

RECOMMANDATION UIT-R S.1427-1

Méthode et critères d'évaluation des brouillages causés par les émetteurs des systèmes d'accès hertziens/réseaux locaux hertziens (WAS/RLAN)* de Terre aux liaisons de connexion du service mobile par satellite non géostationnaires dans la bande 5 150-5 250 MHz**

(Question UIT-R 248/4)

(2000-2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation énonce une méthode et des critères permettant d'évaluer les brouillages causés par les émetteurs des systèmes d'accès hertziens/réseaux locaux hertziens (WAS/RLAN) de Terre aux liaisons de connexions du SMS non OSG (Terre vers espace) dans la bande 5 150-5 250 MHz et tient compte également des résultats de la CMR-03 sur la question.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la mise en place généralisée d'émetteurs des systèmes d'accès hertziens/réseaux locaux hertziens (WAS/RLAN) dans la bande 5 150-5 250 MHz risque de causer des brouillages aux liaisons montantes de connexion des systèmes non OSG du service mobile par satellite (SMS) fonctionnant dans cette bande;
- b) que la mise en place généralisée d'émetteurs WAS/RLAN dans la bande 5 150-5 250 MHz risque de réduire sensiblement la capacité des répéteurs de satellite du SMS;
- c) que les émetteurs WAS/RLAN dans la bande 5 150-5 250 MHz fonctionnent, dans de nombreux pays, sans licence ou avec une licence de classe;
- d) que la couverture des faisceaux assurant des liaisons de connexion du SMS non OSG est régionale et/ou mondiale;
- e) qu'il ne peut être rendu compte des brouillages causés par les WAS/RLAN qu'en termes d'accroissement global et constant du bruit de fond des liaisons de connexion du SMS non OSG, et de ses conséquences sur la réduction de la capacité du satellite;
- f) qu'il est dit, au point 3 du *décide* de la Résolution 229 (CMR-03), que les administrations peuvent vérifier si les niveaux de puissance surfacique cumulative indiqués dans la Recommandation UIT-R S.1426 ont été dépassés, ou s'ils le seront dans l'avenir, afin de permettre à une future conférence compétente de prendre les mesures voulues;

* Dans la présente Recommandation, le terme WAS/RLAN désigne les systèmes d'accès hertziens/réseaux locaux hertziens, ou tout autre dispositif mobile ou fixe offrant une connectivité à un réseau local (comme, par exemple, RLAN à hautes performances (HIPERLAN), U-NII, réseau local radioélectrique (WLAN) ou autres; voir également les Recommandations UIT-R F.1244 et UIT-R M.1450).

** La présente Recommandation devrait être portée à l'attention des Commissions d'études 8 et 9 des radiocommunications, pour information.

- g) qu'une méthode permettant d'évaluer les brouillages causés par les émissions WAS/RLAN aux récepteurs de liaisons de connexion de satellites non OSG du SMS, ainsi que de traiter les données mesurées, est nécessaire;
- h) que l'évolution des WAS/RLAN sur le marché se fera de façon indépendante, au niveau national ou régional;
- i) qu'il est nécessaire de protéger les liaisons de connexion du SMS non OSG des brouillages causés par les WAS/RLAN,

notant

- a) que la bande 5 150-5 250 MHz est soumise à des sources de brouillages (y compris à des rayonnements non désirés d'émetteurs dans des bandes proches) causés à des liaisons de connexion du SMS non OSG, qui s'ajoutent à ceux causés par les émetteurs WAS/RLAN;
- b) que les méthodes énoncées dans les Annexes 1, 2 et 3 sont applicables uniquement aux constellations non OSG composées d'un grand nombre de satellites suffisamment espacés,

reconnaissant

- a) que la bande 5 150-5 250 MHz est attribuée à l'échelle mondiale au service fixe par satellite (SFS) (Terre vers espace) pour les liaisons de connexion du SMS non OSG à titre primaire avec égalité des droits sans restriction dans le temps, conformément au numéro 5.447A du Règlement des radiocommunications (RR);
- b) que la bande 5 150-5 250 MHz est, de plus, attribuée à l'échelle mondiale à titre primaire au service de radionavigation aéronautique;
- c) que la bande 5 150-5 216 MHz est, de plus, attribuée aux liaisons de connexion du service de radiopéage par satellite (espace vers Terre), sous réserve du numéro 5.446 du RR;
- d) que la bande 5 150-5 216 MHz est, de plus, attribuée au titre du numéro 5.447B du RR et des dispositions du numéro 9.11A du RR au SFS (espace vers Terre) à l'échelle mondiale à titre primaire pour les liaisons de connexion du SMS non OSG;
- e) que la bande 5 150-5 250 MHz a été attribuée au service mobile conformément aux dispositions des numéros 5.446A et 5.446B du RR ainsi que la Résolution 229 (CMR-03);
- f) que la bande 5 150-5 250 MHz est attribuée, aux termes du numéro 5.447 du RR, au service mobile dans un certain nombre de pays sous réserve d'une coordination au titre du numéro 9.21 du RR;
- g) que la Résolution 229 (CMR-03) limite les émissions WAS/RLAN à une utilisation à l'intérieur des bâtiments,

recommande

- 1 d'évaluer les brouillages causés par les émissions WAS/RLAN aux récepteurs de liaisons de connexion de satellites du SMS non OSG, fonctionnant dans la bande 5 150-5 250 MHz, en fonction de l'accroissement ($\Delta T_{\text{satellite}}$) de la température de bruit du satellite ($T_{\text{satellite}}$);
- 2 de faire en sorte que le rapport global $\Delta T_{\text{satellite}}/T_{\text{satellite}}$ des émissions WAS/RLAN ne dépasse pas 3%, afin de protéger convenablement les liaisons de connexion du SMS non OSG dans la bande 5 150-5 250 MHz;
- 3 de permettre au système non OSG de liaisons de connexion faisant l'objet de brouillages, si les brouillages causés par les émissions WAS/RLAN au récepteur de liaisons de connexion de satellites non OSG du SMS sont mesurés, d'utiliser à cette fin la méthode décrite à l'Annexe 2 ou à

l'Annexe 3 de la présente Recommandation. L'Annexe 1 contient des renseignements généraux sur l'une et l'autre méthodes;

4 de considérer les Notes ci-après comme faisant partie de la présente Recommandation.

NOTE 1 – L'incidence du brouillage cumulatif à long terme causé par les WAS/RLAN aux liaisons de connexion du SMS non OSG en ce qui concerne la réduction de la capacité du satellite non OSG du SMS doit aussi être examinée conjointement avec la méthode proposée dans le *recommande* ci-dessus, et ce afin de garantir que les brouillages causés aux satellites non OSG du SMS n'entraînent pas une réduction de la capacité du satellite disponible inférieure ou égale à 1%. Cette valeur appelle peut-être un complément d'étude.

NOTE 2 – Le terme «cumulatif» signifie que, dans le calcul du brouillage causé au faisceau récepteur du satellite, il faut tenir compte de tous les dispositifs WAS/RLAN qui sont situés dans le champ de visibilité du faisceau récepteur des liaisons de connexion du satellite non OSG.

NOTE 3 – Les Annexes 2 et 3 de la présente Recommandation décrivent deux options concernant la mise en œuvre d'un dispositif de calcul à bord d'un satellite visant à déterminer le bruit et le brouillage cumulatifs qui seraient captés sur un satellite en exploitation du même type que le reste des satellites de la constellation. En outre, les Annexes décrivent les différentes méthodes permettant de traiter, au sol, les données mesurées sur le satellite.

NOTE 4 – Les méthodes décrites dans les Annexes 2 et 3 peuvent être utilisées pour calculer le brouillage cumulatif dans le récepteur de la station spatiale de la liaison de connexion de tout système à satellites non OSG du SMS pour obtenir des résultats explicites, les paramètres techniques de la constellation LEO-D tels que décrits dans la Recommandation UIT-R M.1184 sont utilisés. Des études supplémentaires pourront être nécessaires pour déterminer la part de ce brouillage cumulatif qui est causé par les émetteurs WAS/RLAN. Idéalement, ce travail pourra être effectué lorsque les résultats de mesure obtenus à l'aide de l'une des méthodes décrites dans les Annexes 2 et 3 seront disponibles.

Annexe 1

Mesure du bruit et du brouillage cumulatifs dans le récepteur de la station spatiale de la liaison de connexion Terre vers espace à 5 GHz d'un système à satellites LEO-D du SMS

1 Introduction

La présente Annexe décrit la manière de mesurer le brouillage cumulatif dans l'antenne de réception du récepteur de station spatiale d'une liaison de connexion Terre vers espace à 5 GHz d'un système à satellites non OSG du SMS. L'objectif général de l'Annexe 2 ou 3 étant d'estimer avec une grande précision l'amplitude du brouillage cumulatif causé par les émetteurs RLAN, la présente Annexe décrit en termes généraux la manière dont la puissance totale reçue au niveau de l'antenne du satellite peut être mesurée avec une erreur quadratique moyenne d'environ 0,03% du bruit thermique et de fond dans la liaison montante.

2 Récepteur du radiomètre de Dicke

Le radiomètre de Dicke est utilisé depuis des décennies par les radioastronomes et par d'autres scientifiques pour mesurer des niveaux très faibles de bruit gaussien dans un environnement présentant des niveaux extrêmement élevés de bruit gaussien dans le récepteur lui-même.

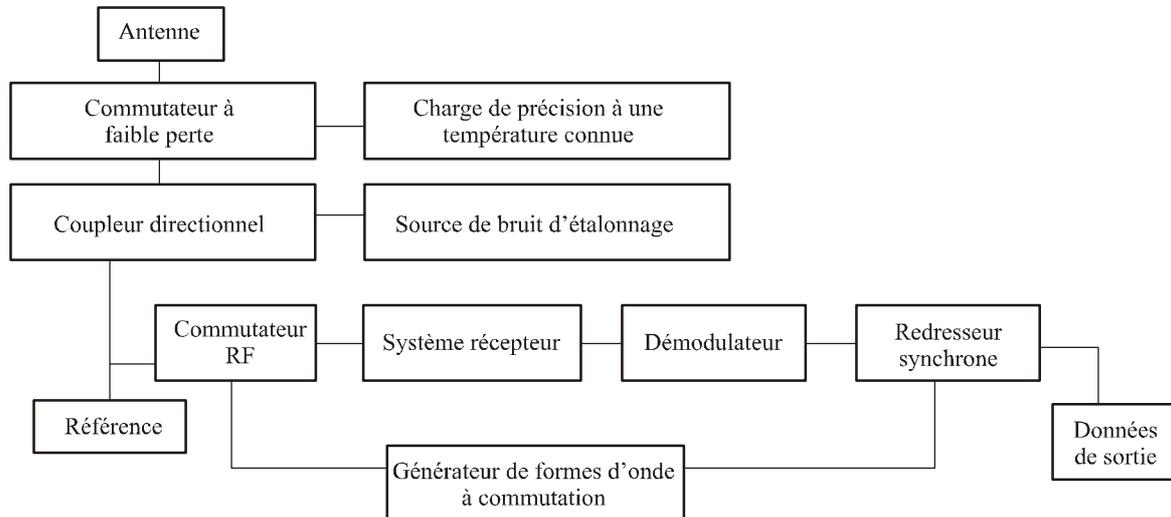
L'application examinée dans ce document est pratiquement identique, dans le sens où le signal de brouillage cumulatif provenant d'un très grand nombre d'émetteurs de RLAN présenterait des caractéristiques stochastiques gaussiennes indépendantes des caractéristiques détaillées d'une transmission individuelle. De même, les caractéristiques stochastiques du bruit de fond du récepteur seraient gaussiennes dans des applications d'exploration de la Terre par satellite (passive), d'applications de recherche spatiale (passive), d'applications de radioastronomie ainsi que pour les mesures des brouillages causés par les systèmes WAS/RLAN décrits dans la présente Recommandation.

Un schéma fonctionnel d'un radiomètre de Dicke générique est représenté dans la Fig. 1. En règle générale, le radiomètre de Dicke est conçu autour du module «système récepteur», qui est en fait le récepteur de la liaison de connexion du SMS à 5 GHz avant l'adjonction des modules du radiomètre de Dicke. Les modules additionnels permettent au récepteur:

- d'intégrer l'enveloppe détectée du signal gaussien à large bande dans les étages RF et FI du récepteur satellite lui-même pour un temps de mesure τ ;
- d'étalonner ses mesures de façon que les variations de gain du récepteur dans le temps n'aient pas d'incidence sur la précision de la mesure, et que les estimations du niveau de bruit mesuré ne tiennent pas compte du bruit interne au récepteur.

Pour cela, on utilise deux sources de bruit de référence que l'on compare au signal gaussien entrant à mesurer. L'un de ces signaux de référence peut être comparé au bruit dans le récepteur et l'autre au signal externe mesuré.

FIGURE 1
Radiomètre de Dicke générique



1427-01

3 Qualité de fonctionnement du radiomètre de Dicke

Un radiomètre de Dicke est destiné à commuter rapidement entre l'antenne et une charge ou une source de bruit de référence, à une vitesse supérieure à celle des variations de gain les plus rapides. En règle générale, les fluctuations de gain ont un spectre d'une largeur d'au moins 5 Hz; le commutateur RF devrait commuter entre l'antenne et la référence à une vitesse d'au moins 30 Hz environ. Les variations de gain n'ont alors un effet que sur la différence entre les entrées. Idéalement, la température de référence devrait par conséquent se rapprocher le plus possible de la température de l'antenne. Une antenne pointant vers le sol présentera toujours une température d'au

moins 150 K environ (dans le cas contraire, la température sera plus vraisemblablement de 250 K). Une charge ou une source de bruit adaptée serait par conséquent une référence pratique. En effet, on pourrait utiliser un atténuateur à diode PIN pour adapter les entrées du récepteur de telle façon que ce dernier soit toujours équilibré.

Une source de bruit d'étalonnage ajoute une quantité connue de bruit au récepteur, ce qui augmente la puissance d'entrée d'une quantité connue. La commutation vers une charge adaptée est utile au processus d'étalonnage, dans la mesure où elle permet d'étalonner le niveau de bruit de base. Toutefois, lorsque la charge adaptée est connectée, l'antenne ne l'est pas, ce qui fera varier le niveau du bruit de base.

La sortie du radiomètre de Dicke est une mesure non biaisée du niveau de puissance du signal reçu par l'antenne satellite à 5 GHz sur la largeur de bande B du récepteur. L'erreur quadratique moyenne de cette mesure est la suivante:

$$\Delta T_{\text{erreur}} = T_{\text{sys}} / (B\tau)^{0,5} \quad (1)$$

où

- ΔT_{erreur} : erreur quadratique moyenne dans la mesure de la température de bruit du signal aléatoire à la sortie de l'antenne
- T_{sys} : température du bruit total dans le récepteur, la somme de la température de bruit du récepteur du satellite et la température de bruit du signal reçu, comme il est décrit dans la Recommandation UIT-R SA.515
- B : largeur de bande (Hz) du récepteur
- τ : temps d'intégration du récepteur (s)

Si le niveau de bruit mesuré est de 3% du bruit total dans le récepteur, et que l'erreur quadratique moyenne dans la mesure de cette quantité doit être nécessairement de l'ordre de 1% de la mesure, la quantité $(B\tau)^{0,5}$ doit être de l'ordre de 3×10^{-4} .

4 Radiomètres qu'il convient d'utiliser dans le système LEO-D

La conception des radiomètres utilisés dans le système LEO-D peut être simplifiée s'il est possible d'utiliser un canal de référence pour la mesure du bruit dans le spectre au voisinage de la bande de référence immédiatement au-dessous de 5 150 MHz, et si ces mesures sont utilisées pour estimer les brouillages au-dessus de 5 150 MHz. Le radiomètre en orbite nécessaire pour mesurer avec précision le brouillage cumulatif dans le récepteur du satellite dans la bande 5 150 MHz-5 250 MHz serait ainsi simplifié comparé au radiomètre de Dicke générique représenté dans la Fig. 1. Par ailleurs, cette modification des mesures prises par le radiomètre a pour effet de modifier le traitement au sol des mesures en orbite, nécessaire pour effectuer des mesures du brouillage cumulatif.

Cette simplification du radiomètre utilisé dans le satellite LEO-D est fondée sur les cinq observations suivantes:

- La Recommandation UIT-R S.1427 n'impose pas de limite au brouillage cumulatif I causé par les dispositifs WAS/RLAN en tant que tels, mais au rapport de ce brouillage sur le niveau de bruit de base N , soit le rapport I/N , équivalant au rapport $\Delta T/T$ au niveau du récepteur satellite, qui ne devrait pas dépasser 3%.
- Dans le système LEO-D qui fonctionne entre 5 091 MHz et 5 250 MHz, on compte huit canaux radioélectriques, chacun d'une largeur de 16,5 MHz. Les canaux 1 et 2 sont exploités entièrement au-dessous de 5 150 MHz, la fréquence la plus faible à laquelle fonctionnent les dispositifs WAS/RLAN. Le canal 3 est exploité à la limite des 5 150 MHz

et les canaux 4 à 8 inclus sont exploités au-dessus de 5 150 MHz dans un environnement dans lequel des brouillages risquent d'être causés par des systèmes WAS/RLAN.

- Le bruit de fond N ne varie pas sensiblement dans la gamme de fréquences comprises entre 5 091 MHz et 5 250 MHz, même si une légère variation peut être constatée.
- Toutes les variations de N variant lentement dans le temps sont les mêmes entre le bruit de fond N dans les deux canaux radioélectriques inférieurs et dans les cinq canaux radioélectriques supérieurs. Les raisons de ces variations dans le temps de N peuvent ne pas être connues, mais ces variations sont incluses dans les variations du bruit dans les deux canaux radioélectriques inférieurs.
- Des variations plus rapides du gain d'éléments de satellite peuvent se produire à des fréquences pouvant aller jusqu'à 10 Hz environ, variations qui doivent être prises en considération dans la réalisation d'observations qui conduiraient à des estimations du brouillage I .

Pour déterminer la manière d'utiliser efficacement les signaux de référence dans les canaux 1 et 2 afin d'estimer le rapport I/N dans les canaux 4, 5, 6, 7 et 8, on constate qu'il est possible d'«étalonner» le radiomètre en effectuant des mesures dans les canaux 1 et 2. Un autre avantage de cette méthode réside dans le fait que toutes les variations temporelles des niveaux de bruit de fond dans différents canaux d'une largeur de 16,5 MHz en raison de la position variable du satellite et du moment auquel les mesures sont prises en considération dans les mesures simultanées du niveau de bruit dans les canaux 1 et 2, compte tenu des légères variations du niveau de bruit de fond dans la bande de fréquences 5 091 MHz-5 250 MHz.

Les deux radiomètres décrits respectivement dans les Annexes 2 et 3 tiennent compte des observations susmentionnées. Dans ces deux radiomètres, les signaux d'«étalonnage» peuvent être les niveaux de bruit des canaux 1 et 2 car les variations des niveaux de bruit dans les canaux 4 à 8 inclus sont entièrement comprises dans les niveaux de bruit des canaux 1 et 2. Pour cette raison, la source de bruit d'étalonnage de 550 K et la charge de précision de 16,5 K représentées dans la Fig. 1 sont redondantes et peuvent donc être supprimées des schémas fonctionnels des deux radiomètres de satellite décrits dans les Annexes 2 et 3.

Annexe 2

Radiomètre équipé d'un commutateur en ligne permettant de mesurer le bruit et le brouillage cumulatifs dans le récepteur de la station spatiale de la liaison de connexion Terre vers espace à 5 GHz d'un système à satellites LEO-D du SMS

1 Introduction

La présente Annexe décrit l'une des deux applications d'un radiomètre à utiliser dans la station spatiale LEO-D afin de mesurer le bruit et le brouillage cumulatifs dans les canaux 4 à 8 inclus dans lesquels elle est exploitée. Elle décrit par ailleurs le traitement au sol de ces mesures visant à estimer le rapport I/N dû aux brouillages causés par des réseaux RLAN.

2 Radiomètre spatial équipé d'un commutateur en ligne

Le radiomètre décrit utilise les mesures du bruit thermique dans les canaux 1 et 2 au lieu des mesures des deux sources de bruit d'étalonnage interne qui sont utilisées dans le radiomètre de Dicke générique représenté dans la Fig. 1. Ceci est possible car les canaux 1 et 2 du réseau LEO-D L fonctionnent au-dessous de 5 150 MHz et ne subissent donc pas de brouillages causés par des émissions RLAN dans la bande 5 150-5 250 MHz.

Ce radiomètre est différent de celui qui est représenté dans la Fig. 1 pour les raisons suivantes:

- il ne possède ni la source de bruit d'étalonnage, ni la charge de précision, ni le coupleur directionnel, ni le commutateur à faible perte représenté dans la Fig. 1;
- il comporte un démodulateur ainsi qu'un détecteur synchrone dans chacun des huit canaux d'une largeur de 16,5 MHz à 5 GHz. La sortie des huit détecteurs synchrones est convertie en une représentation numérique des sorties du détecteur synchrone, à transmettre à une station terrienne toutes les ξ millisecondes. La valeur nominale de ξ est de 25 ms, mais cette valeur peut être réduite afin de limiter l'effet de variations aléatoires sur les résultats mesurés en raison de la conversion des mesures analogiques dans le satellite en un format numérique avant la transmission vers le sol.

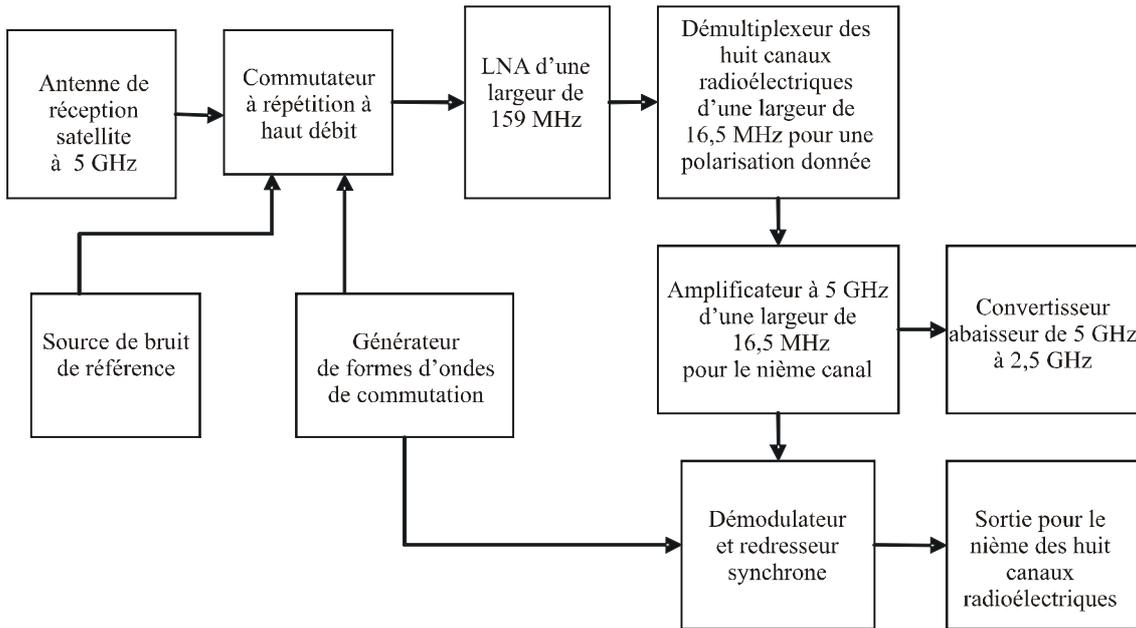
Un schéma fonctionnel de ce radiomètre est représenté dans la Fig. 2. Outre le récepteur à 5 GHz du réseau LEO-D opérationnel, la charge utile du satellite à 5 GHz comprend les éléments suivants:

- un commutateur en ligne à répétition à haut débit, commutant entre l'antenne satellite et une source de bruit de référence toutes les ξ ms;
- une source de bruit de référence de 200 K stable;
- un démodulateur et un redresseur synchrone sur chacun des huit canaux d'une largeur de 16,5 MHz d'une polarisation du système LEO-D;
- un convertisseur analogique-numérique de chacune des huit sorties des détecteurs synchrones donnant une représentation numérique à η -bits de chaque mesure. La valeur nominale de η est 12, mais celle-ci peut varier au cours de la conception détaillée du radiomètre;
- un générateur de formes d'ondes à commutation permettant de commander la synchronisation des détecteurs synchrones et du commutateur à répétition; et
- un dispositif permettant de transmettre les huit signaux numériques au sol sur les liaisons espace vers Terre à 2,5 GHz ou à 7 GHz du réseau à satellite LEO-D.

Le radiomètre mesure simultanément les huit sorties du redresseur $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ dans un intervalle de ξ milliseconde, durant lequel le commutateur en ligne connecte le récepteur satellite à 5 GHz soit à son antenne de réception RHCP, soit à son antenne de réception LHCP. Au cours des ξ ms suivantes, le radiomètre mesure simultanément les huit sorties du redresseur $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$ tandis que le commutateur en ligne connecte le récepteur satellite à 5 GHz à la source de bruit de référence. Les 16 résultats de mesure sont convertis au format numérique et transmis au sol en vue d'un traitement ultérieur. Ce processus est répété toutes les 2ξ ms. La synchronisation et le fonctionnement de chacun des éléments du radiomètre sont commandés par le générateur de commande à commutation.

FIGURE 2

Radiomètre avec source de bruit de référence commutée de façon répétitive



1427-02

3 Traitement au sol de la sortie du radiomètre avec un commutateur en ligne

Le présent paragraphe décrit les calculs en temps réel au sol visant à convertir les ensembles de mesures $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ et $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$ qui sont transmis depuis le satellite toutes les ξ ms en rapports brouillage/bruit thermique (I/N) des canaux 4, 5, 6, 7 et 8. Il convient de noter que les termes $\{S_i\}$, $\{R_i\}$ et $\{(I/N)_i\}$ représentent des niveaux de puissance et des rapports, les mesures en dB n'étant pas incluses dans les équations qui suivent. Les 16 valeurs de $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$ ainsi que les cinq résultats de $\{(I/N)_i\}$ qui sont obtenus toutes les 2ξ millisecondes peuvent également être enregistrés en vue d'un traitement ultérieur des données. Ce traitement devrait inclure le calcul de la moyenne des résultats de $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$ dans un filtre numérique pendant une période prolongée d'une minute ou plus, ce qui présente un seul inconvénient: les brouillages observés varient suivant la zone de service du satellite. Ce calcul de la moyenne permettrait de réduire les erreurs aléatoires dans les résultats de $\{S_i\}$ et de $\{R_i\}$, y compris le bruit de quantification produit par le convertisseur analogique-numérique dans le satellite, d'une valeur égale à la racine carrée du nombre de 2ξ intervalles pendant lesquels la moyenne est calculée.

La première étape de ce calcul au sol consiste à déterminer les échantillons de signaux «normalisés» $\{S_i\}$ en divisant les signaux par le signal de référence correspondant de l'ensemble $\{R_i\}$ afin d'obtenir l'ensemble $\{X_i\}$, où

$$X_i = S_i/R_i \quad (2)$$

Le traitement des mesures prises par le radiomètre consiste à diviser l'amplitude du signal reçu par le signal de référence, et non à soustraire l'amplitude du signal de référence de l'amplitude du signal reçu. Toutefois, les variations de gain dans le récepteur satellite ainsi que les différences de gain entre un canal et un autre ont été supprimées dans l'équation (2). Le radiomètre donne des estimations non biaisées des valeurs correctes de $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$. La composante aléatoire ou la variance de X_i est égale à la somme de la variance de S_i et de celle de R_i , car, comme précédemment, les composantes aléatoires des deux termes sont statistiquement indépendantes.

L'étape suivante du traitement des données consiste à estimer le bruit thermique ou plus précisément le bruit thermique «normalisé» dans chacun des huit canaux. On part du principe que X_1 et X_2 sont des estimations normalisées du bruit thermique uniquement, mais aussi que les niveaux de bruit thermique dans les différents canaux peuvent varier en fonction de la fréquence. Cette variation devrait être faible et peut par conséquent être modélisée sous la forme d'une variation linéaire, la fréquence de porteuse étant le paramètre variable. Dans ce cas, il convient de définir la composante Δ du bruit thermique variable comme suit:

$$\Delta = X_2 - X_1 \quad (3)$$

On peut utiliser ce taux de variation du bruit thermique en fonction de la fréquence du bruit en temps réel dans différents canaux pour estimer les composantes de bruit thermique normalisées de $\{X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ comme suit:

$$N_i = X_1 + (i - 1) \Delta \quad (4)$$

Dans l'équation (4), on suppose que le taux de variation Δ dans la composante de bruit thermique est le même pour tous les canaux adjacents aux canaux 4 à 8. Une fois avoir estimé le bruit N_i dans les canaux 4 à 8, on peut estimer le brouillage I_i dans le i ème canal comme suit:

$$I_i = X_i - N_i, \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ ou } 8 \quad (5)$$

On peut supprimer l'étiquette «normalisée» sur les estimations de $\{X_i\}$ et de $\{N_i\}$ pour estimer les rapports brouillage/bruit $\{(I/N)_i ; i = 4, 5, 6, 7 \text{ et } 8\}$ car $\{X_i\}$ et $\{N_i\}$ sont normalisés de la même façon. Cela étant précisé, l'équation est la suivante:

$$(I/N)_i = I_i/N_i, \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ ou } 8 \quad (6)$$

Il est rappelé que les termes $\{(I/N)_i ; i = 4, 5, 6, 7 \text{ et } 8\}$ sont des rapports de puissance ne représentant pas des mesures en dB.

Ces cinq équations peuvent être regroupées en une seule équation exprimant le rapport brouillage/bruit $(I/N)_i$ en fonction des termes $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$, comme suit:

$$\begin{aligned} (I/N)_i &= \{(S_i/R_i) / \{(i-1)S_2/R_2 - (i-2)S_1/R_1\}\} - 1 \\ &= \{X_i / \{(i-1)X_2 - (i-2)X_1\}\} - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Pour estimer les niveaux de brouillage cumulatif dans les canaux 4 à 8 du récepteur satellite à 5 GHz du système LEO-D, on résout ces six équations au sol toutes les 2ξ ms.

4 Erreur dans les mesures de $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$

Le radiomètre effectue des estimations non biaisées des niveaux de puissance $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$ du bruit gaussien aux huit sorties du récepteur. Ces niveaux de puissance sont proportionnels à leur température de bruit respective T_x et peuvent être exprimés en fonction de celle-ci. Comme il est indiqué dans l'équation (1), l'erreur quadratique moyenne ΔT_{erreur} dans les mesures de T_x , due au temps d'intégration fini de la sortie aléatoire du radiomètre, est la suivante:

$$\Delta T_{\text{erreur}} = T_x / (B \xi)^{0,5} \quad (8)$$

En outre, l'estimation non biaisée de T_x connaît une erreur multiplicative due à sa quantification dans un convertisseur analogique-numérique, cette estimation au format numérique pouvant être transmise au sol en vue d'un traitement ultérieur. Si le convertisseur analogique-numérique exprime la quantité analogique T_x par un nombre binaire composé de η chiffres, l'erreur quadratique moyenne dans la représentation numérique de la quantité T_x sera la suivante:

$$T_x / 2^{(\eta-0,5)} \quad (9)$$

où la valeur prévue de T_x représente la moitié de la valeur d'entrée maximale dans le convertisseur analogique-numérique, et où l'erreur quadratique moyenne de la quantification est de 0,707 fois le niveau de quantification le plus faible du convertisseur analogique-numérique.

Pour estimer l'erreur quadratique moyenne dans les résultats $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ tels qu'exprimés dans l'équation (7), on ajoute à certains endroits une quantité aléatoire à une autre; on multiplie à certains endroits une quantité aléatoire par une autre et on divise à certains endroits une quantité aléatoire par une autre. Si les deux termes sont statistiquement indépendants et si les variances de la composante aléatoire des termes sont faibles par rapport à leurs valeurs prévues, la variance du résultat est approximativement égale à la somme des variances des deux quantités entrées. La variance du terme $A * X$, où A est une constante et où X est une variable aléatoire, est de A^2 fois la variance de X .

Les expressions des termes $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ seraient très complexes si les valeurs des paramètres ξ et η restaient sous la forme de variables paramétriques dans l'analyse. Pour éviter cette complexité, les valeurs par défaut de 25 ms pour ξ et de 12 ms pour η sont utilisées dans l'analyse suivante des erreurs quadratiques moyennes dans les termes $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$. Par ailleurs, on suppose ici, *uniquement pour cette estimation des erreurs quadratiques moyennes*, que le bruit gaussien de fond rayonné par la Terre (corps chaud) est d'environ 200 K, soit la même température que celle de la source de bruit de référence, et que, par conséquent, la température de bruit à l'entrée du récepteur du satellite est d'environ 550 K lorsque l'antenne ou la source de bruit de référence est raccordée au récepteur.

Sur cette base, l'erreur quadratique moyenne du terme $\{S_i\}$ ou $\{R_i\}$, d'après l'équation (8), est la valeur prévue du terme, divisée par $(B \xi)^{0,5}$, soit $(16,5 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3})^{0,5}$, soit 642. L'erreur quadratique moyenne de quantification du terme $\{S_i\}$ ou $\{R_i\}$, d'après l'équation (8), est la valeur prévue du terme, divisée par $2^{(12-0,5)}$, soit 2 896. L'erreur quadratique moyenne est la racine de la somme des carrés de ces deux termes, les valeurs prévues fois 0,00159. Etant donné que la valeur prévue des termes $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$ est d'environ 550 K, l'erreur quadratique moyenne dans ces deux termes, pour un temps d'intégration de 25 ms et un convertisseur analogique-numérique de 12 bits, est de 0,87 K, soit 5,8% des 15 K représentant 3% du bruit thermique à l'entrée du récepteur.

Les calculs spécifiés par l'équation (7) entraînent une augmentation de ces erreurs quadratiques moyennes. L'erreur quadratique moyenne dans $\{X_i\}$ est de $2^{1/2}$ fois les erreurs dans $\{S_i\}$ ou $\{R_i\}$, soit leur valeur prévue fois 0,00226. Les erreurs quadratiques moyennes dans $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ dépendent de la valeur de « i », comme il est indiqué dans l'équation (7). On détermine ces erreurs quadratiques moyennes, en tant que fractions des valeurs prévues des termes $\{(I/N)_i\}$, à partir de la relation suivante:

$$\begin{aligned} \text{Var } \{(I/N)_i\} &= \text{Var } (X_i) + (i - 1)^2 * \text{Var } (X_2) + (i - 2)^2 * \text{Var } (X_1) \\ &= \text{Var } (X_i) * \{1 + (i - 1)^2 + (i - 2)^2\} \end{aligned} \quad (10)$$

car les variances de tous les termes $\{X_i, i = 1 \text{ à } 8\}$ sont égales à $(0,00226)^2$ fois leurs valeurs prévues, où $\text{Var } (Z)$ est «la variance d'»une quantité aléatoire Z . Les variances et les erreurs quadratiques moyennes de $\{(I/N)_i\}$ à partir de l'équation (10) sont indiquées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

**Valeurs quadratiques moyennes des estimations des valeurs
du rapport I/N dans les canaux 4 à 8**

Canal	Pondération	Variance de $(I/N)_i$	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$ (%)
4	14	0,0000715	0,008456	0,8456
5	26	0,000133	0,011524	1,1523
6	42	0,000215	0,014646	1,46647
7	62	0,000317	0,017795	1,7795
8	86	0,000439	0,020958	2,0958%

Ces erreurs quadratiques moyennes dans $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$ représentent une part importante du pourcentage maximal de 3% des brouillages spécifié dans la présente Recommandation. Toutefois, il convient de noter que les estimations établies à partir des équations (1) à (6) donnent des estimations non biaisées des termes réels $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$. Les erreurs quadratiques moyennes figurant dans le Tableau 1 résultent de l'intégration des signaux pendant seulement 50 ms, soit le double du temps d'intégration utilisé dans l'évaluation de l'équation (8). L'intégration au sol de l'une ou l'autre des estimations $(I/N)_i$ une fois les équations (2) à (7) résolues, ou des observations $\{S_i\}$ et $\{R_i\}$ permettra de réduire les erreurs quadratiques moyennes indiquées dans le Tableau 1 d'une valeur égale à la racine carrée du nombre des échantillons auxquels on applique une moyenne. Par exemple, si l'on fait la moyenne des séquences d'estimations initiales pendant 10 s, soit une moyenne de 200 échantillons, les erreurs quadratiques moyennes figurant dans le Tableau 1 seraient réduites d'un facteur de 14. Le résultat de ce calcul de moyenne au sol est indiqué dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Effet du calcul de la moyenne des estimations initiales de $(I/N)_i$ pendant 10 s

Canal	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$ en pourcentage avant le calcul de la moyenne au sol (%)	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$ en pourcentage après le calcul de la moyenne au sol (%)
4	0,8456	0,060
5	1,1523	0,082
6	1,46647	0,1047
7	1,7795	0,1271
8	2,0958	0,1497

En établissant la moyenne au sol pendant 10 s des estimations $(I/N)_i$ initiales qui sont fondées sur un calcul de la moyenne pendant 50 ms dans le satellite, on ramène le nombre d'erreurs quadratiques moyennes des estimations dans tous les canaux à des niveaux considérablement plus faibles que la valeur de 3% du rapport $\Delta T_{\text{satellite}}/T_{\text{satellite}}$ cumulatif qui est spécifié au point 2 du *recommande* de la présente Recommandation. Toutefois, la durée sur laquelle on mesure la moyenne au sol est limitée car le satellite se déplace sensiblement au cours de l'intervalle de 10 s pendant lequel le calcul de la moyenne est effectué dans l'exemple ci-dessus. En effet, pendant un intervalle de temps de 10 s, le satellite, situé sur une orbite circulaire, à une altitude de 1 414 km et dont la période est d'environ

114 min, parcourra environ 72 km. Compte tenu de la quantité totale de brouillages WAS/RLAN visible depuis le satellite, l'environnement de brouillage ne variera pas grandement pendant la durée où le satellite parcourt ces 72 km; cependant, il convient d'utiliser avec précaution les temps d'intégration au sol sensiblement plus élevés.

Annexe 3

Radiomètre équipé d'un coupleur directionnel en ligne permettant de mesurer le bruit et le brouillage cumulatifs dans le récepteur de la station spatiale de la liaison de connexion Terre vers espace à 5 GHz d'un système à satellites LEO-D du SMS

1 Introduction

La présente Annexe décrit la seconde des deux applications d'un radiomètre à utiliser dans la station spatiale LEO-D pour mesurer le bruit et le brouillage cumulatifs dans les canaux 4 à 8 inclus dans lesquels elle est exploitée. Elle décrit par ailleurs le traitement au sol de ces mesures visant à estimer le rapport I/N dû aux brouillages causés par des réseaux RLAN.

2 Radiomètre spatial

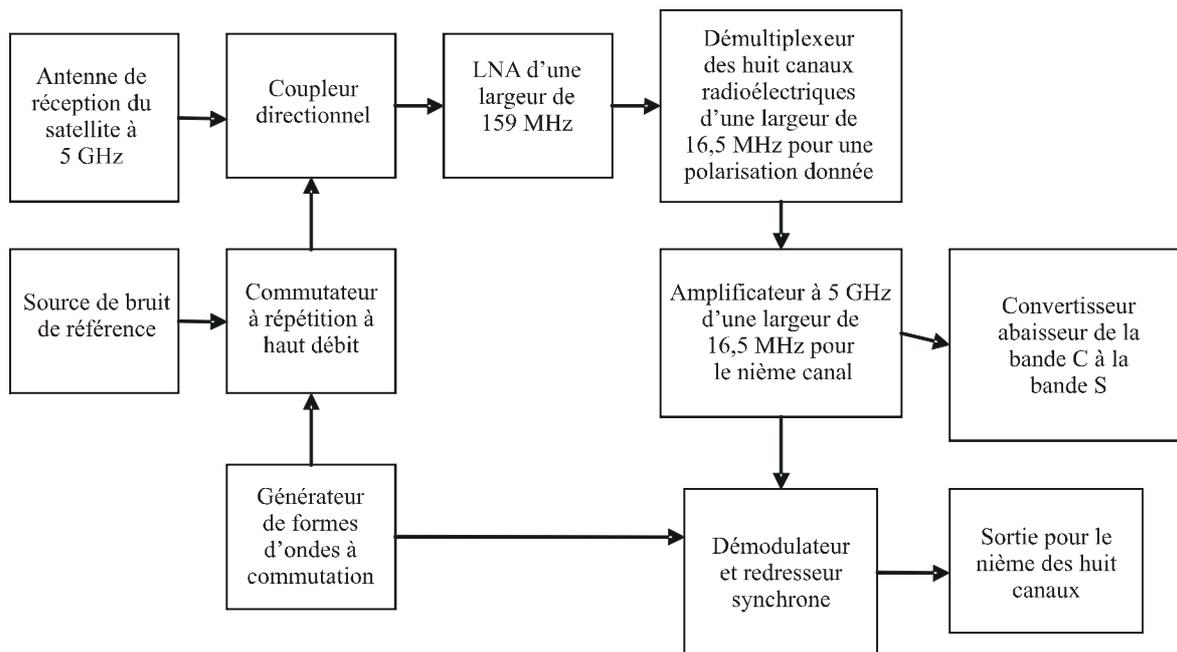
Le radiomètre examiné dans la présente Annexe est analogue à celui qui est décrit dans l'Annexe 2, à ceci près qu'il ne possède pas de commutateur en ligne et que, par conséquent, il ne présente pas de point de défaillance ponctuelle en ce qui concerne la charge utile de la liaison de connexion du SFS par satellite à 5 GHz. Le signal de bruit de référence est en fait injecté dans la chaîne du récepteur à 5 GHz du système LEO-D par l'intermédiaire d'un coupleur directionnel passif, ce qui augmente la fiabilité de la charge utile de la liaison de connexion du SFS.

Ce radiomètre est représenté dans la Fig. 3. Les seuls éléments qui ont été ajoutés au récepteur à 5 GHz de la liaison de connexion du SFS du réseau LEO-D sont dans ce cas les suivants:

- un coupleur directionnel placé immédiatement après l'antenne à 5 GHz du satellite et avant le récepteur à 5 GHz recevant l'un des deux signaux à polarisation circulaire;
- une source de bruit d'étalonnage à 200 K, commutée toutes les 2ξ ms pendant une durée de ξ milliseconde vers le récepteur à 5 GHz d'une largeur de 159 MHz par l'intermédiaire du coupleur directionnel. Le signal provenant de la source de bruit présente une température de bruit effective de 200 K après le coupleur directionnel et avant le récepteur à 5 GHz;
- un démodulateur et un redresseur synchrone pour chacun des huit canaux d'une largeur de 16,5 MHz multiplexés en fréquence dans le récepteur d'une largeur de 159 MHz. Chacun des huit signaux démodulés, redressés et intégrés est échantillonné toutes les ξ ms;
- le générateur de formes d'ondes à commutation permettant de commander aussi bien le commutateur RF à 5 GHz que les huit démodulateurs/intégrateurs.

En bref, l'amplitude de seize signaux, chacun d'une largeur de 16,5 MHz, est mesurée toutes les 2ξ ms et est transmise à une station terrienne au moyen des liaisons existantes espace vers Terre à 7 GHz ou à 2,5 GHz du réseau à satellites LEO-D.

FIGURE 3

Radiomètre couplé à une source de bruit d'étalonnage

1427-03

Le radiomètre examiné dans la présente Annexe est analogue à celui qui est décrit dans l'Annexe 2 dans la mesure où, le générateur de formes d'ondes à commutation, les huit démodulateurs/redresseurs/intégrateurs et le trajet de transmission des seize mesures numériques au sol toutes les 2ξ ms sont les mêmes dans les deux récepteurs. La différence qui existe entre les deux radiomètres réside dans la méthode au moyen de laquelle la source de bruit de référence est introduite: dans le cas présent, on utilise un coupleur directionnel en ligne, alors que dans le radiomètre décrit dans l'Annexe 2, on utilise un commutateur en ligne qui commute entre le signal d'entrée et la source de référence toutes les ξ ms.

Le radiomètre mesure simultanément les huit sorties du redresseur $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ dans un intervalle de ξ milliseconde, au cours duquel la source du bruit de référence n'est pas introduite par l'intermédiaire du commutateur ou du coupleur directionnel. Dans les ξ millisecondes suivantes, la sortie de la source de bruit de référence est ajoutée à l'entrée du récepteur à 5 GHz par l'intermédiaire du commutateur fermé et du coupleur directionnel en ligne. Dans cet intervalle, le radiomètre mesure les huit sorties du redresseur $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$. Les 16 résultats de mesure sont convertis au format numérique et transmis au sol en vue d'un traitement ultérieur. Ce processus est répété toutes les 2ξ millisecondes. La synchronisation et le fonctionnement de chacun des composants du radiomètre sont sous le contrôle du générateur de commande à commutation.

3 Traitement de la sortie du radiomètre avec coupleur directionnel en ligne

Ce radiomètre permet d'effectuer l'ensemble des huit mesures simultanées $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ pendant le même intervalle de ξ millisecondes durant lequel on a effectué les mêmes mesures au moyen du radiomètre avec commutateur en ligne (voir l'Annexe 2). Au cours des ξ ms suivantes, le commutateur est fermé et le bruit d'étalonnage est ajouté au bruit thermique dans le sens amont ainsi qu'aux brouillages causés par les RLAN. Au cours de ce second intervalle est effectué l'ensemble des huit mesures simultanées $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$. Toutes les 50 ms, ces seize mesures sont converties au format numérique et transmises au sol, comme les mesures $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ et $\{R_1, R_2, \dots, R_7, R_8\}$ décrites dans l'Annexe 2. En revanche, les seize valeurs $\{S_1, S_2, \dots, S_7, S_8\}$ et $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_7, Y_8\}$ sont traitées différemment.

On fait à nouveau en sorte que la durée de mesure pour l'ensemble des seize mesures soit suffisamment courte, de l'ordre de 2ξ ms, de façon que le gain d'amplificateur dans le satellite ne varie pas sensiblement. La première étape du **traitement des données au sol** consiste à déterminer l'amplitude des signaux d'étalonnage dans chacun des huit canaux, au moyen du calcul simple suivant:

$$C_i = Y_i - S_i, \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ ou } 8 \quad (11)$$

$\{C_i\}$ représente les niveaux du signal d'étalonnage à l'emplacement où les mesures sont effectuées. Il est possible de déterminer le niveau du signal d'étalonnage C_0 au point où il est inséré au niveau du coupleur directionnel (voir la Fig. 3), à partir des mesures précédentes, avant le lancement du satellite, de façon à pouvoir déterminer les gains G_i dans chacun des huit canaux au cours de la période de 2ξ ms. Ces gains sont les suivants:

$$G_i = C_i / C_0, \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ ou } 8 \quad (12)$$

On peut ensuite rapporter les valeurs du bruit thermique dans les canaux 1 et 2 ou celles du bruit thermique et des brouillages dans les canaux 4, 5, 6, 7 et 8 à la sortie de l'antenne à 5 GHz du satellite en effectuant le calcul simple suivant:

$$Q_i = S_i / G_i, \quad \text{pour } i = 1, 2, 4, 5, 6, 7 \text{ et } 8 \quad (13)$$

Comme dans les calculs se rapportant au radiomètre décrit dans l'Annexe 2, les niveaux de bruit thermique $\{M_i\}$ seuls dans les canaux 1 et 2 sont spécifiés par Q_1 et Q_2 dans l'équation (13). On part également du principe que les niveaux de bruit seuls dans les canaux 4 à 8 sont les suivants:

$$M_i = Q_1 + (i - 1) * \Delta \quad (14)$$

où dans ce cas

$$\Delta = Q_2 - Q_1 \quad (15)$$

On peut à présent déterminer le brouillage cumulatif I_i dans les canaux 4 à 8 en effectuant le calcul simple suivant:

$$I_i = Q_i - M_i \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ et } 8 \quad (16)$$

Ces valeurs correspondent aux niveaux de brouillage indiqués au point 3 du *décide* de la Résolution 229 (CMR-03). On peut déterminer facilement les rapports brouillage/bruit spécifiés dans la Recommandation UIT-R S.1427 à partir des calculs suivants:

$$(I/N)_i = I_i / M_i, \quad \text{pour } i = 4, 5, 6, 7 \text{ et } 8 \quad (17)$$

Les résultats $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ peuvent être exprimés en fonction des mesures de $\{S_i\}$ et $\{Y_i\}$ au moyen de l'équation suivante:

$$(I/N)_i = \{(S_i / C_i) / \{(i - 1)(S_2 / C_2) - (i - 2)(S_1 / C_1)\}\} - 1 \quad (18)$$

où les termes $\{C_i\}$ sont spécifiés par l'équation (11) en fonction des valeurs mesurées $\{S_i\}$ et $\{Y_i\}$. Il est à noter que le terme C_0 de l'équation (12) ne figure pas dans l'équation générale (18) ou dans l'équation (11), ce qui indique que les estimations de $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ ne dépendent pas de la valeur de C_0 .

Ces calculs simples dans les équations (11) à (18) incluse pourraient également être effectués en temps réel au sol au moyen d'un ordinateur rapide à l'emplacement où le signal en liaison descendante à 2,5 GHz ou à 7 GHz est reçu. Il est aussi possible d'enregistrer les mesures en vue ultérieurement d'en établir la moyenne et éventuellement de les traiter. L'avantage d'enregistrer les mesures réside en la possibilité d'effectuer ultérieurement des calculs comparatifs sur des observations répétées.

Les intervalles d'observation de ξ milliseconde sont trop courts pour obtenir un gain de traitement $(B\tau)^{0,5}$ suffisant pour effectuer des estimations précises des rapports brouillage/bruit spécifiés dans les équations (17) ou (18). Toutefois, les valeurs obtenues au moyen de l'algorithme ci-dessus sont des estimations non biaisées des valeurs requises, ce qui permet d'établir une moyenne au sol de manière à obtenir un gain $(B\tau)^{0,5}$ suffisamment élevé et, ainsi, de fournir des estimations avec une composante aléatoire suffisamment faible. Là encore, le seul inconvénient de cette intégration est que les paramètres mesurés changeront en fonction du déplacement du satellite sur sa trajectoire, ce qui aura pour effet de modifier le bruit provenant du sol ainsi que le brouillage cumulatif RLAN.

4 Erreur dans les mesures de $\{S_i\}$ et $\{Y_i\}$

Pour déterminer l'erreur quadratique moyenne dans les estimations, on suivra un processus très analogue à celui qui est décrit au § 4 de l'Annexe 2. Pour cette raison, on ne répétera pas les informations générales qui sont communes aux deux analyses. Il est à noter que:

- la méthode de mesure permet d'obtenir des estimations non biaisées de $\{S_i\}$, $\{Y_i\}$ et $\{(I/N)_i\}$, le calcul de la moyenne permettant ainsi de réduire toute erreur aléatoire ou systématique dans $\{(I/N)_i\}$;
- les températures de bruit de $\{S_i\}$ sont d'environ 550 K, mais lorsque la source de bruit de référence est ajoutée à l'entrée du récepteur, les températures de bruit de $\{Y_i\}$ sont d'environ 750 K. On en tiendra compte pour déterminer les estimations de $\{(I/N)_i\}$ au moyen de l'équation (11), mais également dans le cas présent pour déterminer les erreurs quadratiques moyennes dans $\{(I/N)_i\}$.

Comme au § 4 de l'Annexe 2, on détermine l'erreur quadratique moyenne dans les termes $\{(I/N)_i\}$ dans le cas où la durée d'intégration ξ dans le satellite est de 25 ms, et où le nombre de bits η dans la sortie du convertisseur analogique-numérique est de 12. Les erreurs quadratiques moyennes dues au redressement et à l'intégration des variables aléatoires $\{S_i\}$ et $\{Y_i\}$ sont données par l'équation (8) et les erreurs quadratiques moyennes dues à la quantification par l'équation (9).

Comme pour le calcul de l'erreur quadratique moyenne des termes $\{S_i\}$ ou $\{R_i\}$ dans l'Annexe 2, les erreurs quadratiques moyennes de $\{S_i\}$ et $\{Y_i\}$ dans le présent paragraphe sont spécifiées par les équations (8) et (9). Les erreurs quadratiques moyennes dues au redressement et à l'intégration sont les valeurs prévues des termes, divisées par $(B\xi)^{0,5}$, soit $(16,5 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3})^{0,5}$, soit 642. L'erreur quadratique moyenne due à la quantification des termes $\{S_i\}$ ou $\{Y_i\}$ est la valeur prévue du terme, divisée par $2^{(12 - 0,5)}$, soit 2 896. L'erreur quadratique moyenne dans $\{S_i\}$ ou $\{Y_i\}$ est la racine de la somme des carrés de ces deux termes, les valeurs prévues fois 0,00159. Les valeurs prévues des termes $\{S_i\}$ sont de l'ordre de 550 K, l'erreur quadratique moyenne dans ces termes pour une durée d'intégration de 25 ms et un convertisseur analogique-numérique de 12 bits étant par conséquent de 0,87 K. Les valeurs prévues des termes $\{Y_i\}$ sont de l'ordre de 750 K, l'erreur quadratique moyenne dans ces termes étant par conséquent de 1,19 K.

Les erreurs quadratiques moyennes des termes $\{C_i\}$ correspondent à la racine de la somme des carrés des erreurs quadratiques moyennes des variables appropriées S_i et Y_i , comme spécifié dans l'équation (11). Les erreurs quadratiques moyennes des termes $\{C_i\}$ après intégration et quantification dans le satellite sont de 1,474 K, soit 0,00737 fois leur valeur prévue d'environ 200 K. Les erreurs quadratiques des termes $\{S_i/C_i\}$ ou $\{1/[(Y_i/S_i)-1]\}^{-1}$ de l'équation (18) sont également de 0,00737 fois leurs valeurs prévues.

Les erreurs quadratiques moyennes dans $\{(I/N)_i, i = 4, 5, 6, 7, 8\}$ dépendent de la valeur de « i », telle qu'indiquée dans l'équation (18). Ces valeurs quadratiques moyennes, en tant que fractions des valeurs prévues des termes $\{(I/N)_i\}$, peuvent être déterminées à partir de la relation suivante:

$$\begin{aligned} \text{Var } \{(I/N)_i\} &= \text{Var } (Z_i) + (i-1)^2 * \text{Var } (Z_2) + (i-2)^2 * \text{Var } (Z_1) \\ &= \text{Var } (Z_i) * \{1 + (i-1)^2 + (i-2)^2\} \end{aligned} \quad (19)$$

où Z_i est défini comme étant identique à (S_i/C_i) de l'équation (18). (Les termes Z_1 et Z_2 correspondent à Z_i , i étant respectivement égal à 1 et à 2.) A noter que l'équation (19) se présente sous la même forme que l'équation (10), même si les erreurs quadratiques moyennes 0,00737 dans les termes $\{Z_i\}$ de l'équation (19) sont légèrement plus grandes que les erreurs quadratiques moyennes 0,00226 dans les termes $\{X_i\}$ de l'équation (10). Cette augmentation vient du fait que le bruit provenant de la source de bruit de référence est ajouté dans ce type de radiomètre, alors que dans le radiomètre décrit dans l'Annexe 2, il remplaçait le bruit provenant de l'antenne d'entrée; des calculs sont par conséquent nécessaires pour mettre en œuvre le radiomètre décrit dans la présente Annexe.

Comme il est indiqué dans l'Annexe 2, la variance de $(I/N)_i$ est fonction du numéro du canal i , suite à l'estimation de N_i au moyen des équations (14) et (15).

TABLEAU 3

Valeurs efficaces des estimations des valeurs du rapport I/N dans les canaux 4 à 8

Canal	Pondération	Variance de $(I/N)_i$	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$	Erreur quadratique moyenne de $(I/N)_i$ (%)
4	14	0,00076	0,02758	2,75
5	26	0,00141	0,03758	3,75
6	42	0,00228	0,04776	4,78
7	62	0,00337	0,05803	5,80
8	86	0,00467	0,06835	6,83

Les erreurs quadratiques moyennes dans les estimations de $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$ au moyen du radiomètre décrit dans la présente Annexe sont du même ordre que la limite de 3% du rapport I/N ; le calcul d'une moyenne au sol est par conséquent nécessaire. Comme il a été précisé au § 4 de l'Annexe 2, le calcul de la moyenne des résultats au sol a pour effet de réduire l'erreur quadratique moyenne des résultats d'une valeur égale à la racine carré du nombre d'échantillons dont on a établi la moyenne. Si l'on calcule la moyenne des séquences d'estimation initiales pendant 10 s comme il est indiqué dans l'Annexe 2, ce qui permet d'obtenir une moyenne de 200 échantillons, les valeurs efficaces figurant dans le Tableau 3 seraient réduites d'un facteur de 14. Le Tableau 4 donne le résultat du calcul de la moyenne au sol. Il indique également le calcul de la moyenne pendant 30 s, au moyen de 600 échantillons, afin de réduire l'erreur quadratique moyenne d'un facteur de 25.

TABLEAU 4

Effet résultant du calcul de la moyenne des estimations initiales du rapport $(I/N)_i$ pendant 10 s et pendant 30 s

Canal	Erreur quadratique moyenne en pourcentage du rapport $(I/N)_i$ avant calcul de la moyenne au sol (%)	Erreur quadratique moyenne en pourcentage du rapport $(I/N)_i$ après calcul de la moyenne au sol pendant 10 s (%)	Erreur quadratique moyenne en pourcentage du rapport $(I/N)_i$ après calcul de la moyenne au sol pendant 30 s (%)
4	2,75	0,197	0,110
5	3,75	0,268	0,150
6	4,78	0,341	0,191
7	5,80	0,414	0,232
8	6,83	0,488	0,273

Comme il ressort du Tableau 4, il est possible de réduire sensiblement les erreurs quadratiques moyennes dans les mesures non biaisées des valeurs de $\{(I/N)_i, i = 4, \dots, 8\}$ en établissant la moyenne au sol des estimations initiales qui sont établies à partir de la moyenne des mesures effectuées dans le satellite pendant 25 ms. Il convient de noter qu'en l'espace de 10 s, le satellite parcourt 72 km, et en l'espace de 30 s, 216 km; le calcul de la moyenne des résultats est limité dans le temps dans la mesure où les brouillages réels observés par le satellite varieront en fonction du déplacement de ce dernier. Compte tenu des caractéristiques de gain omnidirectionnel de l'antenne du satellite LEO-D, le calcul de la moyenne au sol pendant 30 s a un sens et donne des résultats avec des erreurs quadratiques moyennes considérablement inférieures à la valeur de 3% du rapport global $\Delta T_{\text{satellite}}/T_{\text{satellite}}$ spécifié au point 2 du *recommande* de la présente Recommandation.
