

RECOMMANDATION UIT-R M.1087

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES POSSIBILITÉS DE PARTAGE ENTRE SYSTÈMES DU SERVICE MOBILE TERRESTRE ET SYSTÈMES EN ORBITE TERRESTRE BASSE (LEO) À ÉTALEMENT DE SPECTRE DU SMS EN DESSOUS DE 1 GHz

(Questions UIT-R 83/8 et UIT-R 84/8)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications chargée d'étudier les attributions de fréquences dans certaines parties du spectre (Malaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) a attribué des fréquences aux systèmes du Service mobile terrestre sur orbite terrestre basse (Systèmes LEO du SMS) et fonctionnant en dessous de 1 GHz;
- b) qu'il est prévu d'utiliser ces bandes en partage avec d'autres services;
- c) que les systèmes LEO du SMS peuvent offrir au plus grand nombre des services de radiocommunication utiles, par exemple un service d'alerte (toutefois ces services ne doivent pas être assimilés à des services de sécurité au sens du RR) et un service de radiorepérage;
- d) que les satellites en orbite terrestre basse constituent une plate-forme commode pour emporter des équipements de communication dans l'espace;
- e) que la contribution des systèmes du SMS à faible puissance et à modulation par étalement du spectre en séquence directe au niveau de bruit global observé dans ces bandes est minime. Toutefois, des rayonnements importants peuvent se produire à proximité des stations terriennes mobiles;
- f) que les procédés d'étalement du spectre, qui sont techniquement réalisables, permettent d'assurer le partage entre, d'une part, les systèmes du service mobile existants et, d'autre part, les systèmes des services mobiles par satellite à faible puissance et à faible coefficient d'utilisation,

recommande

1. d'utiliser les méthodes décrites dans l'Annexe 1 pour analyser les possibilités de partage entre, d'une part, les services mobiles terrestres et, d'autre part, les systèmes LEO à étalement de spectre du SMS en dessous de 1 GHz.

ANNEXE 1

Méthodes d'analyse des effets des émissions radioélectriques des systèmes du service mobile terrestre sur les systèmes LEO du SMS à étalement de spectre, en dessous de 1 GHz**1. Introduction**

Il s'agit dans la présente Annexe de rechercher les moyens permettant aux systèmes LEO du SMS à étalement de spectre d'utiliser en partage avec des utilisateurs du service mobile terrestre les bandes de fréquences en dessous de 1 GHz que la CAMR-92 a attribuées au SMS. Les systèmes des services de météorologie par satellite, fixe et mobile ainsi que ceux d'autres services de radiocommunication sont actuellement exploités dans ces bandes.

Les méthodes décrites dans la présente Annexe s'appliquent à deux configurations types de systèmes LEO du SMS à étalement de spectre présentées dans les Appendices. L'Appendice 1 indique les paramètres types de deux systèmes LEO du SMS à étalement de spectre. L'Appendice 2 expose les modalités d'application de ces méthodes.

2. Méthode de partage des fréquences entre les systèmes existants du service mobile terrestre et les systèmes LEO du SMS à étalement de spectre sur les liaisons Terre-espace (148-149,9 MHz)

Les facteurs suivants facilitent le partage entre les systèmes des services mobiles terrestres et les systèmes LEO du SMS à étalement de spectre:

- l'utilisation de la modulation par étalement de spectre, technique qui présente une grande tolérance aux brouillages provenant d'autres sources;
- la directivité des antennes des stations terriennes fixes du SMS (une antenne Yagi ayant un gain de 18 dB ne couvre que 9,8% du ciel);
- l'empreinte défilante de la zone de réception du satellite LEO du SMS sur la surface de la Terre qui réduit l'exposition dudit satellite aux brouillages les plus intenses des émetteurs au sol;
- la présence quasi récurrente d'autres satellites de la constellation qui peuvent assurer les liaisons de communication requises depuis des positions où les brouillages sont plus faibles pour le satellite;
- les limites imposées au temps pendant lequel les stations du SMS peuvent émettre (une durée de 500 ms au maximum a été proposée);
- les limites du coefficient d'utilisation (on a proposé une valeur de 1% pendant une période allant de 1 à 15 min).

Les signaux émis par les utilisateurs du service mobile terrestre dans une bande actuellement attribuée à la liaison montante proposée sont en général des signaux à bande étroite (16 kHz ou moins). La puissance des émetteurs des systèmes mobiles terrestres et en particulier des stations de base est élevée par rapport à celle des stations d'utilisateur des systèmes du SMS proposés. Les systèmes du SMS doivent donc être suffisamment insensibles aux signaux du service mobile terrestre.

Les effets des brouillages imputables aux stations des services mobiles terrestres s'observeront essentiellement sur la liaison associée aux petites stations d'utilisateur qui émettent en direction du satellite. Le bilan puissance/bruit de la liaison montante d'une station mobile type du SMS dans la bande 148,0-149,9 MHz qui fait l'objet de l'Appendice 2, permet de présenter les modalités d'application de ces méthodes.

2.1 *Analyse du brouillage causé à un système mobile terrestre par un système en ondes métriques du SMS à étalement de spectre*

Sur la liaison Terre-espace, les stations de commande et d'acquisition de données du SMS et les stations mobiles d'utilisateur du SMS risquent de causer des brouillages aux stations de base et aux stations du service mobile terrestre. L'analyse du brouillage se fait séparément pour la station du service mobile terrestre et la station de base du service mobile terrestre selon deux critères:

- l'espacement géographique à respecter pour protéger le récepteur du service mobile terrestre;
- des considérations statistiques qui supposent une distribution uniforme de la population des utilisateurs des stations mobiles du SMS.

L'équation donnée ci-après permet de calculer le champ électrique à une distance spécifiée entre des antennes de hauteur connue. En utilisant les valeurs du champ maximal désiré, on peut obtenir l'espacement géographique:

$$d = \sqrt{\frac{88h_1h_2\sqrt{P}}{\lambda E}}$$

où:

- E : sensibilité du récepteur à protéger (V/m)
- P : p.i.r.e. du système brouilleur dans une bande de 4 kHz (W/4 kHz)
- d : distance entre les antennes (m)
- h_1, h_2 : hauteur des antennes (m) (on utilise généralement 10 m² pour le produit des hauteurs d'antennes)
- λ : longueur d'onde (m).

Le champ électrique à protéger est donné par la formule:

$$E = \sqrt{120\pi 10^{(pfd/10)}}$$

où:

pfd : puissance surfacique = $-150 \text{ dB(W/m}^2\text{/4 kHz)}$ (conformément aux numéros 608A et 608B du RR)

2.2 *Analyse du brouillage causé à un système LEO du SMS à étalement de spectre par les systèmes du service mobile terrestre*

On peut utiliser des méthodes statistiques ou expérimentales pour déterminer les effets des brouillages causés par les émissions des utilisateurs du service mobile terrestre dans la bande 148,0-149,9 MHz.

Un satellite doté d'un répéteur approprié pourrait être placé sur une orbite basse. L'analyse des signaux traités dans le répéteur permettrait de caractériser le trafic des services mobiles dans la bande considérée. Quelques expérimentations limitées faites avec des signaux à étalement de spectre viendraient elles aussi corroborer l'analyse du bilan de liaison.

Pour calculer les effets des brouillages causés par les utilisateurs du service mobile terrestre dans la bande 148,0-149,9 MHz, on suppose tout d'abord que ces utilisateurs sont uniformément répartis dans l'empreinte de l'antenne du satellite. Pour les utilisateurs plus proches de la verticale du satellite à la surface de la Terre, l'affaiblissement spatial sera plus faible mais le diagramme de rayonnement de l'antenne du satellite peut être conformé de façon à neutraliser partiellement les effets liés à la distance. On a élaboré une expression qui intègre tous ces facteurs afin d'évaluer le bruit total produit par d'autres services et qui est susceptible d'affecter le fonctionnement du système LEO du SMS.

Disposant d'un modèle pour calculer le niveau de brouillage, on peut maintenant établir un bilan de liaison détaillé qui intègre les coordonnées de l'utilisateur du SMS (angle d'élévation du satellite) et le bruit composite de toutes les sources, y compris l'autobrouillage des systèmes du SMS et les brouillages des utilisateurs existants. En prenant différentes valeurs de l'angle d'élévation satellite-utilisateur on peut obtenir, pour différents niveaux de brouillage, les valeurs de l'angle d'élévation pour lesquelles la marge de fonctionnement est positive. Cette méthode est présentée à l'Appendice 2 pour des paramètres de systèmes types.

Les concepteurs de systèmes LEO du SMS ne doivent pas oublier que le trafic des services de Terre est appelé à s'accroître.

2.2.1 *Bruit total produit par les systèmes du service mobile terrestre et susceptible de perturber le fonctionnement d'un système LEO du SMS à étalement de spectre*

On veut calculer le bruit total produit, au niveau du satellite S (voir la Fig. 1), par un grand nombre d'émetteurs N_e uniformément répartis sur la calotte sphérique comprise dans l'empreinte du satellite. Cette empreinte toutefois est beaucoup plus grande que la plupart des continents et il n'y a pas de service mobile terrestre en mer. On répartira donc les N_e émetteurs sur une zone ayant approximativement la taille des Etats-Unis d'Amérique, soit une zone ayant un angle au centre de 40° ($\beta = 20^\circ$).

L'aire d'une calotte sphérique d'angle β au centre est:

$$\text{Aire} = 2\pi R^2(1 - \cos \beta) = a$$

Ainsi la densité d'émetteurs est:

$$\text{Densité} = \frac{N_e}{\text{Aire}} = \frac{N_e}{2\pi R^2(1 - \cos \beta)}$$

et le nombre d'émetteurs dans une zone élémentaire, da :

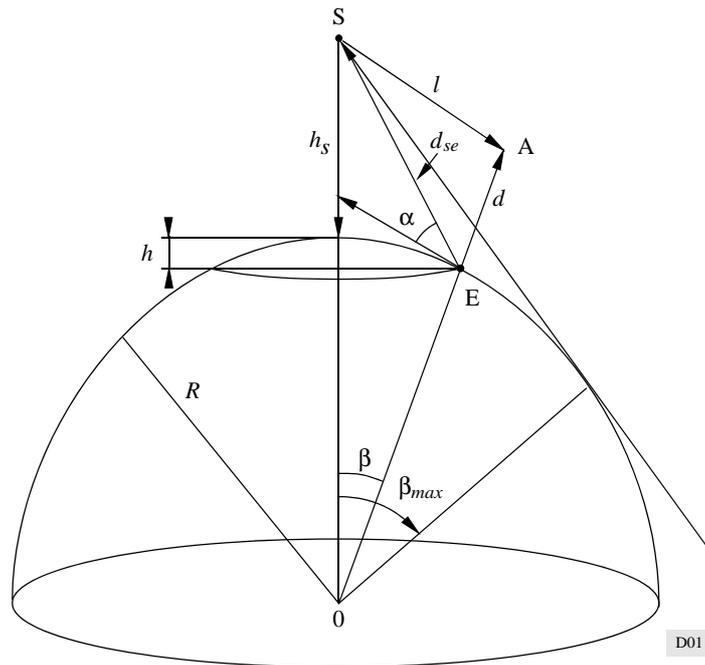
$$da = 2\pi R^2 \sin \beta d\beta$$

est:

$$dN = \text{densité} \times da = \frac{N_e \sin \beta d\beta}{1 - \cos 20^\circ}$$

où β est l'angle sous-tendu au centre de la Terre entre le satellite S et l'émetteur E.

FIGURE 1
Paramètres géométriques utilisés pour le calcul de l'équation du bruit total



Le diagramme de rayonnement de l'antenne de réception neutralise partiellement le supplément d'affaiblissement spatial de 9 dB constaté lorsque la station considérée, au lieu d'être située à la verticale du satellite, se trouve en un point où l'angle d'élévation du satellite est de 5°. L'équation exprimant le gain d'antenne en fonction de l'angle d'élévation est la suivante:

$$G_{\text{dB}}(\alpha) = 6,5 - \frac{39}{\pi} \alpha$$

où:

α : angle d'élévation (rad)

G_{dB} : gain d'antenne (dB).

Le gain au satellite peut s'exprimer en fonction de l'angle β sous-tendu au centre de la Terre entre le satellite S et l'émetteur E. Ainsi:

$$G_{\text{dB}}(\beta) = 6,5 - \frac{39}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{\text{tg } \beta} - \frac{1}{r \sin \beta}\right)$$

avec:

$$r = 1 + h_s / R$$

où:

h_s : altitude du satellite

R : rayon de la Terre.

La puissance fournie par l'émetteur et reçue par le satellite est la puissance de l'émetteur à laquelle on retranche l'affaiblissement sur le trajet entre cet émetteur et le satellite. L'affaiblissement sur le trajet entre E et S est donné par la formule suivante:

$$\text{Affaiblissement sur le trajet}_{\text{dB}} = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d_{se}}\right)$$

ou exprimé sous forme d'un rapport:

$$PL = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{se}}\right)^2$$

On exprimera l'affaiblissement sur le trajet en termes d'affaiblissement A correspondant à l'altitude du satellite, c'est-à-dire à un angle d'élévation de 90° :

$$A = \left(\frac{\lambda}{4\pi h_s} \right)^2$$

ainsi on peut écrire:

$$PL = A \frac{h_s^2}{d_{se}^2}$$

compte tenu des paramètres géométriques indiqués dans la Figure, l'affaiblissement sur le trajet s'exprime comme suit:

$$PL = \frac{A(r-1)^2}{r^2 + 1 - 2r \cos \beta}$$

où A est l'affaiblissement sur le trajet à l'altitude h_s .

Le produit de la puissance moyenne de l'émetteur P_1 , de l'affaiblissement sur le trajet, du gain d'antenne et du nombre élémentaire d'émetteurs, intégré sur la calotte sphérique d'angle β au centre, donne la puissance brouilleuse totale au niveau du satellite.

Ainsi:

$$P_{TOT} = \frac{P_1 N_e A(r-1)^2}{1 - \cos 20^\circ} \int_0^{\beta_{max}} \frac{10^{-\left[\frac{39}{\pi} \arctan \left(\frac{1}{\tan \beta} - \frac{1}{r \sin \beta} \right) - 6,5 \right] / 10}}{r^2 + 1 - 2r \cos \beta} \sin \beta \, d\beta$$

Il nous faut maintenant déterminer une valeur représentant le nombre de brouilleurs N_i .

Si on suppose un trafic de μ erlangs par station, la probabilité pour que i stations émettent simultanément est donnée par une loi binomiale:

$$p(i) = \binom{N_e}{i} \mu^i (1 - \mu)^{N_e - i}$$

où N_e est le nombre total de stations d'émission. Si N_e est grand et μ petit, $p(i)$ se rapproche d'une loi de Poisson (trafic téléphonique).

En l'occurrence, $p(i)$ est une loi normale avec une valeur moyenne m ($m = N_e \mu$) et une variance de $\sigma^2 = N_e \mu (1 - \mu)$.

Supposons que la probabilité pour qu'on ait au moins N_i émetteurs fonctionnant simultanément soit de 1%; dans ce cas, on calcule le nombre minimal N_i d'émetteurs comme suit:

$$N_i = m + 2,3\sigma$$

$$N_i = N_e \mu + 2,3\sqrt{N_e \mu (1 - \mu)}$$

On peut maintenant calculer les valeurs du rapport porteuse/densité de bruit, CND , pour diverses valeurs de N_i et différentes hypothèses de trafic. On calcule CND en retranchant la puissance de bruit brouilleuse de la puissance du signal utile. Ainsi:

$$CND = p.i.r.e. \text{ signal utile} - PL - \text{autres affaiblissements} + \text{gain du récepteur} - P_{bruit}$$

On trouvera dans l'Appendice 2 un exemple de ce calcul.

2.2.2 Analyse de la qualité de fonctionnement globale d'un système LEO du SMS à étalement de spectre

On a analysé la qualité de fonctionnement d'un système LEO du SMS à étalement de spectre sur les liaisons Terre-espace et espace-Terre aller et retour, en présence de bruit thermique, de brouillages causés par d'autres utilisateurs du système LEO du SMS et de brouillages imputables aux émetteurs du service mobile terrestre. Cette analyse est résumée dans le présent paragraphe. Pour un système à étalement de spectre total, les canaux aller et retour utilisent le même répéteur et les mêmes fréquences et constituent le brouillage interne du système qui affecte les porteuses utiles reçues au niveau de la station centrale ou des stations d'utilisateur. Par conséquent, les bilans de liaison RF sont calculés en tenant compte de tous les brouillages possibles et le modèle utilisé permettra en fin de compte d'optimiser le système.

On trouvera dans l'Appendice 2 les bilans des liaisons montante et descendante aller-retour établis à partir de valeurs prudentes afin d'obtenir les marges du système appropriées.

Il est instructif de suivre toutes les étapes du calcul de CND qui intègre les effets de tous les brouilleurs. C'est ce qui est fait dans l'Appendice 2. La méthode générale est décrite ci-après.

Après avoir calculé le niveau de la porteuse pour chacune des quatre liaisons (liaison montante aller, liaison descendante aller, liaison montante retour, liaison descendante retour), on peut traiter le brouillage sur chaque liaison comme la somme de toutes les porteuses brouilleuses au niveau du récepteur. On calcule le rapport porteuse/brouillage, C/N , résultant de chaque source de brouillage et on ajoute les diverses puissances de bruit équivalentes. Les rapports porteuse/densité de bruit s'ajoutent selon la formule bien connue «de l'inverse de la somme des inverses». Il convient de noter que les niveaux de bruit sont calculés pour une largeur de bande de 1,0 MHz, ce qui revient à ajouter 60 dB aux rapports porteuse/densité de bruit. On obtient ainsi le gain «par étalement».

Calculons par exemple le rapport total porteuse/densité de bruit pour le canal de la liaison montante aller. On calcule le rapport C/N_0 résultant du bruit thermique. Le signal utile dans ce cas a un niveau de porteuse de C_f dBW. Le bruit dû au brouillage sur la liaison montante retour est n fois le niveau de la porteuse C_r sur la liaison retour, où n représente le nombre d'utilisateurs simultanés. Ce bruit, distribué sur une largeur de bande B , s'exprime comme suit:

$$N = 10 \log n + C_r - 10 \log B$$

ce qui donne un rapport $(CND)_1$ de $C_f - N$. Sur cette même liaison, il y a aussi le brouillage imputable aux autres canaux des $(m - 1)$ liaisons montantes qui ont des codes d'étalement différents (m est le nombre de codes d'étalement utilisés).

Les porteuses «brouilleuses» interviennent pour

$$N_2 = 10 \log(m - 1) + C_f - 10 \log B$$

dans le bruit, ce qui donne:

$$(CND)_2 = C_f - N_2 \quad \text{dBHz}$$

La contribution du rapport CND des systèmes brouilleurs mobiles terrestres au bruit est fonction de l'intensité du trafic. Pour un trafic de E erlangs sur la liaison aller, on peut calculer $(CND)_3$ comme indiqué au paragraphe précédent.

On peut calculer ensuite le rapport composite porteuse/bruit C/N pour la liaison montante aller:

$$1/(CND) = 1/(CND)_0 + 1/(CND)_1 + 1/(CND)_2 + 1/(CND)_3$$

Il convient de noter que pour un système mixte à étalement de spectre et à bande étroite, il n'y a pas de porteuses «brouilleuses» ou de systèmes mobiles brouilleurs à prendre en considération.

Après avoir calculé le rapport CND composite pour la liaison montante et la liaison descendante, on peut calculer de la même façon un rapport composite global «liaison montante + liaison descendante». Cette valeur sera comparée à la valeur requise que l'on peut facilement obtenir à partir du débit R_b et de la valeur du rapport E_b/N_0 obtenue dans la pratique.

Ainsi:

$$(CND)_{requis} = E_b/N_0 + R_b$$

Ainsi la marge CND est:

$$\text{Marge} = (CND) - (CND)_{requis}$$

L'Appendice 2 donne une analyse complète pour un niveau de trafic brouilleur de 0,05 E. Le bilan de liaison présenté intègre l'incidence de l'angle d'élévation sur la marge de brouillage. En d'autres termes, pour un niveau de trafic brouilleur donné, on peut trouver un angle d'élévation pour lequel le système LEO a une marge de fonctionnement positive. Pour toutes les stations d'utilisateur du SMS situées dans le cône défini par l'angle d'élévation spécifié, le fonctionnement avec une marge positive est possible.

L'analyse peut être répétée pour différentes valeurs du trafic brouilleur: on obtient ainsi les valeurs pour la zone de service en fonction du brouillage. L'étude de l'exemple donné montre comment la qualité de fonctionnement d'un système LEO du SMS à étalement de spectre se détériore progressivement avec le brouillage.

2.2.3 Réduction des brouillages susceptibles d'être causés à un système LEO du SMS à étalement de spectre par des émetteurs de forte puissance à bande étroite

Dans les calculs précédents, on suppose que la distribution spectrale des signaux brouilleurs est identique à celle du bruit. Dans ce cas, les stations de base du système mobile en poste fixe seront, pour le système LEO du SMS, des brouilleurs à bande étroite de forte puissance. Il existe des techniques pour atténuer les effets de ces systèmes brouilleurs. L'une d'elles consiste à localiser le système brouilleur en fréquence puis à affaiblir les signaux brouilleurs au moyen d'un filtre réjecteur. Le traitement numérique des signaux permet de localiser facilement les systèmes brouilleurs à bande étroite de forte puissance dans le spectre. On calcule la transformée de Fourier rapide (TFR). Les signaux considérés sont confinés dans une bande de 1 MHz. Par transposition des signaux dans la bande allant du continu à 1 MHz, les signaux sont situés dans une gamme de fréquences pour laquelle des processeurs de signaux numériques de type pipeline peuvent calculer la TFR en temps réel. La suppression des quelques crêtes importantes qui apparaissent en présence de signaux à bande étroite de forte puissance correspond à l'action de filtres réjecteurs. Les signaux peuvent alors être reconvertis dans le domaine temps à l'aide d'une TFR inverse. Le calcul peut se faire avec un processeur de signaux standard utilisé pour la corrélation croisée, la poursuite Doppler et les transformées de Fourier. Etant donné que les filtres réjecteurs engendrent une légère distorsion du signal utile, ils ne seront utilisés selon toute vraisemblance que dans les cas de brouillage les plus graves. S'il n'y a pas plus de 10 filtres réjecteurs, la détection des signaux après la TFR inverse ne devrait pas poser de problèmes.

Il nous faut évaluer la probabilité pour qu'un certain nombre de stations de base émettent pendant un intervalle de temps donné. Les intervalles pendant lesquels les données sont recueillies sont courts par rapport à la durée d'occupation moyenne de l'utilisateur moyen du service mobile terrestre. Il convient donc d'examiner la probabilité pour que k émissions soient déclenchées pendant l'intervalle correspondant à la durée moyenne d'occupation. Si tel est le cas, tous les émetteurs k émettront à un instant t situé à l'intérieur de ce temps de maintien.

La formule exprimant la probabilité pour qu'il y ait k émissions dans un intervalle de temps t donné, avec n utilisateurs potentiels, est la suivante:

$$p = \binom{n}{k} p^k q^{(n-k)}$$

où:

- n : nombre total de licences délivrées et utilisées
- k : nombre d'émissions dans l'intervalle de temps considéré
- p : probabilité pour qu'une station soit active dans l'intervalle de temps t
- $q = (1 - p)$: probabilité pour qu'une station soit inactive
- $\binom{n}{k}$: coefficient binomial.

Etant donné que le système suppresseur de brouillages proposé ne supprimera que les brouillages des stations de base qui émettent les signaux les plus intenses en direction du satellite, il nous faut calculer la probabilité pour que le nombre de stations actives pendant un intervalle de temps donné soit supérieur à un nombre donné, et cela pour plusieurs cas. Par exemple, si 200 stations ont une puissance supérieure au seuil d'écrêtage, la probabilité pour que plus de 10 stations soient actives simultanément (et que par conséquent leurs signaux soient écrêtés) est de 5%. Pour 150 stations, la probabilité n'est que de 0,1%.

L'application de la TFR et de la technique d'écrêtage se traduira par une distorsion si les signaux écrêtés sont trop nombreux. Les distorsions de chaque équivalent de filtre réjecteur s'ajoutent les unes aux autres. Il faut donc fixer un seuil d'écrêtage afin de supprimer les brouillages des stations de base les plus puissantes et de ne pas écrêter les signaux des stations mobiles. Cela peut se faire sans nuire à la réalisation ou à l'efficacité du système.

APPENDICE 1

**Paramètres d'un système LEO du SMS à étalement
de spectre type et d'un système mobile terrestre**

Les paramètres d'un système du SMS à étalement de spectre type sont indiqués dans les Tableaux 1 et 2. Le message d'entrée codé à un certain débit binaire est transformé en un message codé ayant un certain débit de symboles. Chaque symbole est décomposé en éléments pour produire le signal de sortie à étalement de spectre au débit des éléments. Le spectre résultant est ensuite filtré pour éliminer les émissions hors bande.

TABLEAU 1

Paramètres d'un système LEO du SMS à étalement de spectre total type

Altitude de l'orbite, h	1 300 km	
Distance à 5° , d	3 753 km	
Période de l'orbite, T	111,6 min	
Durée de visibilité, T_p	21 min	
Débit des messages, R_b	1 400 bit/s	
Débit des symboles codés, R_s	2 800 bit/s	
Eléments par symbole, R_c	255	
Filtre de sortie	1,4	
Facteur de coupure		
Probabilité d'erreur, P_c	10^{-5}	
E_b/N_0 requis, $(E_b/N_0)_r$	2,3 dB valeur théorique	4,0 dB valeur pratique
Nombre d'utilisateurs simultanés, N_u	4	
Nombre de codes CAD, N_c	4	
p.i.r.e. de l'utilisateur	3 dBW (montante)	-2,3 dBW (descendante)
p.i.r.e. de station CAD	8,5 dBW (montante)	4,0 dBW (descendante)

TABLEAU 2

Paramètres d'un système à étalement de spectre et à bande étroite type

Altitude de l'orbite, h	1 300 km
Distance à 5° , d	3 753 km
Période de l'orbite, T	111,6 min
Durée de visibilité, T_p	21 min
Liaison aller	
Fréquence sur la liaison montante	149,9-150,05 MHz
Canal aller, N_c	1
p.i.r.e. de la station au sol	15 dBW
Débit dans le canal, r_b	14 000 bit/s
Débit de symboles codés, r_s	28 000 bit/s
Modulation	MDP-4 orthogonale
Fréquence sur la liaison descendante	400,15-401 MHz
p.i.r.e. du satellite	13 dBW
Liaison retour	
Fréquence sur la liaison montante	148-149,9 MHz
Nombre d'utilisateurs simultanés, N_u	7
p.i.r.e. de l'utilisateur	5 dBW
Débit de messages, R_b	1 200 bit/s
Débit de symboles codés, R_s	2 400 bit/s
Débit d'éléments, R_c	1 000 000 bit/s
Modulation	MDP-4
Fréquence sur la liaison descendante	137-138 MHz
p.i.r.e. du satellite	8 dBW

Les Tableaux 3 et 4 donnent des exemples de bilans de liaison pour les systèmes LEO du SMS à étalement de spectre types. Il peut y avoir quelques différences entre les paramètres des communications de ces Tableaux et ceux des paramètres des Tableaux 1 et 2 mais les valeurs indiquées n'en sont pas moins typiques et représentatives des valeurs concrètes réelles.

TABLEAU 3

**Bilan de liaison typique d'un système à étalement de spectre
pour un système à étalement de spectre total**

	Aller		Retour	
	Liaison montante	Liaison descendante	Liaison montante	Liaison descendante
Net P_t (W)/canal	0,1	2,0	2,0	1,0
G_t (dBi)	16	2,0	1,0	3,0
p.i.r.e. (dBW)	6,0	5,0	3,0	3,0
Affaiblissement spatial, L_s (dB)	147,37	146,76	147,37	146,76
Affaiblissement de polarisation, L_p (dB)	2	2	2	2
Affaiblissement de réception, L_r (dB)	0,5	2	0,5	2
G_r (dBi)	3,0	1,0	3,0	16
Niveau de la porteuse (dBW)	-140,87	-144,76	-143,87	-131,76
T_s (dBK)	26,3	27,0	26,3	24,8
G_t/T_s (dB(K ⁻¹))	-23,3	-26	-23	-3,3
C/N_0 (dB(Hz))	61,45	56,85	58,45	72,07
R_b (bit/s)	8 334	8 334	4 167	4 167
E_b/N_0 disponible	22,24	17,64	22,25	35,87

TABLEAU 4

Bilan de liaison pour un système à étalement de spectre et à bande étroite type

	Aller		Retour	
	Liaison montante	Liaison descendante	Liaison montante	Liaison descendante
P_t (dBW)	-1	11,2	4	-14
Elévation (degrés)	5	10	10	5
G_t (dBi)	16	1,9	1	3
p.i.r.e. (dBW)	15	13,1	5	-11
L_s (dB)	147,46	154,9	146,3	146,74
L_p (dB)	2	3	3	2
L_r (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5
G_r (dBi)	3	1	1,9	16
Niveau reçu (dBW)	-131,96	-144,3	-142,9	-144,24
T (dBK)	33,47	28,61	33,47	33,6
C/N_0 (dB(Hz))	63,17	55,69	52,23	50,76
$C/N_{utilisateurs}$ (dB(Hz))			50,46	
r_b (bit/s)	14 000	14 000	1 200	1 200
E_b/N_0 (dB)	21,7	14,23	21,4	19,97
$(E_b/N_0)_t$ (dB)		13,51		15,5
Marge (dB)		9,11		11,1

APPENDICE 2

Exemples de calculs illustrant l'application de certaines méthodes de partage**1. Exemple d'analyse du brouillage causé à un système mobile terrestre par un système LEO du SMS à étalement de spectre**

A partir des paramètres indiqués dans l'Appendice 1 et des équations reproduites dans la présente Annexe, on peut calculer les espacements géographiques pour divers cas.

1.1 Analyse du brouillage causé à des récepteurs du service mobile terrestre par des stations d'utilisateur du SMS

Dans le cas d'un récepteur du service mobile terrestre ou du service mobile brouillé par une station d'utilisateur du SMS, on prend une valeur de 2 W dans l'équation précitée pour obtenir un espacement géographique de 8 km. Les stations du service mobile terrestre peuvent subir, dans un rayon de 8 km, les effets de brèves salves de signaux radiofréquence produites par des stations d'utilisateur du système à étalement de spectre. Si on suppose qu'un million d'utilisateurs sont uniformément répartis sur l'empreinte utile (angle d'élévation de 5°) du satellite LEO, seuls 6 de ces utilisateurs se trouveraient au voisinage de la station subissant les brouillages. Si ces 6 stations émettaient une fois par jour et si chacune de ces émissions dépassait le niveau de sensibilité du récepteur, la probabilité de brouillage serait alors inférieure à 0,0007% du temps. Etant donné que la salve de 100 ms d'une station du système à étalement de spectre du SMS est probablement trop courte pour déclencher le silencieux, un récepteur inactif ne percevrait pas de brouillage. Pour un récepteur actif, dont le silencieux a déjà réagi à un signal utile, une salve risque de ne pas passer inaperçue mais elle ne sera pas considérée comme préjudiciable pour le trafic radiotéléphonique.

Une limite supérieure a été proposée dans le cas d'une distribution non uniforme des stations d'utilisateur du système à étalement de spectre situées à proximité des stations fixes ou mobiles au sol. Cette limite pourrait être 50 fois la valeur précitée. Les risques de brouillage n'existeraient que pendant 0,04% du temps.

Le partage des fréquences entre des stations d'utilisateur d'un système LEO du SMS à étalement de spectre et des récepteurs du service mobile terrestre est donc possible à condition de bien respecter l'espacement géographique préconisé plus haut. Dans les limites de cet espacement, la qualité de fonctionnement des récepteurs du service mobile terrestre ne devrait être affectée que de façon minimale puisque les salves sont de courte durée et que les émissions du SMS sont faiblement utilisées.

1.2 Analyse du brouillage causé aux récepteurs des stations au sol du service mobile terrestre par les stations de commande et d'acquisition de données (CAD)

Dans le cas de stations CAD d'un système LEO à étalement de spectre on obtient, si on prend une valeur de 8,5 dBW pour la p.i.r.e. du système SMS (équation du § 2.1 de l'Annexe 1), un espacement géographique d'environ 11 km qui protégera *les autres services* contre les effets des émissions des stations CAD.

Le partage des fréquences entre les stations CAD d'un système LEO du SMS et les récepteurs du service mobile terrestre est possible à condition de bien respecter la distance de coordination recommandée. La directivité de l'antenne à faisceau orientable d'une station CAD fait qu'un récepteur au sol fixe ou mobile situé à proximité ne subira que très peu de brouillages préjudiciables, pour la plupart des angles d'élévation d'une antenne de station CAD même si elle est située dans le rayon de coordination.

2. Exemple de calcul du bruit total produit par le service mobile terrestre sur un système LEO du SMS à étalement de spectre

Les systèmes LEO du SMS à étalement de spectre types, dont les paramètres généraux sont reproduits dans l'Appendice 1, n'utilisent que 1 MHz des 1,9 MHz de la bande 148-149,9 MHz pour la liaison Terre-espace. Cette bande est actuellement attribuée aux services fixe et mobile. Sur les 3 700 utilisateurs aux Etats-Unis d'Amérique, on peut raisonnablement penser que 50% utilisent le service simultanément. Si on suppose une distribution uniforme des utilisateurs dans la bande et un facteur d'activité vocale de 33%, il devrait y avoir environ 321 utilisateurs simultanés en tout temps aux Etats-Unis d'Amérique.

Un système du service mobile terrestre dispose normalement d'une station de base et d'un certain nombre de stations mobiles. La puissance des stations de base peut atteindre 100 W. Les stations mobiles fonctionnent généralement avec une puissance comprise entre 5 et 10 W. Etant donné que les stations de base et les stations mobiles émettent en alternance, on peut supposer que la puissance moyenne de toutes ces émissions est de 30 W.

La méthode décrite au § 2.2.1 de l'Annexe 1 permet de calculer les effets de ces émetteurs mobiles sur des systèmes LEO du SMS à étalement de spectre types. Les résultats des calculs sont résumés dans les Tableaux 5 à 8.

Il peut être intéressant de noter que lorsque les valeurs de l'Appendice 1 sont utilisées dans le calcul de l'intégrale permettant de déterminer P_{TOT} , on obtient le résultat suivant:

$$P_{TOT} = 2,18 N_i A$$

où:

$$\begin{aligned} \text{bruit/Hz} &= 10 \log (2,18 N_i) - A \text{ (dB)} - 10 \log (\text{largeur de bande}) - 3 \text{ dB affaiblissement de polarisation} \\ &= 10 \log (2,18 N_i) - 201 \end{aligned}$$

Le Tableau 5 indique la puissance induite par des systèmes du service mobile terrestre, pour différentes valeurs du trafic brouilleur. Ces valeurs seront utilisées dans l'exemple de calcul d'un bilan de liaison. Les Tableaux 6 et 7 indiquent la marge de fonctionnement pour un niveau de trafic donné en erlangs et une valeur spécifiée de l'angle d'élévation utilisateur-satellite. Le Tableau 8 peut être établi en calculant le bilan de liaison pour différentes hypothèses de trafic et en adaptant l'angle d'élévation pour une marge de fonctionnement négative. Le Tableau fait apparaître la dégradation progressive de la qualité de fonctionnement d'un système à étalement de spectre avec l'augmentation des brouillages. Il convient de noter toutefois que cette qualité de fonctionnement dépend beaucoup du diagramme de rayonnement de l'antenne du satellite.

3. Mesure expérimentale du bruit total produit par le service mobile terrestre sur un système LEO du SMS à étalement de spectre

Un satellite français expérimental S80/T a été lancé en août 1992 sur une orbite analogue à celle d'un système LEO du SMS (altitude: 1 300 km). Les signaux reçus par le satellite dans la bande 148,0-149,9 MHz sont réémis dans la bande 137,0-138,0 MHz. Les expériences faites avec des signaux à étalement de spectre ont corroboré l'analyse du bilan de liaison.

TABLEAU 5

Exemple de calcul de la puissance induite par des systèmes mobiles terrestres

Facteur vocal = 0,3

$N_e = 321$

Trafic (E)	N_i à 1% (2,3 σ)	P_{TOT} (dB(W/Hz))	Porteuse/densité de bruit	
			Aller	Retour
0,05	22	-184,3	47,93	42,41
0,09	40	-181,7	45,34	39,82
0,13	57	-180,2	43,79	38,28
0,18	74	-179,1	42,69	37,17
0,23	90	-178,2	41,83	36,31
0,27	106	-177,5	41,13	35,61
0,32	121	-176,9	40,54	35,03
0,36	136	-176,4	40,04	34,53
0,4	150	-176,0	39,62	34,10

TABLEAU 6

Exemple de bilan de liaison indiquant la marge de fonctionnement pour un trafic brouilleur et un angle d'élévation par rapport à la station d'utilisateur spécifiés

Utilisateurs simultanés	4
Canaux aller	4
Bande RF (kHz)	1 000
Trafic international (E)	0,05
Angle d'élévation (degrés)	12

	Liaison aller		Liaison retour	
	Montante	Descendante	Montante	Descendante
P_t (W)	0,11	1,26	1,58	0,30
G_t (dBi)	18,00	2,50	1,00	0,30
p.i.r.e.	8,50	3,50	2,99	-2,30
L_s (dB) (à 12°)	145,87	145,18	145,87	145,18
L_p (dB)	2,00	2,00	2,00	2,00
L_r (dB)	0,50	1,00	0,50	1,00
G_r (dB)	3,50	2,00	3,50	19,00
Porteuse (dBW)	-136,37	-142,67	-141,89	-131,48
T_s (K)	450,00	500,00	450,00	475,00
G_r/T_s (dB(K ⁻¹))	-23,03	-24,99	-23,03	-7,77
C/N_0 (dB(Hz))	65,69	58,94	60,18	70,35
R_b (bit/s)	8 334	8 334	4 167	4 167
E_b/N_0 (dB)	26,48	19,73	23,98	34,16
C/N_0	65,69	58,94	60,18	70,35
Utilisateurs <i>CND</i>	59,49	59,78	55,23	55,23
Canaux <i>CND</i>	55,23	55,23	48,47	48,17
Brouillage <i>CND</i>	47,93	100,00	42,41	100,00
Composite U et D	46,88	52,73	41,22	47,37
Aller et retour	45,88		40,27	
E_b/N_0 requis	4,0		4,0	
<i>CND</i> requis	43,21		40,20	
Marge	2,67		0,08	

TABLEAU 7

**Bilan de liaison indiquant la marge de fonctionnement pour un trafic brouilleur
spécifié et pour un système à étalement de spectre et à bande étroite type**

	Liaison aller		Liaison retour		Brouillage
	Montante	Descendante	Montante	Descendante	Montante
P_f (dBW)	-1	11,2	4	-14	
Élévation (degrés)	5	10	10	5	
G_t (dBi)	16	1,9	1	3	
p.i.r.e. (dBW)	15	13,1	5	-11	
L_s (dB)	147,46	154,9	146,3	146,74	
L_p (dB)	2	3	3	2	
L_r (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5	
G_r (dBi)	3	1	1,9	16	
Niveau reçu (dBW)	-131,96	-144,3	-142,9	-144,24	-124 ⁽¹⁾
T (dBK)	33,47	28,61	33,47	33,6	
C/N_0 (dB(Hz))	63,17	55,69	52,23	50,76	
$C/N_{utilisateurs}$ (dB(Hz))			50,46		
$C/N_{brouillage}$ (dB(Hz))					41,1
r_b (bit/s)	14 000	14 000	1 200	1 200	
E_b/N_0 (dB)	21,7	14,23	21,4	19,97	
$(E_b/N_0)_t$ (dB) avec brouillage	13,51		9,17		
Marge avec brouillage (dB)	9,11		4,77		

⁽¹⁾ On applique un filtrage à bande étroite à bord si le signal composite reçu est de forte intensité.

TABLEAU 8

**Résultats des analyses de bilans de liaison
pour divers niveaux de brouillage**

Trafic (E)	Angle d'élévation minimal (degrés)	Zone de service (milliers de km ²)
0,0	0	32 345
0,05	12	21 456
0,09	25	10 094
0,13	35	5 694
0,18	43	3 570
0,23	51	2 175
0,27	60	1 159
0,32	70	475
0,36	90	0