetteurs terrestres qui émettent un signal dont les caractéristiques sont celles des signaux GPS, mais dont les codes d'étalement sont différents. Des pseudolites à large bande et à bande étroite sont actuellement étudiés. Les pseudolites à large bande émettent un code semblable au code Y (voir la Note 1) de telle sorte que le signal présente les caractéristiques spectrales du code Y. Le cycle d'utilisation des impulsions des pseudolites est inférieur à 4%. Les pseudolites à bande étroite émettent un signal possédant les caractéristiques de code C/A, décalé de $\pm 10,23$ MHz par rapport à la fréquence centrale de la bande L1 (la bande L1 va de 1 559 à 1 610 MHz). Le coefficient d'utilisation de leurs impulsions est d'environ 9%.

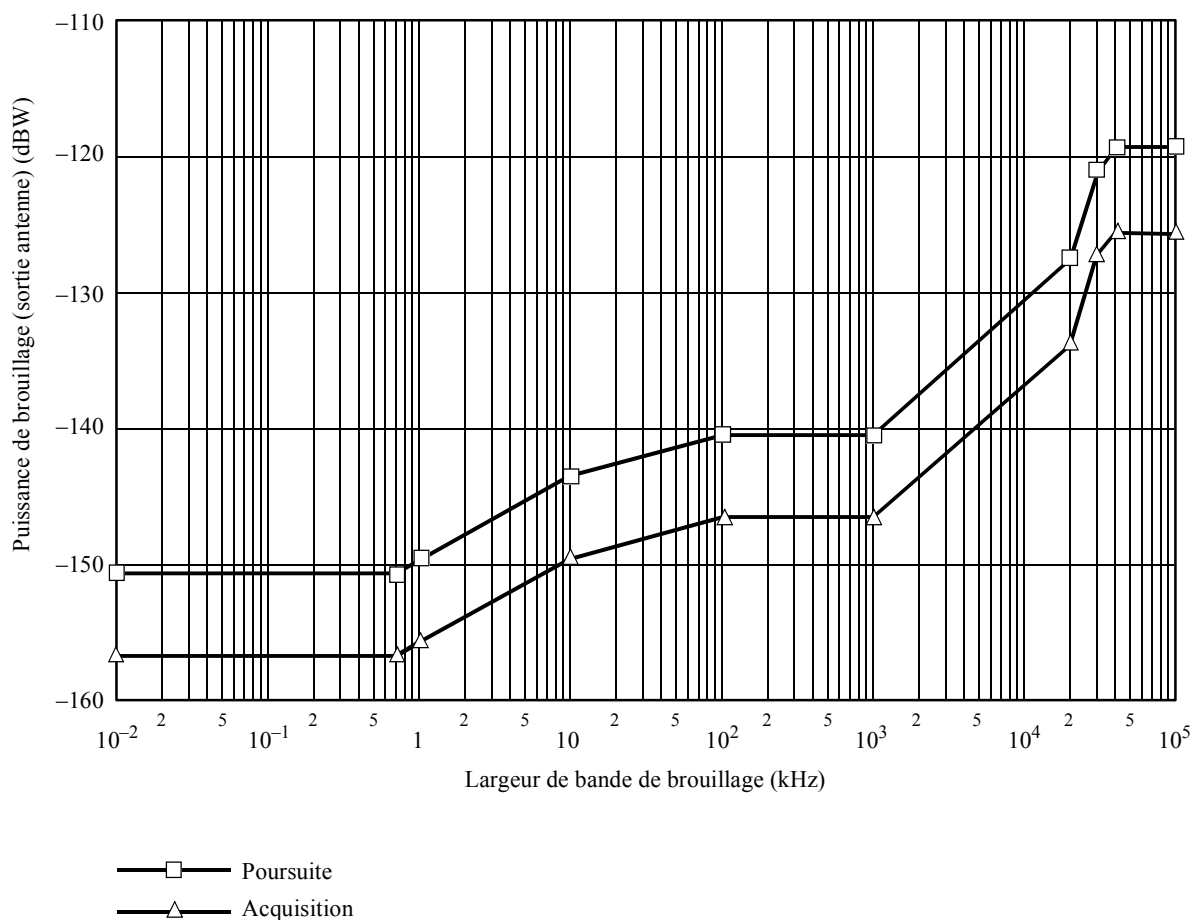
NOTE 1 – Le code Y est un code P modifié, dont le débit d'éléments et les caractéristiques spectrales sont identiques à ceux du code P.

Le troisième récepteur est un récepteur terrestre utilisé dans le cadre des opérations des SBAS afin de déterminer la valeur des retards ionosphériques. Employé également dans des applications terrestres non liées aux SBAS, le récepteur repose sur l'utilisation d'une technique à code partiel qui met à profit une caractéristique propre à l'architecture du système GPS, selon laquelle l'intercorrélation des signaux de code Y des bandes L1 et L2 (la bande L2 s'étend de 1 215 à 1 260 MHz) permet de mesurer le retard du signal en L2, autorisant ainsi la détermination du retard du signal imputable à l'ionosphère. L'identité des codes des signaux du GPS dans les bandes L1 et L2 permet d'établir l'intercorrélation. Ce récepteur doit effectuer en L1 l'acquisition et la poursuite des satellites GPS et SBAS. Les récepteurs à code partiel sont plus sensibles au brouillage puisqu'ils fonctionnent sans bénéficier de la connaissance du code Y.

Dans les descriptions suivantes, les niveaux de puissance à l'entrée de l'antenne désignent la puissance qui serait reçue par une antenne circulaire polarisée isotrope de polarité adéquate, tandis que le niveau de puissance à la sortie de l'antenne désigne les niveaux de puissance qui tiennent compte du gain d'antenne dans la direction du signal ou de la source de brouillage considérée. La Fig. 1 spécifie les niveaux de brouillage et les largeurs de bande.

FIGURE 1

Seuil de brouillage cumulé des récepteurs de navigation aérienne SBAS et GBAS



1477-01

Les niveaux maximaux de brouillage mentionnés dans les Tableaux 1 à 10 ne désignent pas des niveaux admissibles, mais plutôt des niveaux de brouillage auxquels les équipements doivent résister de par leur conception tout en étant conformes aux spécifications de fonctionnement. Le niveau total admissible de brouillage dû à des sources connues doit être nettement inférieur à cette valeur, compte tenu de la marge de sécurité prescrite (voir Annexe 5). Cette marge de sécurité autorise des fluctuations des caractéristiques de fonctionnement du récepteur du GNSS et la présence de sources de brouillage inconnues.

1.1 Récepteurs de véhicule terrestre et récepteurs de navigation maritime

Les récepteurs de véhicule terrestre et de navigation maritime sont conçus pour assurer un guidage au mètre près, au moyen de corrections différentielles obtenues de l'un des différents systèmes complémentaires du GPS, notamment des SBAS, des réseaux de radiobalise ou d'autres radiodiffuseurs locaux qui utilisent une des fréquences choisies dans la gamme des fréquences décimétriques à décamétriques. Leurs caractéristiques s'apparentent à celles du premier récepteur aéronautique décrit ci-dessus.

1.2 Récepteurs à code partiel

Les récepteurs à code partiel du GPS utilisent une technique propre au GPS selon laquelle l'intercorrélation des signaux de code Y dans les bandes L1 et L2 permet d'obtenir une estimation du retard ionosphérique ou un ensemble indépendant de mesures de phase de porteuse grâce auxquelles les ambiguïtés concernant la longueur d'onde sont rapidement écartées, même lorsque le récepteur est en mouvement. Ce procédé améliore la précision de localisation. L'utilisation de ce système d'intercorrélation est possible du fait que les signaux des bandes L1 et L2 sont modulés par des codes Y identiques et synchronisés. Ce récepteur aura des caractéristiques semblables à celles du troisième récepteur aéronautique décrit ci-dessus, mais différera probablement par sa sensibilité au brouillage.

TABLEAU 1

Récepteur SBAS de navigation aérienne (guidage d'approche de précision catégorie I)

Fréquence centrale de porteuse L1	1 575,42 MHz
Débit d'éléments de code C/A	1 023 Mbit/s
Débit binaire de données pour la navigation GPS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation, SBAS, avec CED, débit 1/2	500 symboles/s
Taux d'erreur sur les mots (1 mot = 250 bits d'information)	10^{-3} par seconde
Niveau minimal de puissance reçue à l'entrée de l'antenne, SBAS	-161 dBW
Gain minimal d'antenne vers le satellite à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne supposé dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante maximale du filtre de pré-corrélation à 3 dB ⁽¹⁾	± 16,5 MHz
Facteur de bruit du récepteur	4,4 dB
Temps de récupération après surcharge de l'impulsion RF	25×10^{-6} s
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-140,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-146,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-150,5 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-156,5 dBW

⁽¹⁾ La protection du récepteur contre les émissions RF dans la bande voisine exige parfois l'utilisation d'un filtre de pré-corrélation plus restrictif.

⁽²⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage interne du système GPS sur l'analyse du code aléatoire. Voir § 2. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs. L'applicabilité d'une marge de sécurité est examinée à l'Annexe 5.

⁽³⁾ Le brouillage large bande occupe la bande comprise de 100 kHz à 1 MHz; la largeur de bande du brouillage bande étroite est inférieure ou égale à 700 Hz. Pour les autres largeurs de bande, voir Fig. 1.

1.3 Récepteur de réseau terrestre commercial

Certains récepteurs de réseau terrestre commercial fonctionnent à une fréquence unique, auquel cas leurs caractéristiques seront semblables à celles du premier récepteur aéronautique décrit ci-dessus. Les réseaux commerciaux peuvent également utiliser des récepteurs à deux fréquences; leurs caractéristiques sont alors semblables à celles du troisième récepteur aéronautique, si ce n'est qu'au lieu d'effectuer des calculs de phase relative de porteuse, un traitement des signaux intercorrélés de L1 et L2 permet de déterminer leur retard ionosphérique. Cette information est utilisée par le réseau afin d'améliorer la précision sur une zone étendue.

2 Méthode d'analyse

La méthode d'analyse décrite ci-dessous montre que dans les conditions les plus défavorables, les effets de l'autobrouillage dans le même canal du code C/A risquent d'altérer la parfaite disponibilité du service GPS en présence d'un brouillage externe supplémentaire. La présente Annexe définit un modèle destiné à prévoir ce type d'événement propre à un lieu et à un instant donnés. Une validation expérimentale préliminaire des résultats (non rapportée ci-après) a été menée à bien; des essais supplémentaires se déroulent actuellement.

TABLEAU 2

Récepteur de navigation aérienne GBAS (Guidage d'approche de précision catégorie II/III)

Fréquence de pseudolite large bande (porteuse L1)	1 575,42 MHz
Fréquence porteuse de pseudolite bande étroite	$L1 \pm 10,23$ MHz
Débit d'éléments de pseudolite bande étroite (code C/A)	1,023 Mbit/s
Débit d'éléments de code de pseudolite large bande	10,23 Mbit/s
Débit binaire de données pour la navigation (GPS)	50 bit/s
Niveau minimal de puissance reçue du signal de code C/A à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de puissance moyenne de pseudolite large bande à l'entrée de l'antenne	-140 dBW
Niveau minimal de puissance moyenne de pseudolite bande étroite à l'entrée de l'antenne	-140 dBW
Gain minimal d'antenne vers le pseudolite	-21 dBic
Gain minimal d'antenne vers le satellite GPS suivant un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+ 7 dBic
Bande passante maximale du filtre de pré-corrélation, 3 dB ⁽¹⁾	$\pm 16,5$ MHz
Facteur de bruit du récepteur	4,4 dB
Temps de récupération après surcharge de l'impulsion RF	25×10^{-6} s
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-140,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-146,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-150,5 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-156,5 dBW

(1) La protection du récepteur contre les émissions RF dans la bande voisine exige parfois l'utilisation d'un filtre de pré-corrélation plus restrictif.

(2) Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage interne du système GPS sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs. L'applicabilité d'une marge de sécurité est examinée à l'Annexe 5.

(3) Le brouillage large bande occupe la bande comprise de 100 kHz à 1 MHz; la largeur de bande du brouillage bande étroite est inférieure ou égale à 700 Hz. Pour les autres largeurs de bande, voir Fig. 1.

2.1 Brouillage par le même service

La détermination de l'incidence d'un brouillage externe sur le GPS exige au préalable une analyse précise des effets du bruit thermique, comme de ceux du brouillage dû aux signaux du GPS. De cette façon, on détermine un niveau de brouillage de base du GPS, correspondant au brouillage par le même service ou au brouillage à l'intérieur du système, auquel les signaux d'autres systèmes sans attribution de fréquences peuvent s'ajouter. Il est admis que le brouillage par le même service fait l'objet de critères différents de ceux du brouillage externe dû à d'autres services. Le GPS, ainsi que les systèmes complémentaires prévus, grâce à une surveillance et un contrôle constants, seront à

l'abri de niveaux préjudiciables d'autobrouillage. Or, de telles garanties ne peuvent être données pour les autres services.

2.2 Bruit aléatoire et code court

Dans le cadre de l'étude du brouillage à l'intérieur du même service, cette annexe présente des résultats qui mettent en évidence le phénomène distinct d'autobrouillage dans le même canal que subissent les signaux GPS. Le GPS est un système à accès multiple par répartition en code (AMRC) à fréquence unique, qui utilise une famille de codes courts de bruit pseudo-aléatoire connus sous le nom de codes Gold. Le résultat est un système avec une capacité AMRC limitée, due en partie à la faible longueur (1 ms) du code Gold. Tandis que les études antérieures appliquaient des modèles de bruit gaussiens au phénomène d'autobrouillage dans le même canal dû au GPS, le brouillage mutuel des codes est beaucoup plus important que celui du bruit aléatoire. Par conséquent, l'étude du fonctionnement du système GPS en présence de sources externes de brouillage exige également l'application d'un modèle précis d'autobrouillage dans le même canal dû au GPS; quant à l'analyse de ce phénomène d'autobrouillage, elle doit prendre en compte les caractéristiques non linéaires du récepteur du GPS.

TABLEAU 3
Récepteur de réseau terrestre de SBAS (à code partiel*)

Fréquence de porteuse L1	1 575,42 MHz
Fréquence de porteuse L2	1 227,76 MHz
Débit d'éléments de code C/A	1,023 Mbit/s
Débit d'éléments de code Y	10,23 Mbit/s
Débit binaire de données pour la navigation, GPS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation, SBAS, avec CED, débit 1/2	250 bits/s
Taux d'erreur sur les mots (1 mot = 250 bits d'information)	10^{-3} par s
Puissance de porteuse minimale à l'entrée de l'antenne (L1/CA)	-160 dBW
Puissance de porteuse minimale à l'entrée de l'antenne (L1/Y)	-163 dBW
Puissance de porteuse minimale à l'entrée de l'antenne (L2/Y)	-166 dBW
Gain minimal d'antenne vers le satellite à un angle d'élévation de 5 degrés	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne	+7 dBic
Bande passante maximale du filtre de pré-corrélation à 3 dB ⁽¹⁾	± 16,5 MHz
Facteur de bruit du récepteur	4,4 dB
Temps de récupération après surcharge de l'impulsion RF	25×10^{-6} s
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite de code Y ^{(2), (3)}	-146,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-146,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite de code Y ^{(2), (3)}	-154,5 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-156,5 dBW

* Les récepteurs de ce type jouent un rôle critique dans les stations au sol SBAS situées à des emplacements fixes connus. Des zones tampons physiques appropriées doivent donc être prévues autour de ces récepteurs. Les données de ce Tableau correspondent également aux caractéristiques des récepteurs GPS à code partiel de systèmes autres que SBAS.

- (1) La protection du récepteur contre les émissions RF dans la bande voisine exige parfois l'utilisation d'un filtre de pré-corrélation plus restrictif.
- (2) Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage interne du système GPS sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs. L'applicabilité d'une marge de sécurité est examinée à l'Annexe 5.
- (3) Le brouillage large bande occupe la bande comprise de 100 kHz à 1 MHz; la largeur de bande du brouillage bande étroite est inférieure ou égale à 700 Hz. Pour les autres largeurs de bande, voir Fig. 1.

2.3 Corrélateurs linéaires et boucles de poursuite non linéaires

Une méthode simple de calcul de l'autobrouillage dans le même canal consiste à modéliser le récepteur du GPS comme un corrélateur qui a pour effet de contracter le signal GPS. Le modèle linéaire fournit une estimation de l'intercorrélacion entre les paires de codes GPS. En réalité, le récepteur du GPS, qui doit effectuer l'acquisition et la poursuite des signaux de satellite, utilise généralement une boucle de poursuite fermée. Il s'agit d'un processus non linéaire qui se traduit sous forme de brouillage multiple à intercorrélacion, analogue aux produits d'intermodulation. La présente Annexe donne un exemple de modélisation d'un récepteur du GPS qui utilise une boucle de poursuite à verrouillage anticipé/différé. Le rapport C/N_0 de post-corrélacion résultant de ce processus non linéaire constitue le critère de qualité de fonctionnement du récepteur.

2.4 Signal en régime permanent et modèle de constellation de satellites

Les analyses antérieures ont pris en considération l'effet du brouillage moyen sur le récepteur du GPS. Or, l'autobrouillage dans le même canal dépend toutefois des phases relatives et des glissements de fréquence par effet Doppler des signaux codés au niveau du récepteur du GPS, et de leur évolution dans le temps. En outre, les différents signaux GPS atteignent le récepteur sous des angles d'élévation différents et ne font pas l'objet du même gain d'antenne. Tous les effets susmentionnés dépendent en outre des caractéristiques géométriques du satellite et du récepteur. La présente modélisation de tous les effets de brouillage, notamment des effets de courte durée, repose sur une modélisation des orbites de satellite définies dans une constellation de satellites GPS et sur une spécification des caractéristiques de l'antenne. Il est nécessaire de procéder ainsi, puisqu'à des fins d'intégrité les effets d'une durée de l'ordre de plusieurs minutes risquent de gêner les applications du GPS liées à la sécurité.

2.5 Usagers terrestres et usagers spatioportés

La nécessité d'établir un nombre élevé de contacts avec plusieurs satellites constitue une différence fondamentale entre les analyses de brouillage relatives aux usagers terrestres du GPS – du moins pour les usagers du service à haute intégrité de sécurité de la vie humaine – et par ailleurs aux systèmes de communication à satellites. Dans le cas des applications spatioportées, l'utilisateur a besoin simplement d'établir la liaison avec le nombre minimum de satellites nécessaires pour actualiser la modélisation de la trajectoire du véhicule spatial. Par contre, les usagers terrestres doivent établir simultanément une liaison avec un plus grand nombre de satellites. Généralement, les usagers qui doivent utiliser les services à haute intégrité peuvent avoir besoin de maintenir des contacts avec de six à huit satellites en même temps. En outre, ces liaisons nécessaires par satellite doivent constamment être établies avec des satellites à faible angle d'élévation afin de limiter la diminution de précision et par conséquent de limiter l'erreur de localisation ou de base de temps. Le maintien d'une liaison avec un grand nombre de satellites est d'autant plus difficile que, pour réduire au minimum l'éclairement du sol et donc les trajets multiples, les antennes de l'utilisateur terrestre favorisent les satellites dont l'angle d'élévation est plus important en augmentant le gain. Par conséquent, le brouillage pour l'utilisateur terrestre en liaison avec un satellite à faible angle d'élévation, aggravé par le plus faible gain d'antenne de l'utilisateur, s'ajoute plus facilement au brouillage dû au signal d'un satellite dont l'angle d'élévation est plus important. Le modèle d'autobrouillage dans le même canal, qui prévoit une détérioration du rapport C/N_0 sur un satellite au plus, ferait apparaître des répercussions sur l'utilisateur terrestre (forte disponibilité), mais non sur l'utilisateur spatioporté.

La durée de la période pendant laquelle le décalage Doppler entre paires de satellites reste faible est un autre facteur pris en compte par le modèle d'autobrouillage dans le même canal. Pour les usagers terrestres, cette durée s'avère importante (de quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes); par contre, du fait des vitesses orbitales, les usagers spatioportés ne connaîtront très vraisemblablement

que de très courtes périodes de faible décalage Doppler entre satellites. Pour les raisons susmentionnées, le modèle d'autobrouillage dans le même canal doit être appliqué aux usagers terrestres, mais il est sans doute inadapté à l'analyse des conditions de brouillage propres aux usagers spatioportés.

3 Caractéristiques du code C/A

La présente Annexe décrit les caractéristiques spécifiques du code C/A du GPS dans la mesure où elles peuvent avoir une incidence sur les études de brouillage. L'utilisation du code Gold par le GPS se traduit par des niveaux d'intercorrélation qui produisent des brouillages dans le même canal d'une intensité plus élevée, par comparaison aux codes pseudo-aléatoires de même longueur. On peut démontrer que le niveau de brouillage est inversement proportionnel à la longueur du code.

Lorsque la période du code pseudo-aléatoire est très longue, il est possible de déterminer une valeur approchée continue de la densité spectrale de puissance (dsp). La dsp d'autobrouillage dans le même canal qui en résulte à la sortie d'un corrélateur linéaire peut être calculée par le produit de convolution de la dsp du signal de code brouilleur reçu par celle du signal de code de référence dans le récepteur. On peut établir que le résultat est égal à $2/3 (f_c)$ fois la puissance brouilleuse (P_I), avec f_c débit d'éléments du code d'étalement du spectre. Ce niveau de brouillage, qui correspond à un code aléatoire (non périodique) peut s'exprimer par la formule $-61,8 + 10 \log(P_I)$ dB(W/Hz) en fonction de la porteuse.

Toutefois, pour les codes Gold et en particulier pour ceux dont les périodes sont courtes, une analyse de code aléatoire ne rend pas compte des fortes fluctuations de l'autobrouillage dans le même canal en fonction des coordonnées spatiales et temporelles du récepteur. Or, de telles variations présentent une grande importance pour les applications liées à la sécurité de la vie humaine, dans la mesure où même des événements relativement brefs peuvent jouer un rôle décisif. En pareilles circonstances, une analyse plus précise de l'autobrouillage dans le même canal s'avère impérative. Par la suite, les analyses de brouillage effectuées dans le cadre de la coordination des fréquences doivent porter également sur les effets à court terme de l'autobrouillage dans le même canal, tel qu'indiqué dans la présente Recommandation.

La méthode de calcul du brouillage du seul GPS comprend donc les étapes suivantes:

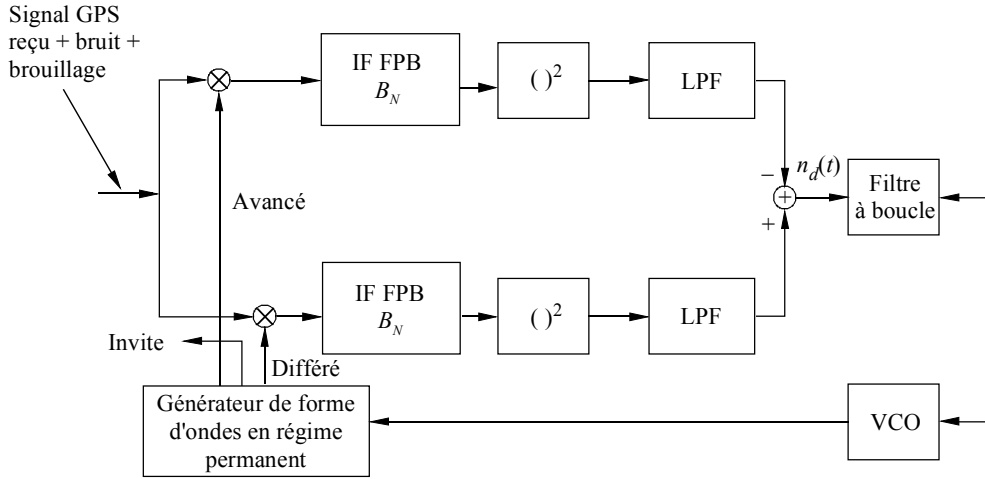
- calcul de l'autobrouillage dans le même canal au moyen d'un modèle analytique plus précis tenant compte de la relation de dépendance de la puissance brouilleuse par rapport à divers facteurs tels que le décalage Doppler et les retards de code entre les signaux utiles et brouilleurs, l'intercorrélation des codes et les effets non linéaires du récepteur;
- au moyen d'une représentation de la constellation de satellites, modéliser les variations du signal reçu de la source utile comme de la source brouilleuse, ainsi que les variations de gain d'antenne en fonction de l'angle d'élévation de l'utilisateur;
- réaliser une étude au niveau mondial afin de déterminer l'emplacement (les emplacements) correspondant à un minimum du rapport C/N_0 probable; et
- calculer le rapport C/N_0 à ces emplacements en fonction du temps, pour déterminer la durée de la période pendant laquelle ce minimum du rapport C/N_0 est observé.

L'application de cette méthode permet de déterminer une valeur de référence réaliste de l'autobrouillage dans le même canal du code C/A, niveau auquel les sources externes de brouillage peuvent être ajoutées à des fins d'analyse. La comparaison à un seuil prédéfini (34 dB(Hz) en acquisition et 30 dB(Hz) en poursuite de code) du brouillage observé en ces points qui correspondent à un minimum du rapport C/N_0 , déterminera si le brouillage supplémentaire provoque une perte de service GPS.

3.1 Analyses de l'autobrouillage dans le même canal du service GPS

La Fig. 2 représente le modèle de boucle de poursuite à retard de phase non cohérente.

FIGURE 2
Boucle de poursuite de code non cohérente



FPB: filtre passe-bande
LPF: filtre passe-bas
VCO: oscillateur à commande par tension

1477-02

Le signal total reçu par le canal du récepteur du GPS est égal à la somme des signaux reçus du satellite poursuivi et des autres satellites GPS (L) en vue du récepteur. On peut exprimer par la formule suivante le signal total reçu à l'entrée de la boucle de poursuite:

$$r(t) = \sqrt{2G_0 P_0} d(t - \tau_0(t)) c_0(t - \tau_0(t)) \cos(\omega_c t + \omega_0^d t + \varphi_0) + \sum_{i=1}^L \sqrt{2G_i P_i} d_i(t - \tau_i(t)) c_i(t - \tau_i(t)) \cos(\omega_c t + \omega_i^d t + \varphi_i) + n(t) \quad (1)$$

avec:

- P_0 : puissance moyenne reçue du satellite GPS poursuivi
- P_i : puissance moyenne reçue du $i^{\text{ème}}$ satellite GPS en vue du récepteur du GPS
- G_i : gain compte tenu des effets d'antenne en direction du $i^{\text{ème}}$ satellite GPS
- $c_0(t)$: code d'étalement pour le satellite GPS poursuivi
- $c_i(t)$: code d'étalement pour le $i^{\text{ème}}$ satellite
- $d(t)$: bit de données (± 1 avec une période T) pour le satellite GPS poursuivi
- $d_i(t)$: bit de données (± 1 avec une période T) pour le $i^{\text{ème}}$ satellite
- $n(t)$: bruit gaussien blanc additif
- $\tau_0(t)$: retard de trajet depuis le satellite GPS poursuivi compte tenu de l'effet Doppler du code

- $\tau_i(t)$: retard de trajet du $i^{\text{ème}}$ satellite jusqu'au récepteur compte tenu de l'effet Doppler du code
- φ_0 : phase de porteuse aléatoire du signal depuis le satellite GPS poursuivi
- φ_i : phase de porteuse aléatoire du signal du $i^{\text{ème}}$ satellite
- ω_c : fréquence de porteuse GPS (rad/s)
- ω_0^d : fréquence Doppler de porteuse du satellite poursuivi (rad/s)
- ω_i^d : fréquence Doppler de porteuse du $i^{\text{ème}}$ satellite brouilleur (rad/s).

Selon l'hypothèse simplificatrice sur laquelle repose l'équation des fonctions d'autocorrélation et d'intercorrélations des codes, les termes correspondants respectivement à l'effet Doppler et au code d'étalement peuvent être traités séparément. Cette hypothèse se vérifie aux faibles valeurs du décalage de fréquence dû à l'effet Doppler entre satellites. On a constaté en outre que le brouillage le plus préjudiciable intervenait pour les faibles décalages de fréquence dus à l'effet Doppler, entre satellites.

D'après la formule du signal reçu de la relation (1), l'autobrouillage dans le même canal ($n_d(t)$) produit par d'autres satellites GPS en vue, mais non poursuivis, à l'entrée du filtre à boucle est donné par:

$$n_d(t) = \frac{1}{2} K_1 \sum_{i=1}^N P_i D_{0i}^I(\xi_{0i}) + K_1 \sum_{i=1}^N \sqrt{P_0 P_i} D_{0i}^C(\xi_{0i}) \cos[\omega_{i0}^d t + \Delta\varphi_{i0} + \Delta\theta_{d_{i0}}(t)] + K_1 \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N \sqrt{P_j P_i} D_{ij}^C(\xi_{i0}, j_{i0}) \cos[\omega_{ij}^d t + \Delta\varphi_{ij} + \Delta\theta_{ij}(t)] \quad (2)$$

où:

- K_1 : affaiblissement ou gain du mélangeur
- $\Delta\theta_{d_{ij}}(t) = \theta_{d_i}(t) - \theta_{d_j}(t)$: différence de phase de modulation des données entre les $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites GPS
- $\Delta\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j$: différence de phase aléatoire entre les signaux des $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites GPS
- $\omega_{ij}^d = \omega_i^d - \omega_j^d$: écart différentiel de fréquence porteuse dû à l'effet Doppler entre les $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites.

Dans la relation (2), les fonctions de discriminateur sont définies par:

$$D_{0i}^I(\xi_{0i}) = R_{c_{0i}}^2 \left[\left(\delta - \xi_{0i} + \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] - R_{c_{0i}}^2 \left[\left(\delta - \xi_{0i} - \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] \quad (3a)$$

$$D_{0i}^C(\xi_{0i}) = R_{c_{00}} \left[\left(\delta + \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] R_{c_{0i}} \left[\left(\delta - \xi_{0i} + \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] - R_{c_{00}} \left[\left(\delta - \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] R_{c_{0i}} \left[\left(\delta - \xi_{0i} - \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] \quad (3b)$$

$$D_{ij}(\xi_{0i}, \xi_{0j}) = R_{c_{0i}} \left[\left(\delta - \xi_{0i} + \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] R_{c_{0j}} \left[\left(\delta - \xi_{0j} + \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] - R_{c_{0i}} \left[\left(\delta - \xi_{0i} - \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] R_{c_{0j}} \left[\left(\delta - \xi_{0j} - \frac{\Delta}{2} \right) T_c \right] \quad (3c)$$

Dans les équations (3a) à (3c):

$$\xi_{0i}(t) = \frac{\tau_0(t) - \tau_i(t)}{T_c} : \text{retard différentiel normalisé entre le satellite poursuivi et le } i^{\text{ème}} \text{ satellite GPS en vue du récepteur du GPS}$$

δ : erreur de poursuite

$$R_{c_{0i}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T c_0(t) c_i(t + \tau) dt: \text{intercorrélation entre codes d'indice 0 et d'indice } i.$$

Lorsque $i = 0$ l'équation (3a) définit la courbe en S bien connue du discriminateur de boucle de poursuite, la contribution des relations (3b) et (3c) étant nulle. Lorsque i est différent de zéro (indice correspondant au satellite poursuivi) chacune des trois relations (3a) à (3c) définit une composante du bruit dans la boucle de poursuite. Pour calculer la puissance de brouillage dans le même canal, il faut déterminer la dsp.

$I_0(f, f_{ij}^d, \tau_{ij})$, en fonction de l'écart différentiel de fréquences dû à l'effet Doppler (f_{ij}^d) et du temps de propagation différentiel (τ_{ij}) entre les $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites, en calculant la transformée de Fourier de l'équation (2). La dsp relative à l'autobrouillage dans le même canal peut s'exprimer au moyen de l'équation (4).

$$\begin{aligned} I_0(f, f_{ij}^d, \tau_{ij}) = & \frac{K_1^2}{4 P_0} \sum_{i=1}^N P_i^2 \left| D_{0i}^{IF}(f v_{i0}^n) \right|^2 + \\ & \frac{K_1^2}{4 P_0 T} \sum_{i=1}^N P_0 P_i \tau_{i0}^2 \left\{ \left| D_{0i}^{CF}(f v_{i0}^n) \right|^2 * \left[\frac{\sin \pi (f - f_{i0}^d) \tau_{i0}}{\pi (f - f_{i0}^d) \tau_{i0}} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_{i0}^d) \tau_{i0}}{\pi (f + f_{i0}^d) \tau_{i0}} \right]^2 \right\} + \\ & \frac{K_1^2}{4 P_0 T} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N P_j P_i \tau_{ij}^2 \left\{ \left| D_{ij}^F(f v_{ij}^n) \right|^2 * \left[\frac{\sin \pi (f - f_{ij}^d) \tau_{ij}}{\pi (f - f_{ij}^d) \tau_{ij}} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_{ij}^d) \tau_{ij}}{\pi (f + f_{ij}^d) \tau_{ij}} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

le symbole* désignant une opération de convolution. f_{ij}^d et τ_{ij} sont liés à la différence de vitesse de variation de la distance $\dot{\rho}_i - \dot{\rho}_j$ et à la différence de distance $(\rho_i - \rho_j)$ entre les $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites tel qu'indiqué ci-dessous:

$$\begin{aligned} f_{ij}^d &= v_{ij}^n \times f_c \\ &= \frac{v_{ij}}{c} \times f_c \\ &= \frac{\dot{\rho}_i - \dot{\rho}_j}{c} \times f_c \end{aligned}$$

$\tau_{ij} = \frac{(\rho_i - \rho_j)}{c}$; c désigne la vitesse de la lumière. (Dans les calculs qui ont été effectués, les ordres de grandeur des temps de propagation différentiels restent inférieurs à 20 ms.)

Le premier terme de l'équation (4) est semblable à l'expression que l'on peut obtenir pour la densité spectrale de puissance de l'autobrouillage dans le même canal dans un corrélateur linéaire avec suppression de la modulation de données. Les deuxième et troisième termes de l'équation (4) sont dus à la transformation en onde carrée effectuée dans la boucle de poursuite. Le deuxième terme

correspond au brouillage du $i^{\text{ème}}$ satellite, notamment la modulation de données, et le troisième terme est dû aux produits d'intermodulation des signaux des $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ satellites transmis dans la largeur de bande de la boucle. Il convient de noter que tous les termes de l'équation (4) sont des fonctions des effets Doppler et que les deuxième et troisième termes sont également fonction des temps différentiels, entre les satellites en vue. De plus, puisque le troisième terme est fonction aussi bien de l'écart différentiel de fréquences dû à l'effet Doppler qu'au temps de propagation différentiel de tous les satellites en vue, autres que le satellite poursuivi, considérés deux par deux, il est par ailleurs difficile, pour pouvoir l'évaluer, de choisir judicieusement le cas le plus défavorable. Toutefois, la contribution de ce terme est considérée comme négligeable dans la plupart des situations concrètes et ne doit donc pas figurer dans les résultats présentés ci-après. Compte tenu de la simplification susmentionnée, l'évaluation ci-dessous du brouillage est légèrement sous-estimée.

On peut exprimer comme suit la valeur équivalente du rapport C/N_0 ,

$$C/N_0 = 10 \log (P/(N_0 + I_0(f, f_{ij}^d, \tau_{ij}))) \quad (5)$$

avec:

N_0 : densité spectrale de puissance de bruit thermique à une seule bande

$I_0(f, f_{ij}^d, \tau_{ij})$: densité spectrale de puissance d'autobrouillage dans le même canal du GPS.

Lorsque l'on évalue C/N_0 en fonction des caractéristiques géométriques des satellites, on constate que l'importance du brouillage dans le même canal diminue rapidement en règle générale en fonction inverse de l'écart différentiel de fréquences dû à l'effet Doppler entre les satellites. Cette observation confirme le bien-fondé de l'hypothèse faite pour calculer l'équation (2).

3.2 Résultats types

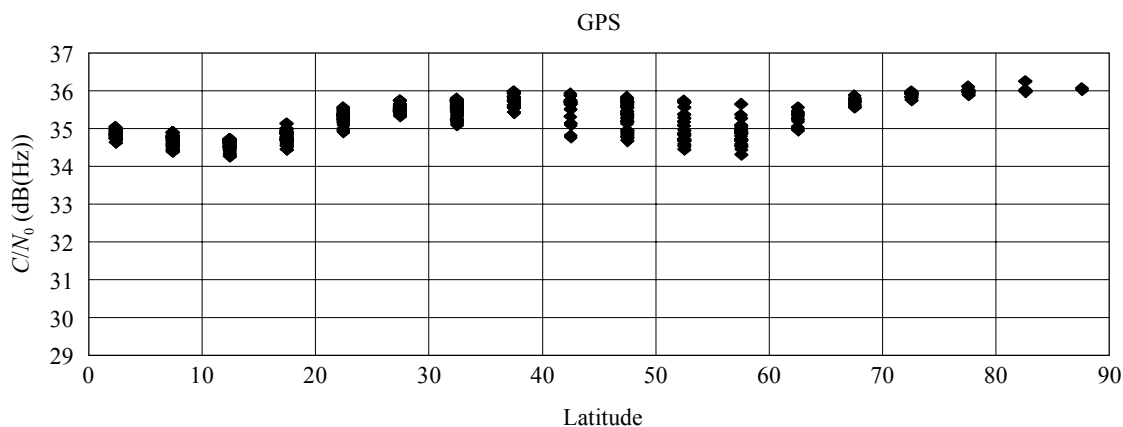
Les résultats présentés ci-après prennent uniquement en considération le phénomène d'autobrouillage dans le même canal GPS. Le niveau de bruit thermique dans le récepteur est supposé être égal à $-201,5$ dB(W/Hz). La puissance de signal GPS spécifiée pour le code C/A reçu dans une antenne caractérisée par un gain de 0 dBic est de -160 dBW (sans affaiblissement de corrélateur). D'après le modèle d'antenne GPS pris en compte, le gain minimal pour un angle d'élévation de 5° est de $-4,5$ dB et le gain maximal au zénith de 3 dB. Le rapport C/N_0 en mode acquisition (acquisition initiale assurée ou réacquisition d'un signal de satellite GPS en temps utile) est égal à 34 dB(Hz). La modélisation de tous les effets de brouillage, notamment ceux de courte durée, utilise une représentation des orbites de satellite de type constellation GPS, ainsi qu'une spécification d'antenne mentionnée plus haut. Les écarts différentiels de fréquence dus à l'effet Doppler, ainsi que les temps différentiels de propagation et les niveaux de puissance reçue de tous les satellites GPS en vue sont déterminés sur la base du modèle de constellation et utilisés conjointement avec l'équation (5) pour calculer le rapport C/N_0 qui en résulte.

La Fig. 3 représente la valeur minimale du rapport C/N_0 observée au niveau du récepteur en fonction de la latitude et de la longitude de l'utilisateur. Ces données ont été obtenues sur le quadrillage de 5° en latitude d'une projection équivalente de l'hémisphère Nord, sur la base d'un pas temporel de deux minutes, sur une période de 24 h. Il est également à noter qu'en raison de la symétrie propre au relevé, les données concernant l'hémisphère Sud sont sensiblement identiques à celles de l'hémisphère Nord. En chaque point du sol, seule est enregistrée la valeur minimale du rapport C/N_0 pour tous les satellites et sur la période considérée de 24 h (cas le plus défavorable). Chaque minimum est reporté sur le graphique en fonction de la latitude correspondante du point au sol. La dispersion des points de même latitude représente donc la variation de la valeur minimale du rapport C/N_0 du signal reçu au niveau des récepteurs de différentes longitudes. D'après ces résultats,

le niveau minimal du rapport C/N_0 relatif au fonctionnement du GPS (sans aucun brouillage dû à d'autres sources de signaux) permet de respecter les critères d'acquisition et de poursuite.

FIGURE 3

Rapport C/N_0 dans le cas le plus défavorable relatif à une simulation mondiale de l'autobrouillage dans le même canal GPS en fonction de la latitude de l'utilisateur

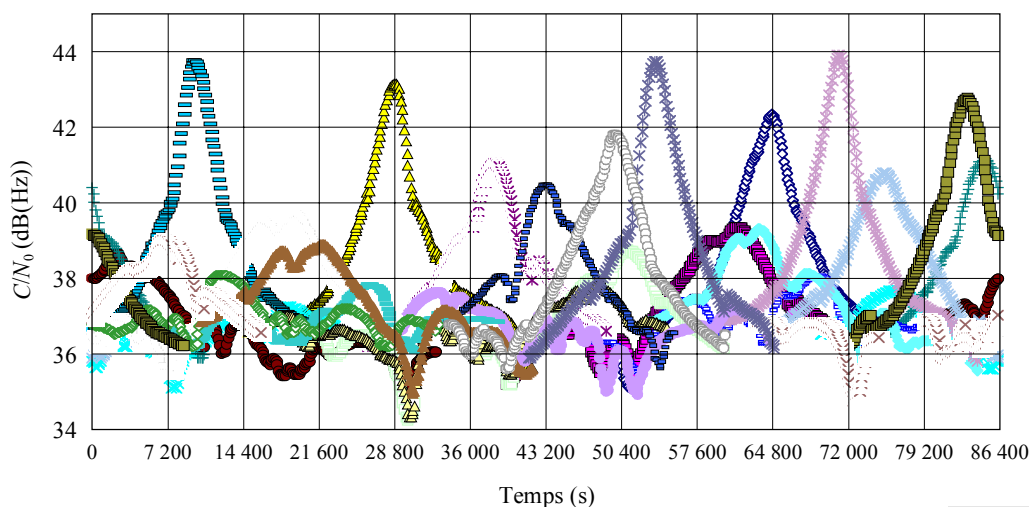


1477-03

La Fig. 4 représente le rapport C/N_0 observé au niveau d'un récepteur du GPS, en fonction du temps, sur une période de 24 h, dans le cas d'un usager situé au voisinage du point à $12,5^\circ$ de latitude et -96° de longitude (cas le plus défavorable d'après la Fig. 3). Les courbes reproduites sur cette figure correspondent aux rapports C/N_0 relatifs aux différents satellites GPS visibles depuis cet endroit.

FIGURE 4

Autobrouillage dans le même canal GPS en fonction du temps et correspondant à l'emplacement du cas le plus défavorable

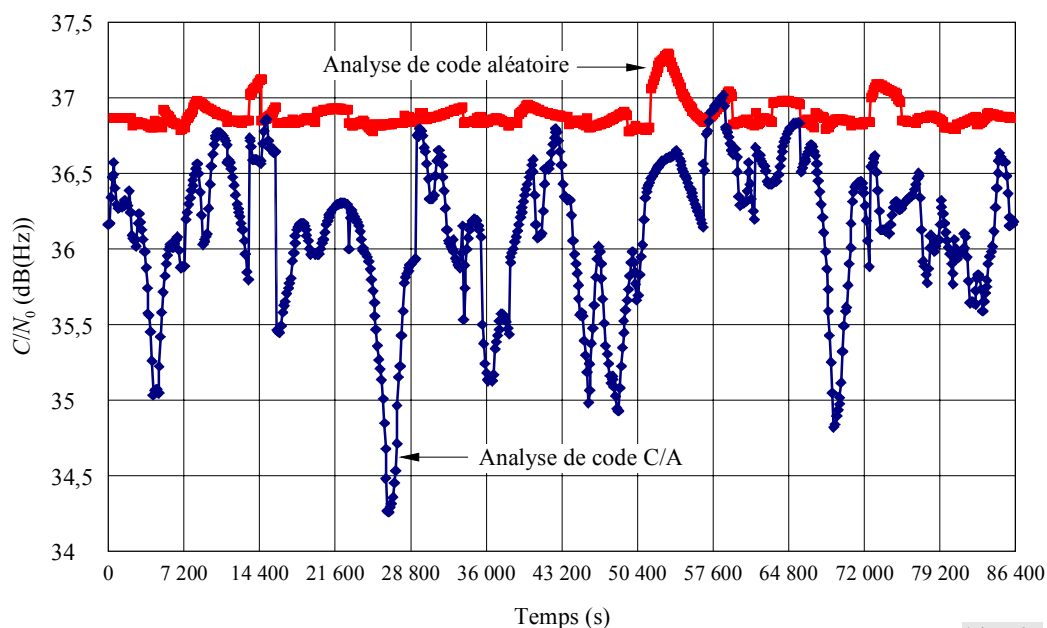


1477-04

Les Figs. 3 et 4 permettent de constater qu'en dépit du fait que l'autobrouillage dans le même canal dû à l'ensemble des satellites GPS visibles, la valeur minimale du rapport C/N_0 , pour l'ensemble des positions d'utilisateurs à la surface du globe et pour toute la période considérée, dépasse le seuil d'acquisition C/N_0 de 34 dB(Hz). En outre, il ressort de l'examen de la Fig. 4 que deux occurrences des valeurs minimales du rapport C/N_0 diffèrent de moins de 1 dB du seuil d'acquisition (34 dB(Hz)). Cela dénote un risque de perte de capacité d'acquisition, pour au moins un satellite, en présence d'un brouillage externe supplémentaire. La durée de chaque occurrence va de 10 à 15 min. Pour la première occurrence, située à un instant voisin de 30 000 s, deux ou éventuellement trois des huit satellites visibles correspondent à ce domaine de valeurs, alors que c'est le cas d'un seul des sept satellites visibles pour la deuxième occurrence (instant proche de 72 000 s). Si l'on considère une autre position d'utilisateur, le moment et la durée de cet événement peuvent varier, bien que l'intervalle de variation ne soit vraisemblablement pas très étendu.

A des fins de comparaison, la Fig. 5 représente l'enveloppe des valeurs minimales des rapports C/N_0 pour les satellites en vue, sur la base du code aléatoire comme sur celle du code C/A exact. La courbe qui correspond à l'analyse du code aléatoire est pratiquement constante, puisqu'elle est fondée sur le niveau de brouillage $-61,5$ dB, par rapport à la puissance porteuse, tel qu'indiqué plus haut. La légère variation observée sur ce graphique est due aux variations de gain d'antenne liées à la variation dans le temps des lignes de visée dirigées vers les satellites. En revanche, la courbe qui correspond à l'analyse du code C/A tient compte de tous les effets des écarts différentiels de fréquence dus à l'effet Doppler, de temps de propagation différentiels, de modulation des données et de changements du gain d'antenne en fonction du temps; il en résulte une réduction du niveau minimal du rapport C/N_0 , allant de 0 dB à 2,5 dB. Les résultats présentés aux Fig. 4 et 5 montrent clairement que les valeurs minimales du rapport C/N_0 si l'on tient compte ou non de l'écart différentiel de fréquence dû à l'effet Doppler et des temps de propagation différentiels dans l'analyse peuvent comporter des différences très importantes. Par conséquent, toute analyse de brouillage réalisée dans une perspective de partage des fréquences doit impérativement tenir compte de tous les effets liés aux signaux, tel qu'indiqué dans la présente Annexe.

FIGURE 5
Comparaison de l'autobrouillage dans le même canal
pour les signaux de code aléatoire et de code C/A



4 Conclusion

La méthodologie d'analyse décrite dans la présente Annexe intègre une description de l'autobrouillage dans le même canal du code *C/A* d'une précision supérieure à celle qui utilise un modèle de code aléatoire. L'une et l'autre méthode d'analyse mettent en évidence la disponibilité permanente du service GPS. Cette analyse correspondant au cas le plus défavorable démontre l'existence d'un nombre limité d'effet en fonction de l'emplacement et du temps, qui sont susceptibles de réduire la marge concernant les sources de brouillage externes. (L'applicabilité de ce modèle aux utilisations du GPS destinées à assurer la sécurité de la vie humaine et exigeant un niveau de disponibilité élevé, contraste nettement avec celle qui prévaut vis-à-vis d'autres usagers du GPS, par exemple les plates-formes spatiales, pour lesquelles une analyse reposant sur le niveau moyen d'autobrouillage dans le même canal peut s'avérer suffisante.) Il ressort du cas type présenté que, pour l'emplacement correspondant à la situation la plus défavorable, il existe au moins deux cas dans lesquels le bruit au niveau de l'un des deux satellites diffère de moins de 1 dB du seuil d'acquisition.

Annexe 2

Caractéristiques des récepteurs du SRNS fonctionnant dans le système GLONASS et dans ses systèmes complémentaires

La présente Annexe décrit plusieurs types de récepteurs aéronautiques actuels et futurs du système GLONASS. Chacun d'eux a pu faire l'objet de modifications en vue d'applications terrestres ou maritimes.

Le premier type de récepteur est conçu pour l'aviation civile en fonction des besoins propres à la navigation en route et aux approches de catégorie I. Le récepteur doit fonctionner au moyen des signaux de précision standard (SAS, *standard accuracy signals*) du système GLONASS, émis aux fréquences correspondant à $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 12$.

Le deuxième type de récepteur est conçu pour l'aviation civile en fonction des besoins propres à la navigation en route et aux approches de catégorie I. Le récepteur est censé fonctionner au moyen des signaux SAS du système GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$.

Le troisième type de récepteur est conçu pour l'aviation civile en fonction des besoins propres à la navigation en route et aux approches de catégorie I, au moyen du système SBAS-GLONASS (voir la Note 1). Le récepteur doit fonctionner au moyen des signaux SAS du système GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$ et avec des signaux SAS provenant des satellites du système SBAS-GLONASS, ces signaux étant émis à des fréquences correspondant à $K = 5, \dots, 9$.

NOTE 1 – SBAS: Système complémentaire à satellites (*satellite-based augmentation system*). Il s'agit d'un système complémentaire à couverture étendue dans lequel l'utilisateur reçoit directement les informations complémentaires à partir d'un émetteur à satellite. Les signaux SAS du système SBAS-GLONASS doivent être émis à partir de deux satellites géostationnaires à partir de 2005, dans la bande de fréquences 1 605-1 607,5 MHz.

Le quatrième type de récepteur est conçu pour l'aviation civile en fonction des besoins propres à la navigation en route et aux approches de catégories I/II/III, au moyen des systèmes SBAS-GLONASS et GBAS (voir la Note 2). Le récepteur doit fonctionner au moyen des signaux SAS du système GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$, des signaux SAS du système SBAS-GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = 5, \dots, 9$ et enfin des signaux SAS de pseudolites (voir la Note 3) émis à des fréquences correspondant à $K = -12, \dots, -8$.

NOTE 2 – GBAS: Système complémentaire terrestre (*ground-based augmentation system*). Il s'agit d'un système complémentaire dans lequel l'utilisateur reçoit directement des informations complémentaires d'un émetteur terrestre.

NOTE 3 – Les pseudolites sont des émetteurs terrestres destinés à émettre des signaux SAS présentant les caractéristiques des signaux de type GLONASS.

Le cinquième type de récepteur est conçu pour l'aviation civile en fonction des besoins propres à la navigation en route et aux approches de catégories I/II/III au moyen des systèmes SBAS-GLONASS et GBAS (terrestres). Le récepteur doit fonctionner au moyen des signaux (de navigation) de haute précision (PAS, *precision (high) accuracy (navigation) signals*) du système GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$, des signaux SAS du système SBAS-GLONASS émis aux fréquences correspondant à $K = 5, \dots, 9$ et des signaux SAS de pseudolites émis aux fréquences correspondant à $K = -12, \dots, -8$.

Pour répondre aux spécifications de précision imposées par les opérations d'approche des vols d'aviation civile, les récepteurs GLONASS sont équipés de corrélateurs produisant des impulsions étroites (échantillonnage) et des impulsions de forme spéciale.

TABLEAU 4
Récepteurs du système GLONASS du premier type

Fréquences de porteuse L1	$F_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1$ avec: $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$ $\Delta f_1 = 0,5625\text{ MHz}$ $K = -7, \dots, 12$
Débit d'éléments de code dans le signal SAS GLONASS	511 kbit/s
Débit binaire de données pour la navigation (système GLONASS)	50 bit/s
Niveau minimal de la puissance reçue du signal SAS à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Gain minimal d'antenne vers le satellite à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante du filtre RF à 3 dB (fréquence centrale 1 603,406 MHz)	25,1 MHz
Bande passante du filtre de pré-corrélation, 3 dB (fréquence centrale 1 603,406 MHz)	20,91 MHz
Temps de récupération après surcharge	1-5 µs
Température de bruit du récepteur	400 K
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(1), (2)}	-149 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(1), (2)}	-155 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(1), (2)}	-146 dBW/MHz
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(1), (2)}	-152 dBW/MHz

⁽¹⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système GLONASS, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

⁽²⁾ Dans le cas des récepteurs GLONASS la résistance au brouillage est mesurée sur la base des paramètres de fonctionnement suivants: erreur de poursuite (1σ): 0,8 m, taux d'erreur sur les mots: 1 pour 10^4 mots. Cette erreur de poursuite ne tient pas compte de l'incidence de la propagation par trajets multiples du signal, des effets troposphériques et ionosphériques ainsi que des erreurs sur les éphémérides et des erreurs d'horloge des satellites GLONASS.

TABLEAU 5

Récepteurs du système GLONASS du deuxième type

Fréquences de porteuse L1 ⁽¹⁾	$F_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1$ avec: $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$ $\Delta f_1 = 0,5625\text{ MHz}$ $K = -7, \dots, 4$
Débit d'éléments de code dans le signal SAS GLONASS	511 kbit/s
Débit binaire de données pour la navigation (système GLONASS)	50 bit/s
Niveau minimal de la puissance reçue à l'entrée de l'antenne (système GLONASS)	-161 dBW
Gain minimal d'antenne vers un satellite GLONASS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante du filtre RF à 3 dB (fréquence centrale 1 601,156 MHz)	19,69 MHz
Bande passante du filtre de pré-corrélation, 3 dB (fréquence centrale 1 601,156 MHz)	16,41 MHz
Temps de récupération après surcharge	1-5 µs
Température de bruit du récepteur	400 K
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-149 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-155 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-146 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-152 dB(W/MHz)

⁽¹⁾ Les récepteurs en question sont prévus pour recevoir des signaux SAS GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$.

⁽²⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système GLONASS, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

⁽³⁾ Dans le cas des récepteurs GLONASS la résistance au brouillage est mesurée sur la base des paramètres de fonctionnement suivants: erreur de poursuite (1σ): 0,8 m, taux d'erreur sur les mots: 1 pour 10^4 mots. Cette erreur de poursuite ne tient pas compte de l'incidence de la propagation par trajets multiples du signal, des effets troposphériques et ionosphériques ainsi que des erreurs sur les éphémérides et des erreurs d'horloge des satellites GLONASS.

TABLEAU 6
Récepteurs du système GLONASS du troisième type

Fréquences centrales de porteuse L1 ⁽¹⁾	$F_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1$ avec: $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$ $\Delta f_1 = 0,5625\text{ MHz}$ $K = -7, \dots, 9$
Débit d'éléments de code dans le signal SAS GLONASS	511 kbit/s
Débit d'éléments de code dans le signal SAS du système SBAS-GLONASS	511 kbit/s
Débit binaire de données pour la navigation GLONASS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation SBAS-GLONASS, avec CED, débit 1/2	500 symboles/s
Taux d'erreur sur les mots (1 mot = 250 bits d'information) pour le système SBAS-GLONASS	1×10^{-3}
Niveau minimal de la puissance reçue à l'entrée de l'antenne dans le système GLONASS	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance reçue à l'entrée de l'antenne dans le système SBAS-GLONASS	-161 dBW
Gain minimal d'antenne vers un satellite GLONASS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain minimal d'antenne vers un satellite SBAS-GLONASS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante du filtre RF à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	19,69 MHz
Bande passante du filtre de pré-corrélation, à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	16,41 MHz
Temps de récupération après surcharge	1-5 µs
Température de bruit du récepteur	400 K
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-149 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-155 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-146 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-152 dB(W/MHz)

⁽¹⁾ Les récepteurs en question sont prévus pour recevoir des signaux SAS GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$ et des signaux SAS SBAS-GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = 5, \dots, 9$.

⁽²⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système GLONASS, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

⁽³⁾ Dans le cas des récepteurs GLONASS la résistance au brouillage est mesurée sur la base des paramètres de fonctionnement suivants: erreur de poursuite (1σ): 0,8 m, taux d'erreur sur les mots: 1 pour 10^4 mots. Cette erreur de poursuite ne tient pas compte de l'incidence de la propagation par trajets multiples du signal, des effets troposphériques et ionosphériques ainsi que des erreurs sur les éphémérides et des erreurs d'horloge des satellites GLONASS.

TABLEAU 7

Récepteurs du système GLONASS du quatrième type

Fréquences de porteuse L1 ⁽¹⁾	$F_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1$ avec: $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$ $\Delta f_1 = 0,5625\text{ MHz}$ $K = -12, \dots, 9$
Débit d'éléments de code dans le signal SAS GLONASS	511 kbit/s
Débit d'éléments de code dans le signal SAS du système SBAS-GLONASS	511 kbit/s
Débit d'éléments de code dans le signal SAS des pseudolites	511 kbit/s
Débit binaire de données pour la navigation GLONASS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation SBAS-GLONASS, avec CED, débit 1/2	500 symboles/s
Taux d'erreur sur les mots (1 mot = 250 bits d'information) pour le système SBAS-GLONASS	1×10^{-3}
Débit binaire de données pour la navigation dans le pseudolite	50 bit/s
Niveau minimal de la puissance reçue dans le système GLONASS à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance reçue dans le système SBAS-GLONASS à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance reçue des pseudolites à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance moyenne reçue des pseudolites à l'entrée de l'antenne	-140 dBW
Gain minimal d'antenne vers un satellite GLONASS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain minimal d'antenne vers un satellite SBAS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain minimal d'antenne vers un pseudolite	-21 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante du filtre RF à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	19,69 MHz
Bande passante du filtre de pré-corrélation, à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	16,41 MHz
Temps de récupération après surcharge	1-5 µs
Température de bruit du récepteur	400 K
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-149 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-155 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-146 dBW/MHz
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-152 dBW/MHz

⁽¹⁾ Les récepteurs en question sont prévus pour recevoir des signaux SAS GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$, des signaux SAS SBAS-GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = 5, \dots, 9$, et des signaux SAS de pseudolites émis aux fréquences définies par l'indice $K = -12, \dots, -8$.

⁽²⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système GLONASS, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

⁽³⁾ Dans le cas des récepteurs GLONASS la résistance au brouillage est mesurée sur la base des paramètres de fonctionnement suivants: erreur de poursuite (1σ): 0,8 m, taux d'erreur sur les mots: 1 pour 10^4 mots. Cette erreur de poursuite ne tient pas compte de l'incidence de la propagation par trajets multiples du signal, des effets troposphériques et ionosphériques ainsi que des erreurs sur les éphémérides et des erreurs d'horloge des satellites GLONASS.

TABLEAU 8
Récepteurs du système GLONASS du cinquième type

Fréquences de porteuse L1 ⁽¹⁾	$F_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1$ avec: $f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$ $\Delta f_1 = 0,5625\text{ MHz}$ $K = -12, \dots, 9$
Débit d'éléments de code dans le signal PAS GLONASS	5,11 Mbit/s
Débit d'éléments de code dans le signal SAS du système SBAS-GLONASS	511 kbit/s
Débit d'éléments de code dans le signal SAS des pseudolites	511 kbit/s
Débit binaire de données pour la navigation GLONASS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation SBAS-GLONASS, avec CED, débit 1/2	500 symboles/s
Taux d'erreur sur les mots (1 mot = 250 bits d'information) pour le système SBAS-GLONASS	1×10^{-3}
Débit binaire de données pour la navigation dans le pseudolite	50 bit/s
Niveau minimal de la puissance reçue du signal PAS dans le système GLONASS à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance reçue du signal SAS dans le système SBAS-GLONASS à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance du signal SAS reçue des pseudolites à l'entrée de l'antenne	-161 dBW
Niveau minimal de la puissance moyenne des signaux reçus des pseudolites à l'entrée de l'antenne	-140 dBW
Gain minimal d'antenne vers un satellite GLONASS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain minimal d'antenne vers un satellite SBAS à un angle d'élévation de 5°	-4,5 dBic
Gain minimal d'antenne vers un pseudolite	-21 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne dans l'hémisphère inférieur	-10 dBic
Bande passante du filtre RF à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	19,69 MHz
Bande passante du filtre de pré-corrélation, à 3 dB, fréquence centrale 1 601,156 MHz	16,41 MHz
Temps de récupération après surcharge	1-5 µs
Température de bruit du récepteur	400 K
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-149 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-155 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ^{(2), (3)}	-146 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ^{(2), (3)}	-152 dB(W/MHz)

⁽¹⁾ Les récepteurs en question sont prévus pour recevoir des signaux SAS GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = -7, \dots, 0, 1, \dots, 4$, des signaux SAS SBAS-GLONASS émis aux fréquences définies par l'indice $K = 5, \dots, 9$, et des signaux SAS de pseudolites émis aux fréquences définies par l'indice $K = -12, \dots, -8$.

⁽²⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système GLONASS, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

⁽³⁾ Dans le cas des récepteurs GLONASS la résistance au brouillage est mesurée sur la base des paramètres de fonctionnement suivants: erreur de poursuite (1σ): 0,8 m, taux d'erreur sur les mots: 1 pour 10^4 mots. Cette erreur de poursuite ne tient pas compte de l'incidence de la propagation par trajets multiples du signal, des effets troposphériques et ionosphériques ainsi que des erreurs sur les éphémérides et des erreurs d'horloge des satellites GLONASS.

Annexe 3

Caractéristiques du récepteur E-NSS-1

Le Tableau 9 indique les caractéristiques des récepteurs de radionavigation par satellite utilisés dans la bande 1 559-1 610 MHz dans le cadre du futur système E-NSS-1 destiné à des applications aéronautiques, maritimes et terrestres.

Ces récepteurs peuvent également fonctionner dans la bande 1 215-1 260 MHz.

TABLEAU 9

Domaine de fréquence	1 587,696-1 591,788 MHz (E1) 1 559,052-1 563,144 MHz (E2)
Fréquences porteuses	1 589,742 MHz (E1) 1 561,098 MHz (E2)
Débits de code pseudo-aléatoire	3,069 Mélément/s (E1 et E2)
Zone de rayonnement de l'antenne	Hémisphérique
Gain d'antenne maximal (zénith)	3 dBi
Gain minimal d'antenne (angle d'élévation de 5°)	-4,5 dBi
Température de bruit du système du récepteur	350 K
Niveau minimal de puissance de signal reçue à la sortie d'antenne	-157,3 dBW
Rapport C/N_0 nécessaire pour la navigation de précision	41,2 dB (Hz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur ⁽¹⁾	-141,3 dBW dans toute bande de 1 MHz
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur ⁽¹⁾	-151,3 dBW

⁽¹⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système E-NSS-1, d'après l'analyse de code aléatoire. Il est nécessaire que le seuil tienne compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

Annexe 4

Caractéristiques des récepteurs LSATNAV/MSATNAV

La constellation LSATNAV est constituée d'une combinaison de deux types de satellites: la constellation principale est une constellation de satellites sur orbite terrestre basse, complétée par des satellites OSG. De manière analogue, la constellation MSATNAV est constituée d'un ensemble de satellites sur orbite terrestre moyenne, susceptible d'être complétée par des satellites OSG. Ces satellites OSG peuvent être d'une part des satellites actuellement utilisés dans des systèmes SBAS (signaux de type GPS à une fréquence GPS de 1 575,42 MHz, modulés par des données suivant un débit de symboles de 500 bit/s), ou d'autre part, les satellites OSG affectés spécialement aux systèmes LSATNAV/MSATNAV (signaux à la fréquence des systèmes LSATNAV/MSATNAV modulés par des données suivant un débit de symboles de 500 bit/s).

Un récepteur LSATNAV/MSATNAV se compose essentiellement des éléments suivants:

- une antenne omnidirectionnelle capable de recevoir tous les signaux de satellites LSATNAV/MSATNAV visibles et un système L1-GPS-SBAS;
- un récepteur/unité de traitement de signal;
- un processeur de données de navigation et des dispositifs d'entrée/sortie.

Les spécifications opérationnelles exigent la conformité aux normes et pratiques recommandées de l'OACI et s'avèrent dans le premier cas, équivalentes à celles des récepteurs SBAS-GPS. Ces récepteurs SBAS sont des récepteurs terrestres, maritimes et aéronautiques conçus pour fournir un niveau de service de base.

Dans le second cas, les spécifications opérationnelles doivent se conformer aux normes et pratiques recommandées de l'OACI et sont équivalentes à celles concernant les récepteurs GBAS-GPS. Toutefois la présente Annexe ne mentionne pas les caractéristiques des récepteurs GBAS.

Dans les deux cas, pour obtenir la précision voulue, le récepteur/l'unité de traitement de signal doit pouvoir traiter les mesures à deux fréquences pour les corrections ionosphériques et doit pouvoir traiter les données d'une corrélation étroite d'espacement d'éléments dans une boucle de poursuite de codes.

La présente Annexe décrit les caractéristiques techniques des récepteurs SBAS LSATNAV/MSATNAV.

Dans les indications présentées dans le Tableau 10, les niveaux de puissance à l'entrée de l'antenne désignent la puissance qui serait reçue par une antenne isotrope circulaire polarisée de polarité appropriée, tandis que les niveaux de puissance à la sortie de l'antenne désignent les valeurs obtenues en tenant compte du gain d'antenne dans la direction considérée de signal ou de la source de brouillage.

TABLEAU 10

Récepteur de navigation aérienne SBAS LSATNAV/MSATNAV (niveau de service de base)

Fréquence centrale de porteuse L1	1 575,420 MHz 1 589,742 MHz 1 561,098 MHz
Fréquence centrale de porteuse L2	1 216,347 MHz 1 217,370 MHz 1 258,290 MHz
Débit d'éléments de code C/A	1,023 Mbit/s
Débit binaire de données pour la navigation GPS	50 bit/s
Débit binaire de données pour la navigation, SBAS, avec CED, débit 1/2	500 symboles/s
Niveau minimal de la puissance reçue à l'entrée de l'antenne (SBAS)	–161 dBW
Gain minimal d'antenne vers un satellite à un angle d'élévation de 5 degrés	–4,5 dBic
Gain maximal d'antenne dans l'hémisphère supérieur	+7 dBic
Gain d'antenne supposé dans l'hémisphère inférieur	–10 dBic
Facteur de bruit du récepteur	4,4 dB
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode poursuite ⁽¹⁾	–150,5 dBW
Seuil de brouillage cumulatif bande étroite du récepteur en mode acquisition ⁽¹⁾	–156,5 dBW
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode poursuite ⁽¹⁾	–140,5 dB(W/MHz)
Seuil de brouillage cumulatif large bande du récepteur en mode acquisition ⁽¹⁾	–146,5 dB(W/MHz)

⁽¹⁾ Le seuil de brouillage tient déjà compte des effets du brouillage à l'intérieur du système LSATNAV/MSATNAV, en s'appuyant sur l'analyse du code aléatoire. Le seuil doit tenir compte de tous les autres brouillages cumulatifs.

Annexe 5

Marge de sécurité des applications de radionavigation liées à la sécurité de la vie humaine

1 Introduction

Une pratique en vigueur depuis longtemps consiste à réserver une portion du bilan de liaisons de brouillage à une marge de sécurité afin d'assurer la protection du service de radionavigation. Ces marges sont généralement de l'ordre de 6 à 10 dB, ou davantage. De plus, la définition d'une marge pour les services de sécurité de la radionavigation a fait l'objet de nombreuses initiatives dans le cadre de l'UIT, comme en témoigne par exemple ce passage d'un ancien Rapport de l'UIT-R:

«Quelles que soient les intentions initiales du planificateur du spectre radioélectrique, il ne fait aucun doute que la pression résultant des demandes d'attributions additionnelles aux divers services de radiocommunication peut amener à considérer effectivement les critères de protection aéronautique comme des critères de partage avec les services non aéronautiques. De ce fait, un service de sécurité doit prendre beaucoup de précautions afin que tout service radioélectrique partageant la même bande soit soumis aux contraintes nécessaires pour préserver une marge suffisante dans toutes les circonstances vraisemblables, de sorte que le brouillage préjudiciable total n'excède jamais les critères de protection applicables.»

De plus, la Recommandation UIT-R M.1318 – Modèle d'évaluation de la protection contre les brouillages du service de radionavigation par satellite pour la bande 1 559-1 610 MHz, contient dans son Annexe 1 un modèle d'évaluation des niveaux de brouillage du service de radionavigation par satellite. Ce modèle spécifie la nécessité de définir un facteur appelé: marge de protection supplémentaire (dB). Il est décrit comme: marge de protection supplémentaire tenant compte de facteurs tels que propagation par trajets multiples.

2 Objet de la marge de sécurité

L'observation d'une marge de sécurité (appelée parfois facteur de sécurité publique) est essentielle pour les applications liées à la sécurité de la vie humaine, vu le risque de perte de vies humaines créé par des brouillages radioélectriques dont l'existence est réelle mais non quantifiable. Aussi est-il indispensable de prendre en considération toutes les sources de brouillage afin d'assurer la prise en charge des applications liées à la sécurité de la vie humaine.

3 Applications des marges de sécurité

L'utilisation des marges de sécurité dans les systèmes de navigation est une pratique bien établie. L'Annexe 10 de l'OACI (pièce jointe G, Tableau G-2) spécifie une marge de sécurité de 6 dB pour les systèmes d'atterrissage en hyperfréquences (MLS, *microwave landing system*). Pour les systèmes d'atterrissage aux instruments (ILS, *instrument landing system*), une marge de sécurité de 8 dB doit être observée (voir Recommandation UIT-R SM.1009, Appendice 3 de l'Annexe 2). Dans chaque cas, la marge est définie en fonction de la puissance de la porteuse du système de navigation. A cet effet, pour tester le fonctionnement des systèmes de ce type, la puissance du signal est limitée par rapport à son niveau nominal en tenant compte de la marge de sécurité, puis testée afin de déterminer si le système offre la qualité de fonctionnement requise en présence des

brouillages. Autrement dit, le constructeur est tenu de concevoir le matériel en fonction du plus haut niveau de brouillage escompté, avec un niveau de signal utile inférieur au niveau normal (compte tenu de la marge de sécurité). Dans le cas du GNSS, cette approche n'est pas possible, puisque le fait de réduire de 6 dB au moins la puissance de la porteuse au-dessous de la puissance nominale provoquerait la perte des satellites dans l'algorithme de poursuite du récepteur. Il en est ainsi parce que la puissance reçue du satellite GNSS est relativement fixe, de telle sorte que les récepteurs terrestres fonctionnent sur une gamme dynamique limitée.

Vis-à-vis des systèmes MLS et ILS, l'approche suivie par le GNSS définit un niveau de brouillage en fonction duquel l'appareil doit être conçu pour pouvoir fonctionner conformément aux spécifications, et en déduit, après application de la marge de sécurité, un niveau maximal de brouillage escompté.

Pour le système GNSS, le rapport C/N constitue le paramètre critique de fonctionnement du récepteur. Il s'agit de la puissance porteuse C exprimée en dBW rapportée à la densité spectrale de puissance du bruit total N_T (dB(W/Hz)). Pour le GNSS, l'amélioration qui résulte du rapport C/N est nettement inférieure à la marge de sécurité proprement dite. Par exemple, une marge de sécurité telle qu'elle est définie pour le GNSS égale à 6 dB (ce qui signifie que le brouillage doit être réduit de 6 dB) se traduit par un accroissement du rapport C/N de 2,48 dB seulement. Par comparaison, l'augmentation du rapport C/N dans le cas des systèmes MLS et ILS serait égale à la marge de sécurité, c'est-à-dire à 6 dB en l'occurrence.

4 Marge de sécurité du système GNSS

Le niveau de brouillage admissible par les services non aéronautiques doit différer notablement du niveau de brouillage de référence en tenant compte de la marge de sécurité. La définition de la valeur limite de -70 dB(W/MHz) adoptée dans la Recommandation UIT-R M.1343 suppose une marge de sécurité de 5,6 dB. Toutefois, pour les applications générales, cette marge est légèrement augmentée pour atteindre 6 dB, valeur comprise dans l'intervalle défini pour les services de sécurité, et adopté par l'UIT-R pour d'autres applications liées à la sécurité de la vie humaine, tel qu'indiqué plus haut. Plus précisément, le brouillage du SBAS du GNSS est pris en compte de la façon suivante:

Pour les récepteurs de navigation aérienne SBAS offrant une approche de précision de catégorie I (voir Annexe 1), le seuil de brouillage est $-140,5$ dB(W/MHz). Le seuil de brouillage comprend les deux éléments suivants: le bruit thermique du récepteur et le brouillage du satellite à l'intérieur du système d'après l'analyse du code aléatoire. Une marge de sécurité est ensuite prise en compte afin de refléter les incertitudes aéronautiques prévues; l'autobrouillage dans le futur système GNSS (par exemple, pseudolites); les sources de brouillage inconnues (par exemple, les interférences RF industrielles); et enfin le brouillage à l'intérieur du système d'après l'analyse de codes particuliers. Le niveau de brouillage admissible est de $-146,5$ dB(W/MHz) sur la base du seuil de brouillage et de la marge de sécurité convenue. Cette valeur doit assurer la protection contre le brouillage cumulatif dû aux services non aéronautiques.

Lorsque la présence simultanée de plusieurs sources de brouillage est possible, il faudra répartir le niveau admissible de $-146,5$ dB(W/MHz) entre les différentes sources de brouillage potentiel. Dans l'hypothèse où un récepteur du GNSS subit le niveau maximal de brouillage dû à une station terrienne mobile du SMS à une distance de séparation de 30 m (selon l'hypothèse retenue pour l'élaboration de la Recommandation UIT-R M.1343), tout brouillage supplémentaire est alors exclu. Cette seule station terrienne mobile produit le niveau maximal de brouillage cumulatif à l'entrée du récepteur GNSS.

Dans la situation ci-dessus, lorsque le niveau des sources de brouillage non transitoires est limité à 10 dB au-dessous de -70 dB(W/MHz), le brouillage cumulatif du GNSS augmentera de 0,5 dB.

En mode acquisition, la sensibilité au brouillage du récepteur GNSS est réduite de 6 dB. Il faut donc réduire en conséquence le niveau de brouillage cumulatif admissible afin de protéger ce mode de fonctionnement. Lors de la détermination des niveaux maximaux des émissions préjudiciables provenant des stations terriennes mobiles de systèmes mobiles à satellites non OSG, seul le mode de poursuite a été pris en considération, en raison du caractère transitoire des effets du brouillage dû à ces stations terriennes mobiles.

Il convient de signaler que les récepteurs GNSS exigent une protection supplémentaire de 10 dB lorsque le signal brouilleur occupe une largeur de bande inférieure ou égale à 700 Hz.

La protection des applications du GNSS liées à la sécurité de la vie humaine exige une marge de sûreté aéronautique d'au moins 6 dB. Des marges supplémentaires peuvent s'avérer indispensables, en fonction:

- des spécifications opérationnelles relatives au RNSS, en matière notamment de précision, de disponibilité, de continuité et d'intégrité;
- de l'environnement opérationnel, notamment du relief et des conditions météorologiques;
- de la configuration du système RNSS, notamment des systèmes complémentaires;
- de l'incidence des statistiques sur tous les paramètres pris en considération dans les analyses de brouillage, à moins que la situation la plus défavorable ait été supposée; et
- des sources de brouillages RF qui n'ont pas été spécifiquement prises en compte dans les analyses de brouillage, mais qui risquent de contribuer au brouillage du GNSS.

5 Répartition des risques de brouillage

Les analyses de brouillage qui sont utilisées pour les réseaux de communications et qui reposent sur la notion de non-disponibilité du service, ne sont pas applicables aux services liés à la sécurité de la vie humaine puisque l'interruption d'un service de ce type n'est pas acceptable dès lors que sa fréquence dépasse un seuil de 1×10^{-6} /h (voir ci-dessous). De plus, elles ne prennent pas en compte les rayonnements non essentiels imputables au vieillissement ou au mauvais fonctionnement du matériel, ainsi qu'aux variations de la qualité de fonctionnement observées d'un appareil à l'autre. De plus, il est tentant de ne pas tenir compte de l'effet des sources de brouillage dont la présence n'est pas systématique. Toutefois, les spécialistes de l'aéronautique s'emploient à quantifier les risques associés à des événements susceptibles de provoquer des interruptions du service ou d'être à l'origine d'informations trompeuses, même à des événements qui peuvent être considérés comme très improbables.

Les équipements aéronautiques doivent impérativement être conçus pour prendre en charge des événements très rares, dans l'hypothèse où ces derniers se produisent effectivement. Puisque le nombre d'heures de vol des appareils civils se compte par millions chaque année, la probabilité d'occurrence à un endroit quelconque au cours d'une année d'un événement très rare (1×10^{-6} /h) est une quasi-certitude. Aussi importe-t-il de prendre conscience de la nécessité d'évaluer les risques en cause lors de la réalisation des analyses de brouillage.

Les normes de l'OACI concernant les récepteurs SBAS et GBAS aéroportés du GNSS exigent l'annonce d'une alerte de navigation lorsque le niveau de sensibilité d'un récepteur aux brouillages RF est dépassé. L'analyse des risques associés au GNSS évaluée à 1×10^{-5} par approche la probabilité de perte de continuité due à un brouillage ne provenant pas du GNSS, lors des approches de catégorie I. L'exigence de continuité vise à limiter la fréquence des événements de brouillages RF à un événement pour 100 000 approches. Au cours des approches de précision, la marge de

sécurité aéronautique de 6 dB risque d'être absorbée par les variations du rapport C/N du GNSS, tel qu'indiqué dans le § 2. Aussi, toute augmentation du niveau de brouillage dû aux services non aéronautiques au-delà de la limite de $-146,5$ dB(W/MHz) (d'après l'exemple cité au § 4) provoquerait-elle un événement de perte de continuité au niveau du récepteur GNSS. De manière analogue, toute augmentation du niveau de brouillage à l'intérieur du système GNSS, ayant pour effet de dépasser la marge de sécurité de 6 dB, provoquerait également une perte de continuité au niveau du récepteur du GNSS, en présence d'un signal de perturbation radioélectrique d'une intensité atteignant le seuil de brouillage. La définition de la marge de sécurité propre à l'UIT indiquée au § 2 pour les systèmes d'atterrissage aux instruments privilégie cette interprétation. Tel qu'indiqué, les perturbations radioélectriques sont alors évaluées pour une valeur minimale du rapport C/N , en certains points de l'espace couverts par le système ILS. Autrement dit, l'existence d'une marge de sécurité ne revient pas à attribuer une probabilité au signal de brouillage.

6 Mises en conformité

Tout projet de partage d'une bande SRNA/SRNS doit prendre en considération les modes de défaillance du service fourni. Le projet doit nécessairement définir toutes les défaillances susceptibles de menacer l'ancien service de sécurité et fournir la description de ces modes de défaillance. Il faut également que le projet en question traite des modalités de notification aux usagers du service de sécurité et analyse le temps nécessaire à cette notification. Le projet doit en outre indiquer comment les principales caractéristiques de toutes les défaillances à envisager seront archivées en vue d'une analyse ultérieure. Parmi les défaillances en question, devraient figurer notamment les glissements de fréquences dans la bande d'émission ou les émissions hors bande; les glissements à l'intérieur du spectre d'émission –par exemple bande étroite et large bande– devraient également être pris en compte.

Le projet doit en outre indiquer précisément comment la marge de sécurité proposée serait observée en présence de tous les scénarios de fonctionnement appropriés. Ces analyses devraient notamment comporter des calculs d'affaiblissement sur la voie de transmission depuis l'émetteur du service proposé jusqu'à tous les usagers du service de sécurité. Ces analyses devraient prendre en considération tous les niveaux de proximité probables du service proposé par rapport aux utilisateurs du service de sécurité en situation d'urgence qui se trouvent dans des avions, à bord de navires ou au sol. Par ailleurs, le projet devrait aussi étudier l'éventualité de la présence de plusieurs sources de brouillage, ainsi que la proximité probable du service proposé par rapport aux installations radioélectriques fixes utilisées par le service de sécurité.

Enfin, le projet devrait examiner l'incidence sur le service de sécurité des ajouts récents ou prévus.

7 Conclusions

7.1 La marge de sécurité de 6 dB du GNSS se traduit par une marge limitée à 2,48 dB pour le rapport C/N , en supposant un facteur de bruit du récepteur de 4,4 dB. Cette valeur du rapport C/N est inférieure aux marges de sécurité établies pour d'autres systèmes de navigation définis par l'OACI, mais elle est comprise dans l'intervalle des valeurs de marges admises au sein de l'UIT-R pour les services de sécurité.

7.2 L'évaluation de la sécurité établie par les services de radionavigation exige que la probabilité d'une source de brouillage RF dû à des services non aéronautiques d'une intensité supérieure à sa limite de protection ne dépasse pas le niveau de 1 pour 100 000 approches de catégorie I. Ce risque de perte de continuité n'est pas pris en compte dans la marge de sécurité du GNSS.

7.3 Le niveau admissible de brouillage dû à des services non aéronautiques est un nombre fixe et correspond au brouillage cumulatif dû à l'ensemble des sources connues. En cas de création de nouveaux services, leurs émissions doivent être limitées en intensité de façon à ne pas dépasser le niveau total admissible.
