

Département des services spatiaux

CALCUL DE LA PROBABILITÉ DE BROUILLAGE PRÉJUDICIABLE ENTRE RÉSEAUX SPATIAUX (RAPPORTS C/I)

1 Introduction

Une administration qui ne parvient pas à mener à bien la coordination peut demander au Bureau d'étudier la probabilité de brouillage préjudiciable, conformément aux dispositions du numéro **11.32A**. Dans les cas où il n'est pas possible de mener à bien la coordination au titre du numéro **9.7**, le Bureau utilise la méthode fondée sur le calcul du rapport porteuse/brouillage (C/I)¹ pour une seule source de brouillage, décrite dans la Section B3 de la Partie B des Règles de procédure, afin d'estimer la probabilité de brouillage préjudiciable.

Dans cette méthode, le rapport C/I est calculé suivant les considérations géométriques de la Recommandation UIT-R S.470, et fait intervenir un facteur d'ajustement qui représente la quantité de puissance de brouillage qu'il convient de prendre en compte dans les calculs. On estime alors la probabilité de brouillage préjudiciable en comparant la valeur du rapport C/I ajusté à celle du rapport C/I requis. Le rapport C/I requis est calculé à partir d'un rapport C/N cible et d'une valeur K de 12,2 dB pour les porteuses numériques (ou 14 dB dans certains autres cas), ce qui correspond à un brouillage maximal admissible égal à 6% (ou 4%) de la puissance totale de bruit.

La méthode fondée sur le calcul du rapport C/I pour une seule source de brouillage est aussi largement utilisée par les administrations afin d'évaluer les risques de brouillages dans le cadre de la coordination des réseaux à satellite.

2 Rapport porteuse/bruit (C/N)

Le bilan d'une liaison rend compte des pertes et des gains d'un signal se propageant d'un bout à l'autre de la liaison. Les bilans de liaison sont utilisés pour la conception des liaisons de communication, et tiennent compte des objectifs liés à cette liaison, tels le type de service, les zones de service visées, les débits de transmission, la disponibilité de la liaison et la dimension des antennes, entre autres facteurs. Par conséquent, lorsque la fiche de notification d'un satellite est soumise au Bureau, les données qui y figurent ont été déduites de bilans de liaison qui tiennent compte des objectifs de la liaison concernée. Ces objectifs correspondent à un certain rapport porteuse/bruit (C/N), qui mesure le niveau de qualité de la liaison.

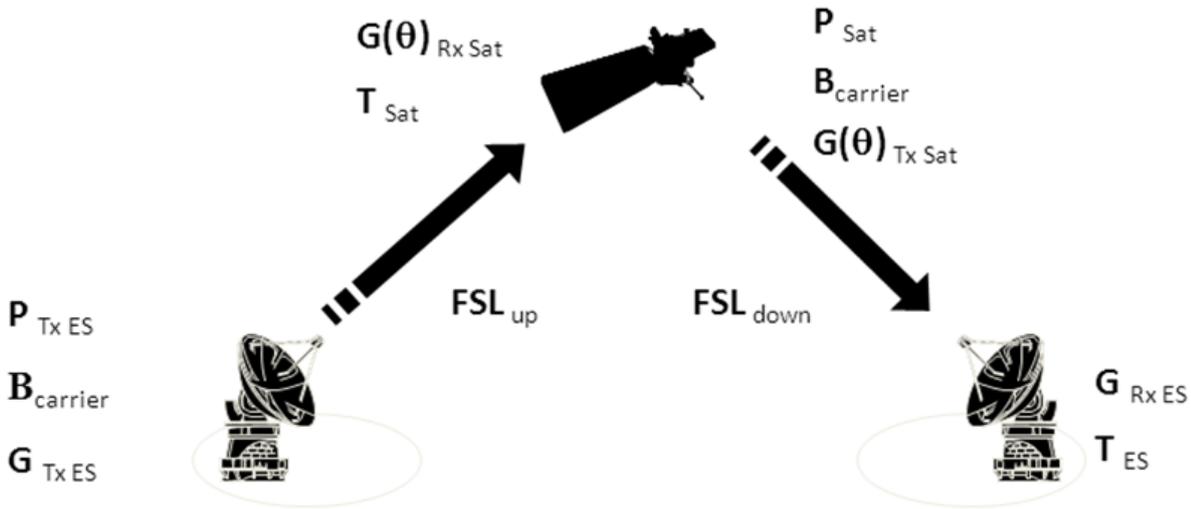
¹ La CMR-15 a adopté la Résolution **762**, dans laquelle les critères de puissance surfacique peuvent être utilisés à la place de la méthode fondée sur le rapport porteuse/brouillage (C/I) dans certains cas, indiqués dans la Résolution.

2.1 Calcul du rapport C/N

Le diagramme ci-dessous représente une liaison de communication par satellite caractéristique, composée d'une liaison montante et d'une liaison descendante, et indique les paramètres nécessaires au calcul du rapport C/N.

FIGURE 1

Liaison de communication par satellite



Le rapport porteuse/bruit (C/N) est donné par la formule suivante:

$$(C/N)_{up} = EIRP_{Tx ES} - FSL_{up} + (G(\theta)/T)_{RxSat} - B - k \quad (dB) \quad [1]$$

$$(C/N)_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} - (T_{Sat} + B + k) \quad (dB) \quad [2]$$

où:

$$C_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} \quad (dBW) \quad [3]$$

$P_{Tx ES}$ = puissance de la station terrienne d'émission (dBW)

$G_{Tx ES}$ = gain de la station terrienne d'émission (dBi)

FSL_{up} = affaiblissement en espace libre sur la liaison montante (dB)

$G(\theta)_{RxSat}$ = gain du satellite de réception dans la direction de la station terrienne d'émission (dBi)

T_{RxSat} = température de bruit du système de réception du satellite (dBK)

$B_{carrier}$ = largeur de bande de la porteuse (dBHz)

k = constante de Boltzmann = $-228,6$ (dBK)

$$(C/N)_{down} = EIRP_{sat} - FSL_{down} + (G/T)_{RxES} - B - k \quad (dBW) \quad [4]$$

$$(C/N)_{down} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{down} + G_{RxES} - (T_{ES} + B + k) \quad (dBW) \quad [5]$$

où:

$$C_{\text{down}} = P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{TxSat}} - \text{FSL}_{\text{down}} + G_{\text{RxES}} \quad [6]$$

P_{Sat} = puissance du satellite d'émission (dBW)

$G(\theta)_{\text{TxSat}}$ = gain du satellite d'émission en direction de la station terrienne de réception (dBi)

FSL_{down} = affaiblissement en espace libre sur la liaison descendante (dB) (voir [7])

G_{RxES} = gain de la station terrienne de réception (dBi)

T_{ES} = température de bruit du système de la station terrienne de réception (dBK)

B_{carrier} = largeur de bande de la porteuse (dBHz)

k = constante de Boltzmann = $-228,6$ (dBJ/K).

2.2 Affaiblissement de transmission en espace libre

L'affaiblissement de transmission en espace libre (FSL) désigne la perte de puissance due à l'étalement du signal dans l'espace; il est donné par la formule:

$$\text{FSL} = 20(\log f + \log d) + 32,45 \quad (\text{dB}) \quad [7]$$

où: f : fréquence (MHz)

d : distance (km).

La distance d entre une station terrienne et un satellite géostationnaire est donnée par la formule:

$$d = 42\,644 \sqrt{1 - 0,2954 \cos \Psi} \quad (\text{km}) \quad [8]$$

où:

$$\cos \psi = \cos \zeta \times \cos \beta \quad [9]$$

où:

ζ : latitude de la station terrienne

β : différence de longitude entre le satellite et la station terrienne.

REMARQUE – Si $\cos \psi < 0,151$, le satellite est au-dessous du plan horizontal.

La distance d_s entre deux satellites géostationnaires est donnée par (valable pour le calcul de l'affaiblissement en espace libre d'un signal se propageant d'un satellite géostationnaire à un autre):

$$d_s = 84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \quad \text{km} \quad [10]$$

où:

θ_g : écart angulaire géocentrique.

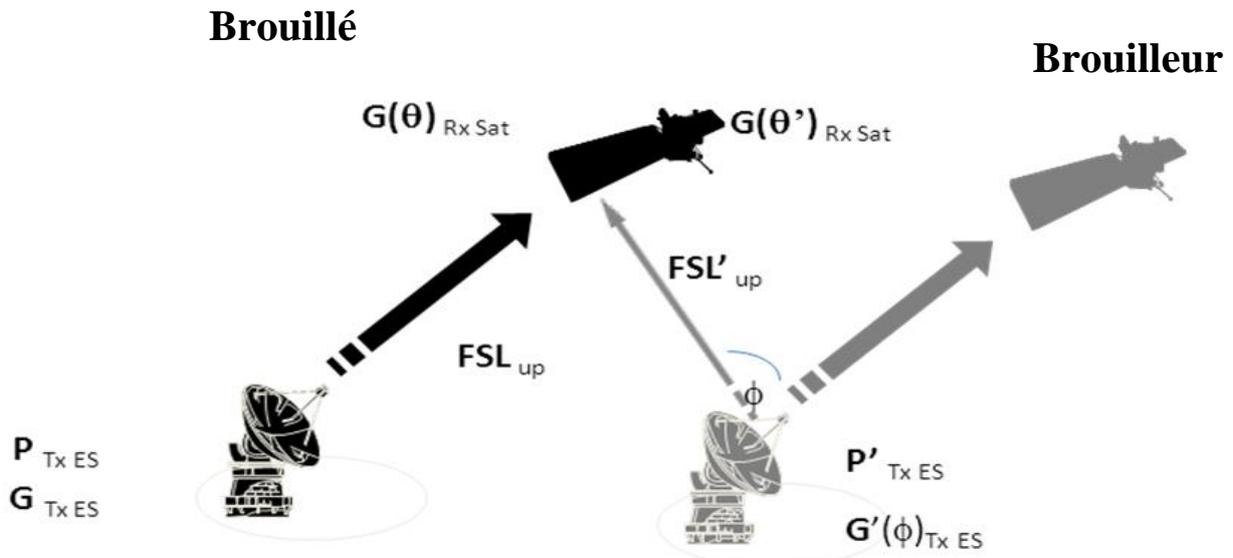
3 Calcul du rapport porteuse/brouillage (C/I)

3.1 Rapport C/I sur la liaison montante

Le diagramme ci-dessous représente un scénario de brouillage sur la liaison montante, dans lequel une station terrienne communiquant avec un satellite cause des brouillages au satellite adjacent.

FIGURE 2

Scénario de brouillage sur la liaison montante



Le rapport porteuse/brouillage (C/I) sur la liaison montante se calcule comme suit:

A partir de la formule [3]:

$$\begin{aligned} C_{up} &= P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} \\ I_{up} &= P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat} \end{aligned} \quad [11]$$

où:

- $P'_{Tx ES}$ = puissance de la station terrienne d'émission brouilleuse
- $G'(\phi)_{Tx ES}$ = gain de lobe latéral de la station terrienne d'émission brouilleuse dans la direction de la station spatiale brouillée

et:

- ϕ = écart angulaire topocentrique entre le satellite brouillé et le satellite brouilleur à partir de la station terrienne d'émission brouilleuse
- FSL'_{up} = affaiblissement en espace libre de la station terrienne d'émission brouilleuse
- $G(\theta')_{RxSat}$ = gain de la station spatiale de réception brouillée en direction de la station terrienne brouilleuse.

Par conséquent:

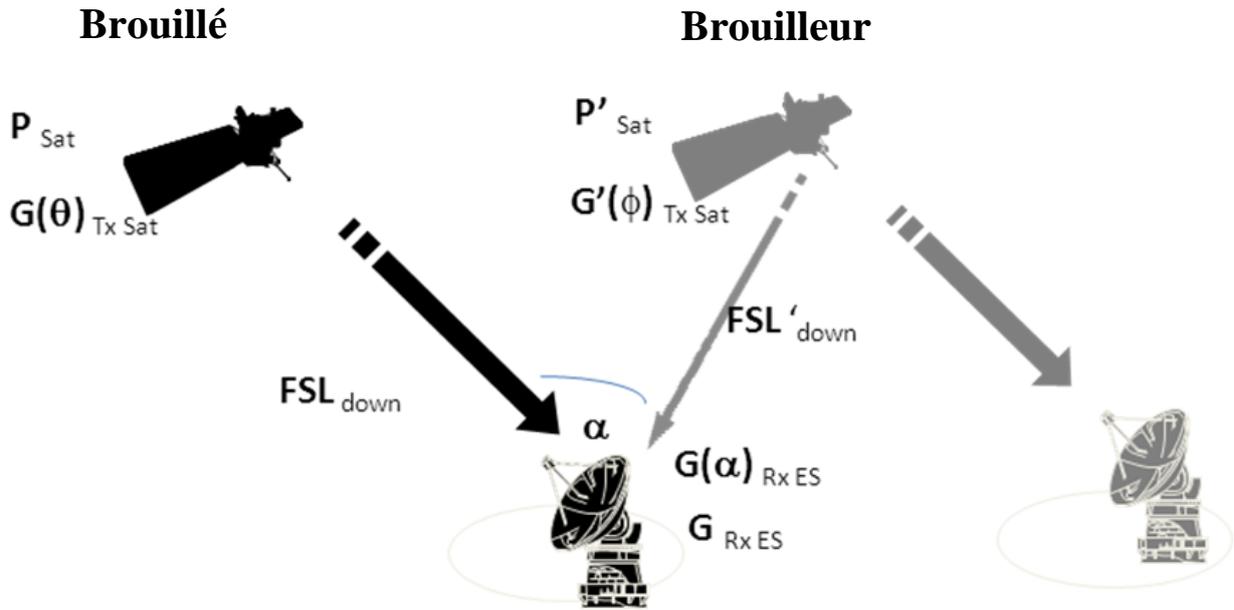
$$(C/I)_{up} = (P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat}) \quad [12]$$

3.2 Rapport C/I sur la liaison descendante

Le diagramme ci-dessous représente un scénario de brouillage sur la liaison descendante, dans lequel un satellite communiquant avec une station terrienne cause des brouillages à la station terrienne de réception du satellite adjacent.

FIGURE 3

Scénario de brouillage sur la liaison descendante



Le rapport porteuse/brouillage (C/I) sur la liaison descendante se calcule comme suit:

A partir de la formule [6]:

$$\begin{aligned} C_{\text{down}} &= P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{Rx ES}} \\ I_{\text{down}} &= P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{Rx ES}} \end{aligned} \quad [13]$$

où:

- P'_{Sat} = puissance du satellite d'émission brouilleur
- $G'(\phi)_{\text{Tx Sat}}$ = gain de l'antenne du satellite d'émission brouilleur dans la direction de la station terrienne brouillée
- FSL'_{down} = affaiblissement en espace libre du satellite d'émission brouilleur
- $G(\alpha)_{\text{Rx ES}}$ = gain de lobe latéral de la station terrienne brouillée dans la direction du satellite brouilleur

où:

- α = écart angulaire topocentrique entre le satellite brouillé et le satellite brouilleur à partir de la station terrienne de réception brouillée

Par conséquent:

$$(C/I)_{\text{down}} = (P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{Rx ES}}) - (P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{Rx ES}}) \quad [14]$$

3.3 Ecart angulaire topocentrique

On appelle écart angulaire topocentrique l'écart angulaire entre deux satellites géostationnaires à partir d'une station terrienne donnée. L'écart angulaire topocentrique θ_t se calcule à l'aide de la formule suivante:

$$\theta_t = \arccos \left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - \left(84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \right)^2}{2d_1 \cdot d_2} \right) \quad [15]$$

où:

d_1 et d_2 sont les distances respectives (km) entre la station terrienne et les deux satellites (voir [8])

θ_g = écart angulaire géocentrique en degrés entre les deux satellites, compte tenu des tolérances longitudinales de maintien en position.

3.4 Diagrammes d'antenne

Les lobes latéraux de rayonnement des antennes, bien qu'ils soient indésirables, ne peuvent pas être éliminés. Le diagramme de rayonnement d'une antenne est caractérisé par un lobe principal, des lobes latéraux, et des zones intermédiaires situées entre les deux. Il existe plusieurs enveloppes de rayonnement de référence, qui modélisent le gabarit des diagrammes de rayonnement des antennes. Le diagramme de référence figurant dans l'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications est fourni ci-dessous à titre d'exemple:

a) pour des valeurs de $\frac{D}{\lambda} \geq 100$ (gain maximum ≥ 48 dB environ):

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{pour } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{pour } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{pour } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= -10 && \text{pour } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned}$$

où:

D : diamètre de l'antenne } exprimés dans la même unité
 λ : longueur d'onde }

φ : angle par rapport à l'axe principal de l'antenne (degrés), égal à θ_t ou θ_g , selon le cas

$$G_1: \text{ gain du premier lobe latéral} = 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$$

Dans le cas où $\frac{D}{\lambda}$ n'est pas donné, il peut être évalué à partir de l'expression $20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7,7$, dans laquelle G_{max} (dB) est le gain du lobe principal de l'antenne.

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \frac{20 \lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \text{ degrés} \\ \varphi_r &= 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \text{ degrés} \end{aligned}$$

b) pour des valeurs de $\frac{D}{\lambda} < 100^4$ (gain maximum < 48 dB environ):

$$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi\right)^2 \quad \text{pour } 0 < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{pour } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{pour } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{pour } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

D'autres diagrammes d'antenne de référence figurent dans les références suivantes:

- Annexe 3 de l'Appendice 7 du Règlement des radiocommunications
- Recommandation UIT-R S.465-6
- Recommandation UIT-R S.580-6
- Recommandation UIT-R S.1855-0
- Recommandation UIT-R M.694-1
- Recommandation UIT-R BO.1213-1
- Recommandation UIT-R BO.1295
- Recommandation UIT-R BO.1900
- Recommandation UIT-R BO.2063-0.

4 Facteur d'ajustement

La quantité de puissance de la porteuse brouilleuse à prendre en considération dans la porteuse utile s'obtient en utilisant le rapport entre la largeur de bande de la porteuse utile et la largeur de bande de la porteuse brouilleuse. Ce rapport est connu sous le nom de facteur d'ajustement. Comme son nom l'indique, le facteur d'ajustement sert à ajuster le calcul du rapport C/I d'après les expressions [12] et [14], afin qu'il soit tenu compte de la quantité de puissance de la porteuse brouilleuse à prendre en considération.

Dans le cas de porteuses numériques produisant un brouillage assimilable à du bruit, si la largeur de bande de la porteuse utile est inférieure à celle de la porteuse brouilleuse, seule une partie de la puissance de la porteuse brouilleuse est prise en compte dans le calcul du rapport C/I . Si, inversement, la largeur de bande de la porteuse utile est supérieure à celle de la porteuse brouilleuse, il est tenu compte des effets de porteuses brouilleuses multiples sur une porteuse utile.

Dans le cas de porteuses brouilleuses analogiques, si le spectre de la puissance brouilleuse est inconnu, il est possible de calculer le niveau de brouillage à partir de l'approximation selon laquelle la densité spectrale de puissance de la porteuse brouilleuse est constante sur la largeur de bande de la porteuse utile. La largeur de bande équivalente BW_{eqi} est alors donnée par la formule:

$$BW_{eqi} = \text{Puissance de crête totale} / \text{Densité maximale de puissance.}$$

Dans le cas d'une situation de brouillage entre fréquences différentes causé par une porteuse TV-MF à une autre porteuse TV-MF, on utilise les gabarits du rapport de protection définis dans les Règles de procédure relatives aux § 3.5.1 et 3.8 de l'Annexe 5 de l'Appendice 30.

Les trois méthodes qui permettent de tenir compte de la puissance de brouillage sont résumées dans le tableau ci-dessous:

TABLEAU 1

Méthodes de calcul du facteur d'ajustement

Utile Brouilleuse	Numérique	Analogique (autre que TV/MF)	Autre	TV/MF
Numérique	MÉTHODE 1: Ajustement en fonction du rapport de recouvrement de la largeur de bande utile à la largeur de bande brouilleuse			
TV/MF	MÉTHODE 2: Ajustement en fonction du rapport de recouvrement de la largeur de bande utile à la largeur de bande brouilleuse équivalente		MÉTHODE 1: Même fréquence	
Analogique (autre que TV/MF)			MÉTHODE 3: Fréquences différentes (rapport de protection relatif)	
Autre			MÉTHODE 2	

5 Détermination du rapport *C/I* requis

Les critères de protection contre le brouillage dû à une source unique pour les porteuses numériques et analogiques autres que TV-MF sont définis par un objectif de rapport *C/N* et une valeur de 12,2 dB ou 14 dB pour *K*. On peut résumer ces critères au moyen du tableau suivant:

Type de porteuse utile \ Type de porteuse brouilleuse	Numérique	Analogique (autre que TV-MF)
Analogique (TV-MF)	$C/N + 14$ (dB)	
Numérique	$C/N + 12,2$ (dB)	
Analogique (autre que TV-MF)	$C/N + 12,2$ (dB)	
Autre	$C/N + 14$ (dB)	

Dans le cas d'une porteuse brouilleuse de type analogique TV-MF ou autre que numérique et autre que TV-MF, on peut résumer les critères de protection de la manière suivante:

Type de porteuse utile \ Type de porteuse brouilleuse	Analogique (TV-MF) ou autre
Analogique (TV-MF)	$C/N + 14$ (dB)
Numérique	Si $BW_w \leq BW_{eqi}$ alors $C/N + 5,5 + 3,5 * \log(BW_w)$ (dB)
	Si $BW_w > BW_{eqi}$ alors $C/N + 12,2$ (dB)
Analogique (autre que TV-MF)	$11,4 + 2 * \log(BW_w)$ (dB)
Autre	$11,4 + 2 * \log(BW_w)$ (dB)

où:

BW_w : largeur bande nécessaire de la porteuse utile (MHz)

BW_{eqi} : largeur de bande équivalente de la porteuse brouilleuse (MHz)

C/N : rapport porteuse/bruit (dB).

Dans la Section B3 de la Partie B des Règles de procédure, les types de porteuse sont fonction de la classe d'émission (Point C.7.a de l'Annexe 2 de l'Appendice 4):

- Analogique (TV-MF):
Lorsque le premier caractère de la classe d'émission (point C.7.a de l'Annexe 2 de l'Appendice 4) est «F» et que le troisième caractère est «F» ou «W».
- Analogique (autre que TV-MF):
Lorsque le premier caractère de la classe d'émission est «F» et que le troisième caractère n'est pas «F» ni «W».
- Numérique:
Lorsque le premier caractère de la classe d'émission est «G».
- Autre:
Lorsque le premier caractère de la classe d'émission n'est pas «F» ni «G».

6 Marge additionnelle

Dans le Tableau 2 de la Recommandation UIT-R S.741-2, le rapport C/N est défini comme étant «le rapport (dB) de la puissance de la porteuse à celle du bruit total, comprenant tous les bruits internes du système et le brouillage dû aux autres systèmes».

Par conséquent, et pour se conformer à cette définition, il est prévu d'ajouter aux marges calculées sur la base des valeurs de bruit interne fournies par les administrations concernées, une marge additionnelle de 0,46 dB pour les cas faisant intervenir des émissions TV analogiques utiles et de 1,87 dB pour les autres émissions utiles, sauf si l'objectif C/N soumis comporte déjà une marge pour tenir compte des brouillages entre systèmes. Ces marges sont calculées dans la Pièce jointe 2 de la Section B.3 des Règles de procédure.

7 Choix de l'emplacement correspondant au cas le plus défavorable

Pour obtenir le rapport C/I dans le cas le plus défavorable, on peut choisir les emplacements des stations terriennes comme suit:

Liaison montante

La station terrienne utile se situe à la limite de la zone de service du faisceau de réception utile. La station terrienne brouilleuse se situe à l'intérieur de la zone de service du faisceau de réception brouilleur, au point où le gain du faisceau de réception utile est le plus élevé.

Liaison descendante

La station terrienne utile se situe au bord de la zone de service du faisceau d'émission utile, au point où le gain du faisceau d'émission brouilleur est le plus élevé.

8 Hypothèses visant à simplifier les calculs

Etant donné que les différences de valeur entre les angles topocentriques et géocentriques sont faibles, il est possible de déterminer le rapport C/I de manière assez précise en remplaçant les premiers par les seconds dans les calculs. De plus, la différence en termes d'affaiblissement en espace libre entre des signaux qui se propagent le long de trajets différents, mais utilisent en partage la même bande de fréquences, est faible. A partir de ces hypothèses, on peut simplifier les formules [12] et [14] exprimant le rapport C/I de la manière suivante:

A partir de la formule [12]:

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

En remplaçant ϕ par ϕ_g et en supposant que $FSL_{up} = FSL'_{up}$, on obtient:

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} + G(\theta')_{RxSat})$$

où:

ϕ_g = écart angulaire géocentrique entre le satellite brouillé et le satellite brouilleur à partir de la station terrienne d'émission brouilleuse.

De manière analogue, sur la liaison descendante, il est possible de calculer le rapport C/I de manière assez précise en utilisant la formule suivante obtenue à partir de la formule [14]:

$$(C/I)_{down} = (P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} + G_{RxES}) - (P'_{Sat} + G'(\phi)_{TxSat} + G(\alpha_g)_{RxES}) \quad [14]$$

où:

α_g = écart angulaire géocentrique entre le satellite brouillé et le satellite brouilleur à partir de la station terrienne de réception brouillée.