

RECOMMANDATION UIT-R SA.1742

Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes à liaisons interplanétaires en espace lointain fonctionnant dans le sens espace vers Terre au voisinage de 283 THz

(Question UIT-R 235/7)

(2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation spécifie les paramètres techniques (fréquences, liaison, caractéristiques de signaux et de données, paramètres d'antenne, etc.) et les caractéristiques opérationnelles des systèmes à liaisons interplanétaires en espace lointain fonctionnant dans le sens espace vers Terre au voisinage de 283 THz, qui pourraient être utilisés dans les études de partage.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'on planifie actuellement l'utilisation par certains systèmes à satellites de liaisons de télécommunication pour les radiocommunications interplanétaires en espace lointain au voisinage de 283 THz;
- b) que, sur la base des progrès techniques récemment enregistrés, les astronomes œuvrent de concert pour construire des télescopes et faire des observations dans cette partie du spectre;
- c) que cette partie du spectre est également utilisée pour d'autres services de Terre et spatiaux;
- d) que cette partie du spectre est également utilisée à des fins scientifiques ou industrielles autres que celles liées aux radiocommunications;
- e) que les mécanismes de brouillage entre satellites fonctionnant dans l'espace lointain et systèmes passifs tels que les systèmes d'astronomie fonctionnant au-dessus de 20 THz peuvent être différents de ceux qui surviennent dans la gamme des fréquences radioélectriques,

reconnaissant

- 1 que, conformément au numéro 78 de l'article 12 de la Constitution de l'UIT, les fonctions du Secteur des radiocommunications consistent entre autres à «... procéder à des études sans limitation quant à la gamme de fréquences et à adopter des Recommandations ...»;
- 2 que, lorsqu'elles mènent des études ou élaborent des projets de nouvelle Recommandation, les Commissions d'études doivent considérer, au titre de la Note 2 du numéro 1005 de l'Annexe de la Convention de l'UIT, que le terme «radiocommunications» se rapporte également aux ondes électromagnétiques dont la fréquence est supérieure à 3 000 GHz et qui se propagent dans l'espace sans guide artificiel;
- 3 que l'utilisation et le partage de cette partie du spectre n'ont pas été étudiés de manière approfondie par l'UIT-R,

recommande

1 que, dans les études de partage relatives aux satellites de recherche spatiale fonctionnant dans le sens espace vers Terre au voisinage de 283 THz dans l'espace lointain, il soit tenu compte des paramètres techniques et opérationnels exposés dans les Annexes 1 et 2.

Annexe 1

1 Introduction

La demande accrue de spectre et les progrès techniques conduisent à s'intéresser davantage à l'utilisation des fréquences au-dessus de 3 000 GHz pour les radiocommunications en espace libre. Les nombreuses améliorations techniques récemment enregistrées dans le domaine des télécommunications par fibres optiques, en particulier dans le domaine des lasers, de la modulation et des techniques de réception, ont permis de réaliser des liaisons de radiocommunication dans les bandes au-dessus de 3 000 GHz. Les radiocommunications en espace libre à des fréquences supérieures à 3 000 GHz permettent d'acheminer des débits binaires plus élevés en utilisant des systèmes moins lourds que les systèmes radioélectriques classiques et permettent de satisfaire aux spécifications de gain et de directivité applicables aux faisceaux utilisés pour les applications en espace lointain.

1.1 Considérations liées aux fréquences

A l'heure actuelle, les liaisons de radiocommunication en espace libre au-dessus de 3 000 GHz qui suscitent le plus d'intérêt se situent au voisinage de 200, 283, 311 et 353 THz¹, ce qui correspond à des longueurs d'onde d'environ 1,5, 1,06, 0,965 et 0,850 μm . Il s'agit aussi des fréquences les plus utilisées pour les télécommunications par fibres optiques. Dans le cas de radiocommunications interplanétaires en espace libre dans le sens espace vers Terre, on s'intéresse essentiellement à l'utilisation d'amplificateurs à fibres optiques dopés à l'ytterbium (Yb) et exploités à 1,06 μm en configuration oscillateur maître/amplificateur de puissance (MOPA, *master-oscillator-power amplifier*), à l'utilisation de lasers fonctionnant en régime déclenché, de lasers à grenats d'yttrium et d'aluminium dopés au néodyme (Nd:YAG) ou des lasers à cristaux de vanadium dopés au néodyme (Nd:YVO₄), à une fréquence d'exploitation voisine de 283 THz (1,06 μm), bien que, suivant les spécifications de la mission, d'autres fréquences soient envisageables. On utilise principalement les lasers Yb, Nd:YAG et Nd:YVO₄, en raison de leur disponibilité et de leur fiabilité.

1.2 Paramètres de mission types

La détermination des paramètres techniques adaptés à l'analyse des brouillages devrait être fondée sur les caractéristiques de missions interplanétaires types vers Mars et Jupiter. Pour minimiser le poids des systèmes utilisés et la consommation d'énergie, les liaisons doivent permettre de répondre aux besoins de radiocommunication apparaissant peu après le lancement et perdurant tout au long de la mission, ce qui rend inutiles les systèmes de radiocommunication additionnels. La longueur

¹ 1 THz = 1 000 GHz.

d'une liaison variera donc de quelques milliers de km à plusieurs unités astronomiques (UA)². Les distances de la Terre à Mars ou à Jupiter sont comprises entre 0,5 et 6,2 UA. On trouvera dans le Tableau 1 un récapitulatif des paramètres techniques fondamentaux d'une liaison en espace lointain exploitée à 283 THz dans le sens espace vers Terre.

2 Considérations relatives à la liaison

On peut utiliser un laser Yb, Nd:YAG ou Nd:YVO₄ pour une liaison en espace lointain exploitée à 283 THz dans le sens espace vers Terre. Le faisceau est en principe émis par un télescope de 30 cm de diamètre situé à bord de l'engin spatial et reçu sur Terre par un télescope de diamètre équivalent compris entre 4,2 m et 10 m³.

TABLEAU 1

Paramètres techniques associés à deux missions de référence en espace lointain utilisant une liaison à 283 THz dans le sens espace vers Terre

Paramètre	Mars	Jupiter
Puissance de l'émetteur	5 W (en moyenne)	
Diamètre de l'émetteur	30 cm	
Fréquence d'émission (longueur d'onde)	283 THz (1,06 μm)	
Modulation	Modulation d'impulsions en position (MIP) ($M = 64$ à 256) avec codage concaténé	
Précision du pointage	0,35 μrad	
Longueur de la liaison	0,5 à 2,5 UA	4,2 à 6,2 UA
Débit binaire (en journée au niveau d'une station terrienne) ⁽¹⁾	3 à 30 Mbit/s (antenne de station terrienne de 4,2 m)	1,5 à 3 Mbit/s (antenne de station terrienne de 10 m)
Diamètre du récepteur	Diamètre équivalent compris entre 4,2 et 10 m	
Type de détecteur	Matrice de photodiodes à avalanche InGaAsP/InP en mode Geiger	
Marge de puissance requise sur la liaison	2 à 3 dB	

⁽¹⁾ Les débits binaires nocturnes sur Terre sont supérieurs d'environ 30% (1,13 dB).

2.1 Qualité de fonctionnement de la liaison

A l'instar d'un système fonctionnant en espace lointain dans la gamme classique des fréquences radioélectriques, la qualité de fonctionnement d'une liaison exploitée à 283 THz est mesurée en débit binaire et taux d'erreurs binaires (TEB). Elle est calculée en fonction de la puissance, de la

² 1 UA ≈ 149 597 870 km.

³ Pour une liaison de télécommunication en espace libre au voisinage de 283 THz, un télescope est en fait une antenne.

qualité du télescope, de considérations liées à la propagation, du bruit et de la sensibilité du récepteur. Chacun de ces paramètres dépend de variables additionnelles.

2.1.1 Débit binaire

Contrairement à un système fonctionnant en espace lointain dans la gamme classique des fréquences radioélectriques, le débit binaire n'est pas exactement inversement proportionnel – tous les autres paramètres étant constants par ailleurs – au carré de la distance de propagation. Cette relation est toutefois une très bonne approximation dans le cas d'une liaison dont une des extrémités se trouve à proximité de Mars et de Jupiter et peut donc servir de règle empirique. Le débit binaire en provenance de Mars variera en fonction de nombreux paramètres, dont la longueur de la liaison et sa position par rapport au Soleil. Un tel débit sera généralement environ dix fois supérieur au débit de données émises depuis le voisinage de Jupiter.

2.1.2 TEB

Pour être conservées, les trames de données doivent présenter un TEB inférieur à 10^{-6} après correction. 99% des trames de données d'une liaison doivent pouvoir être conservées.

2.1.3 Spécification de la marge

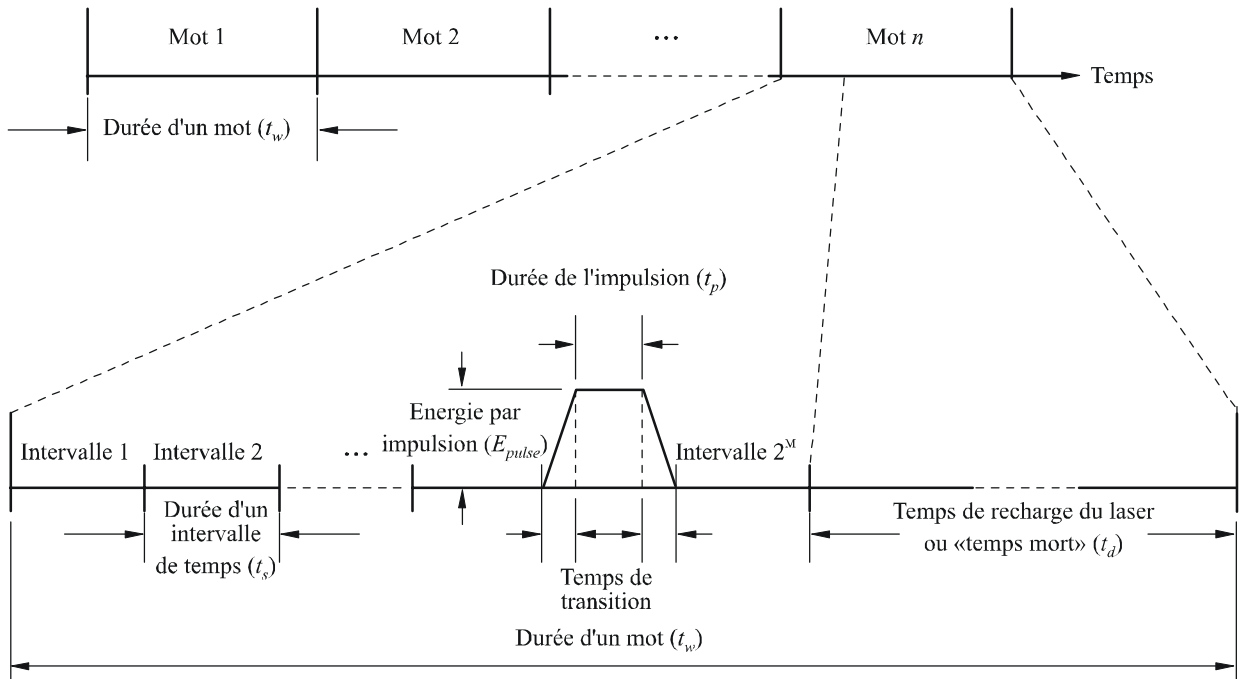
Une marge de l'ordre de 2 à 3 dB est généralement requise pour une liaison en espace lointain ou interplanétaire exploitée à 283 THz dans le sens espace vers Terre. Celle-ci dépend, entre autres, des conditions météorologiques, de l'heure et de l'angle d'élévation.

2.2 Modulation

Les liaisons interplanétaires en espace lointain exploitées au voisinage de 283 THz utiliseront la modulation MIP. Cette technique de modulation permet la détection directe (plus précisément le comptage des photons) par le récepteur au lieu d'utiliser des récepteurs cohérents. Le signal MIP fera l'objet d'un codage concaténé.

La modulation MIP fait intervenir une seule impulsion d'énergie pendant la durée d'un mot. M bits de données peuvent être transmis à l'aide d'une seule impulsion d'énergie occupant un des 2^M intervalles de temps d'un mot. Une partie de la durée totale d'un mot sert à recharger le laser et ne sera jamais utilisée pour transmettre une impulsion. Ce temps de recharge, ou «temps mort», occupe souvent l'essentiel d'un mot aux faibles débits mais devient moins important aux débits plus élevés. Les caractéristiques temporelles d'un signal MIP et les mesures correspondantes sont illustrées sur la Fig. 1.

FIGURE 1
Caractéristiques du signal MIP



1742-01

2.3 Puissance disponible

Un émetteur laser de type Yb, fonctionnant en régime déclenché, Nd:YAG ou Nd:YVO₄, fournit généralement une puissance moyenne de 5 W. La puissance crête varie en fonction du débit binaire mais peut être de l'ordre de 30 à 40 dBW. La procédure indiquée ci-après permet de calculer la puissance crête, P_{peak} , fournie par un émetteur MIP. Les paramètres suivants sont requis:

- M : indice de modulation
- P_{ave} : puissance moyenne d'émission (W)
- t_d : temps mort (s)
- t_p : durée d'une impulsion de l'émetteur (s)
- t_s : durée d'un intervalle de temps (s).

Etape 1: Calculer la durée d'un mot, t_w , comme suit:

$$t_w = M \cdot t_s + t_d \quad \text{s} \quad (1)$$

Etape 2: Calculer l'énergie par mot, E_{word} , comme suit:

$$E_{word} = P_{ave} \cdot t_w \quad \text{J} \quad (2)$$

NOTE 1 – Comme il n'y a qu'une impulsion par mot, l'énergie par impulsion est égale à l'énergie par mot (c'est-à-dire $E_{pulse} = E_{word}$).

Etape 3: Calculer la puissance crête d'émission, P_{peak} , comme suit:

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{t_p} \quad \text{W} \quad (3)$$

2.4 Signal reçu

La méthode générale pour calculer le niveau du signal de fréquence 283 THz reçu par la station terrienne est identique à celle qu'on utilise pour les systèmes radioélectriques classiques:

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{dBW} \quad (4)$$

où:

P_S : puissance du signal reçu

P_t : puissance moyenne de sortie du laser (valeur généralement comprise entre 4,7 et 7,0 dBW)

G_t : gain de l'antenne d'émission (valeur type: 119 dB). Son calcul est détaillé au § 2.6.2

G_r : gain de l'antenne de réception (valeur généralement comprise entre 129 et 149 dB). Son calcul est détaillé au § 2.6.3

L_t : affaiblissements dans l'émetteur

L_r : affaiblissements dans le récepteur

L_p : affaiblissements dus au dépointage

L_a : affaiblissements dans l'atmosphère le long de la liaison espace vers sol

L_s : affaiblissement en espace libre.

2.5 Affaiblissements sur la liaison

Il existe cinq sources principales d'affaiblissements sur la liaison:

- les affaiblissements internes à l'émetteur, L_t , qui comprennent les effets des affaiblissements par absorption, diffusion et réflexion du train d'impulsions optiques dans l'émetteur;
- les affaiblissements internes au récepteur, L_r , qui comprennent les effets des affaiblissements par absorption, diffusion et réflexion du train d'impulsions optiques dans le récepteur;
- les affaiblissements dus au dépointage, L_p , qui comprennent les effets de gigue de l'antenne ou de l'engin spatial et le dépointage de l'antenne d'émission;
- les affaiblissements dans atmosphère, L_a , qui comprennent les effets de la diffusion et des turbulences atmosphériques;
- l'affaiblissement en espace libre, L_s , dû à l'espacement physique entre l'émetteur et le récepteur.

Les valeurs de chaque source d'affaiblissement varient en fonction de la conception des équipements, de leur ancienneté, des spécifications et de la phase de la mission. Les valeurs d'affaiblissement à utiliser pour une analyse de brouillage type sont proposées dans le Tableau 2. La propagation dans l'atmosphère dans cette partie du spectre a été étudiée en détail par la Commission d'études 3 des radiocommunications dans les Recommandations UIT-R P.1621 et UIT-R P.1622.

TABLEAU 2

Paramètres techniques associés à deux missions de référence en espace lointain utilisant une liaison à 283 THz dans le sens espace vers Terre

Mécanisme d'affaiblissement	Valeur type
Affaiblissements dans l'émetteur, L_t	0,63 (= -2 dB)
Affaiblissements dans le récepteur, L_r	0,63 (= -2 dB)
Affaiblissements dus au dépointage, L_p	0,63 (= -2 dB)
Affaiblissements dans l'atmosphère, L_a	0,89 (= -0,5 dB) à 90° 0,56 (= -2,5 dB) à 30°

L'affaiblissement en espace libre, L_s , d'une liaison exploitée à 283 THz se calcule comme pour les systèmes radioélectriques classiques:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (5a)$$

A 283 THz, cette expression se réduit à:

$$L_s = \frac{7,169 \times 10^{-15}}{R^2} \quad (5b)$$

où:

R : distance entre l'émetteur et le récepteur (m).

2.6 Paramètres associés aux télescopes d'émission/de réception

Les liaisons de radiocommunication interplanétaires en espace lointain exploitées au voisinage de 283 THz utiliseront des télescopes comme antenne d'émission ou de réception. Les paramètres types d'un télescope d'émission seront très différents de ceux d'un télescope de réception, ce qui aura une incidence sur leur diagramme de gain respectif. Les diagrammes d'antennes d'émission et de réception seront également différents puisque le système optique d'émission est généralement alimenté par un faisceau à distribution gaussienne alors que le système optique de réception contient un détecteur plan. On se reportera à l'Annexe 2 pour obtenir les enveloppes de diagrammes de gain d'antenne d'émission ou de réception fonctionnant au voisinage de 283 THz.

2.6.1 Diamètre

Aux fins d'analyse des brouillages, on supposera que le diamètre de l'antenne d'émission est de 30 cm. L'ouverture d'émission sera ou non occultée par une occultation de 3 cm de diamètre.

Le diamètre équivalent de l'antenne de réception peut varier entre 1 et 10 m mais sera au moins égal à 4,2 m pour la plupart des applications. Aux fins d'analyse des brouillages, des diamètres de 1; 4,2 et 10 m seront considérés. L'ouverture de réception principale présentera une occultation secondaire de diamètre au plus égal à 20% du diamètre de l'ouverture principale.

2.6.2 Diagramme de gain à l'émission

L'émetteur utilise un télescope alimenté par un laser. Ce type de laser ne fonctionne en principe qu'au mode de cavité le plus bas, TEM₀₀, ce qui correspond à la génération d'un faisceau de distribution d'énergie gaussienne présentant une intensité maximale sur l'axe d'émission. Le diagramme de faisceau est conçu de telle sorte que, lorsque l'intensité du faisceau décroît avec la séparation angulaire par rapport à l'axe d'émission, seuls quelques pourcents de la puissance sont perdus. Les deux points de référence considérés sont ceux pour lesquels l'amplitude du faisceau diminue de 37% ou 13% par rapport à l'amplitude sur l'axe. Ils sont respectivement appelés points à 1/e et à 1/e² et sont fréquemment mentionnés pour caractériser le diagramme d'émission d'un laser.

La largeur de faisceau totale au point à 1/e² est approximativement donnée par:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (6)$$

où:

- θ_{1/e^2} : largeur de faisceau (rad)
- λ : longueur d'onde (m)
- D : diamètre d'ouverture (m).

Dans le cas d'un faisceau gaussien de fréquence 283 THz émis depuis une ouverture de 30 cm, la largeur de faisceau à 1/e² est approximativement égale à $4,5 \times 10^{-6}$ rad.

Pour le terminal d'émission, on peut utiliser les équations données ci-après pour calculer le diagramme de rayonnement en champ lointain d'un laser à ondes planes d'amplitude gaussienne alimentant un télescope. L'utilisation de ces équations repose sur les hypothèses suivantes:

- la source laser est caractérisée par une émission gaussienne monomode;
- le diagramme de gain d'antenne est mesuré en champ lointain; et
- l'ouverture est circulaire.

Le diagramme de gain d'un télescope d'émission de rayon a , alimenté par une onde plane d'amplitude gaussienne de rayon de contour, ω , (distance entre l'axe central du système optique et le point d'intensité 1/e²) et présentant une occultation centrale de rayon, b , est donné par l'équation (7). Le terme G_0 correspond à la limite supérieure du gain d'antenne, obtenue pour une ouverture circulaire non occultée uniformément éclairée. Le second terme, $g_t(\alpha, \gamma, X)$, est un terme d'efficacité de gain, qui rend compte des effets d'occultation, de troncature, d'intensité hors axe et de défocalisation.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad \text{dBi} \quad (7)$$

où:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (8)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (10)$$

A : aire de l'ouverture du télescope (m²)

a : rayon de l'ouverture primaire (m)

b : rayon de l'occultation (m)

J_0 : fonction de Bessel du premier type d'ordre zéro

α : rapport, α/ω , entre le rayon d'ouverture, a , de l'émetteur et le rayon de contour, ω , du faisceau d'alimentation gaussien au point $1/e^2$

u : variable d'intégration

X : $\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a \cdot \sin(\theta)$

θ : angle par rapport à l'axe optique (rad).

Sur l'axe, $X = 0$ et l'efficacité de gain donné par l'équation (9) devient:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (11)$$

Le gain maximal du faisceau principal sur l'axe l'équation (7) vaut alors:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \text{ dBi} \quad (12)$$

Toute occultation, b , aura pour effet de réduire le gain du faisceau principal, de combler les valeurs nulles et d'accroître les lobes latéraux.

2.6.3 Diagramme de gain à la réception

Le champ de visibilité dépend de la dimension du détecteur et de la distance focale du télescope. Il peut être calculé comme suit:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (13)$$

où:

φ : champ de visibilité (rad)

d : diamètre du détecteur (généralement compris entre 10^{-4} et 10^{-3}) (m)

F : distance focale du télescope (m).

On adapte généralement le diagramme d'une antenne de réception aux caractéristiques du détecteur. Celui-ci est protégé des brouillages grâce à l'utilisation d'écrans et n'est exposé qu'aux émissions à moins de φ rad de l'axe du faisceau principal. Par conséquent, l'énergie brouilleuse atteignant les

lobes latéraux de l'antenne de réception ne parvient pas au détecteur et peut être négligée lors de l'analyse des brouillages.

Si l'on suppose que l'antenne de réception se trouve dans le champ lointain de l'antenne d'émission, on peut considérer que l'énergie reçue correspond à celle d'une onde plane. Le système de réception et le système d'émission peuvent utiliser la même antenne ou des antennes différentes. Comme pour l'émission, la largeur du faisceau de l'antenne de réception est généralement mesurée grâce à la donnée du point $1/e^2$.

Le gain maximal dans l'axe de l'antenne de réception, G_R , est donné par:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (14)$$

où:

A : aire de l'ouverture de réception (m^2)

λ : longueur d'onde du signal incident (m)

et

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (15)$$

où:

a : rayon du miroir primaire (m)

b : rayon du miroir secondaire (m).

Le gain obtenu par l'équation (14) correspond à la quantité d'énergie incidente sur le détecteur. Le calcul de G_R suppose que l'antenne de réception se trouve dans le champ lointain de l'émetteur et que l'on considère une ouverture et un détecteur circulaires. Le premier terme de cette équation (14) correspond au gain classique d'une antenne idéale d'aire A sans occultation. Le second terme correspond aux affaiblissements dus à l'occultation introduite par le miroir secondaire d'un système Cassegrain. En l'absence de miroir secondaire, b s'annule dans l'équation (15), ce qui annule le second terme de l'équation (14).

Le troisième terme, δ , de l'équation (14), représente les affaiblissements (dB) dus au débordement de l'énergie du signal au-delà des limites du détecteur. Dans le cas d'un système à détection directe tel que le système MIP, δ diminue lorsque le rapport entre la dimension du détecteur et la distance focale du télescope s'accroît. Il est le plus souvent inférieur ou égal à $-0,5$ dB.

2.7 Pointage et poursuite

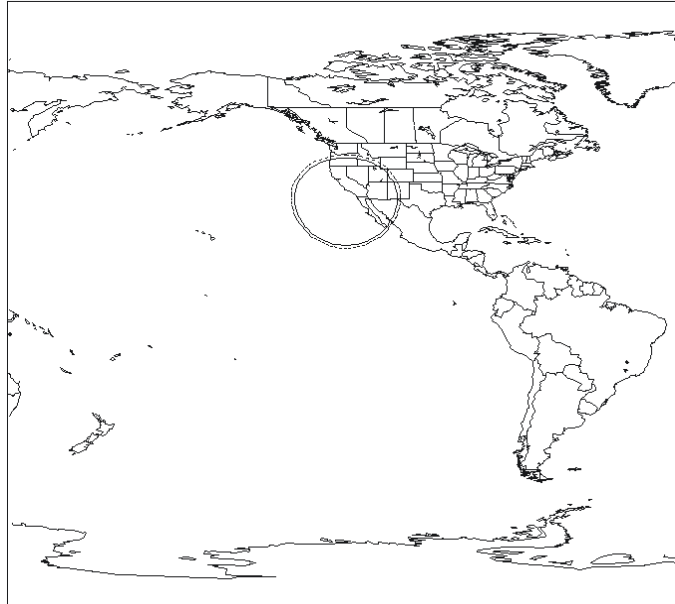
L'étroitesse de la largeur de faisceau et la longueur d'une liaison en espace lointain ou interplanétaire exploitée au voisinage de 283 THz conduisent à imposer au système considéré des spécifications strictes de pointage et de poursuite. Une précision de pointage égale à environ $1/10^{\text{ème}}$ de la largeur de faisceau est généralement requise. Pour le système de référence décrit dans le Tableau 1, cela correspond à un angle de 0,35 microradian (μrad) et à un affaiblissement de pointage inférieur à 2 dB.

Les empreintes au sol du contour à $1/e^2$ pour des liaisons de 2 et 6 UA sont respectivement représentées sur les Fig. 2 et 3. Dans ces Figures, on suppose que l'engin spatial émet dans le plan équatorial de la Terre et pointe en direction de l'installation expérimentale pour liaisons optiques descendantes de la NASA, située à Wrightwood en Californie (Etats-Unis d'Amérique). Le cercle

continu intérieur sur chaque Figure correspond à l'empreinte au sol dans l'hypothèse d'un pointage parfait. Le cercle extérieur en pointillés se rapporte à une erreur de pointage aléatoire de $0,35 \mu\text{rad}$. Les distances de 2 et 6 UA correspondent respectivement aux distances types entre la Terre et Mars et entre la Terre et Jupiter.

FIGURE 2

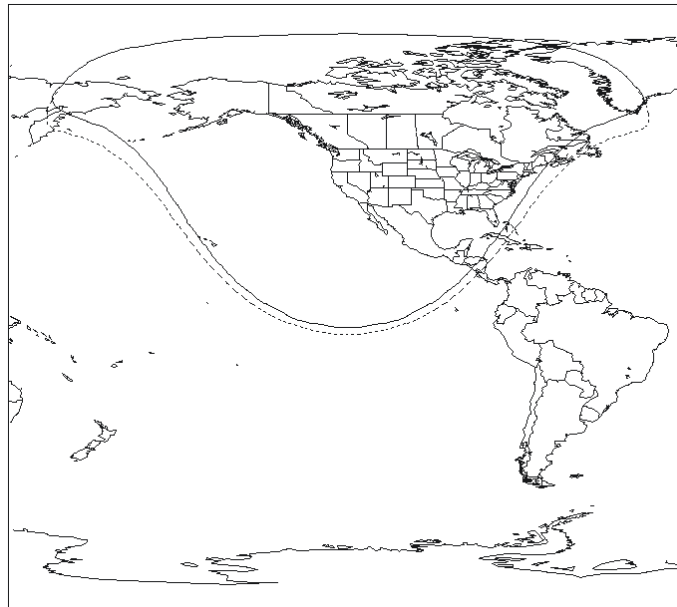
Empreinte au sol d'un faisceau de $8 \mu\text{rad}$ pour une liaison de 2 UA



1742-02

FIGURE 3

Empreinte au sol d'un faisceau de $8 \mu\text{rad}$ pour une liaison de 6 UA



1742-03

3 Rapport signal sur bruit (SNR)

La qualité de fonctionnement d'une liaison de télécommunication interplanétaire en espace lointain exploitée au voisinage de 283 THz dépend directement de l'obtention d'un rapport signal sur bruit (SNR) élevé au niveau du récepteur. Plus le rapport SNR est élevé, plus le TEB est faible. En règle générale:

$$SNR = \frac{P_s}{N_t} \quad (16)$$

où:

P_s : puissance du signal reçu telle que la donne l'équation (4)

N_t : puissance de bruit générée par l'ensemble des sources.

Le bruit provient de deux sources indépendantes, d'où la distinction entre bruit du détecteur et bruit de fond. Ce dernier, analysé au § 3.1, résulte de l'énergie externe provenant du ciel et atteignant le détecteur. Le bruit du détecteur, analysé au § 3.2, désigne le bruit inhérent au détecteur.

Les équations de base décrivant la qualité de fonctionnement d'une liaison optique laser croisée ou d'une liaison à travers l'atmosphère peuvent être simplifiées en appliquant les hypothèses de base suivantes:

- les antennes optiques d'émission et de réception ne sont pas occultées en leur centre;
- les formes d'onde transmises sont gaussiennes et tronquées au point $1/e^2$;
- les ondes reçues sont planes;
- les disques de diffraction d'Airy sont tronqués au premier zéro du diagramme.

3.1 Bruit de fond

En exploitation diurne ou lorsqu'un objet illuminé apparaît dans le champ de visibilité du détecteur, le bruit de fond devient la principale source de bruit. La puissance P_{back} de ce signal capté par le détecteur peut provenir de l'énergie diffusée par le ciel, les planètes ou les étoiles. Le bruit du ciel est plus grand pendant les heures du jour et dépend des conditions météorologiques locales, mais est cependant toujours présent à un certain niveau. Le bruit dû aux planètes ou aux étoiles est à considérer lorsque ces astres sont dans le champ de visibilité du récepteur. On peut additionner les bruits dus à chacune des sources pour calculer le bruit de fond d'espace total.

Il convient d'utiliser la procédure décrite ci-après pour calculer la valeur du bruit de fond au niveau du détecteur de la station terrienne. Les paramètres suivants sont requis:

D : diamètre d'ouverture du récepteur (m)

γ : taux d'occultation du télescope de la station terrienne

φ : champ de visibilité du détecteur (rad)

B : largeur de bande du récepteur (μm)

Etape 1: Calculer la surface du récepteur, A_{rec} , comme suit:

$$A_{rec} = (1 - \gamma^2) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad \text{m}^2 \quad (17)$$

Etape 2: Calculer l'angle solide associé au champ de visibilité du détecteur, φ' , comme suit:

$$\varphi' = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad \text{Sr} \quad (18a)$$

pour les petits angles, on pourra utiliser l'approximation suivante:

$$\phi'_{det} = \frac{\pi\phi^2}{4} \quad \text{Sr} \quad (18b)$$

Etape 3: Déterminer la valeur de l'éclairement du ciel, H_{sky} , à 283 THz. Si on ne dispose d'aucune mesure, extraire du Tableau 3 la valeur appropriée.

TABLEAU 3
Valeurs de l'éclairement du ciel H_{sky} ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{Sr}$) à la fréquence 283 THz en conditions de luminosité arbitraires

Source	Eclairement
Forte luminosité, en journée	54,45
Luminosité normale, en journée	25,32
Conditions nuageuses, en journée	17,99
Nuit	$1,000 \times 10^{-5}$

Etape 4: Calculer la puissance de bruit du ciel au niveau du détecteur, P_{sky} , comme suit:

$$P_{sky} = H_{sky} \cdot A_{rec} \cdot \phi' \cdot B \quad \text{W} \quad (19)$$

Etape 5: Déterminer, le cas échéant, la valeur à 283 THz de l'éclairement énergétique, N_{star} , dû à une étoile apparaissant dans le champ de visibilité de la station terrienne. Si l'on ne dispose d'aucune mesure, extraire du Tableau 4 la valeur appropriée. Si aucune étoile n'apparaît dans le champ de visibilité, poser $P_{star} = 0$ et passer à l'Etape 7.

TABLEAU 4
Eclairement énergétique N_{star} ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$) à la fréquence 283 THz pour les étoiles considérées

Source	Eclairement énergétique	Source	Eclairement énergétique
Achemar	$1,94462 \times 10^{-9}$	Capella	$1,67642 \times 10^{-8}$
Aldebaran	$2,87647 \times 10^{-8}$	Pollux	$1,61359 \times 10^{-8}$
Altair	$2,68864 \times 10^{-9}$	Procyon	$1,22510 \times 10^{-8}$
Arcturus	$3,22719 \times 10^{-8}$	Rigel	$4,76926 \times 10^{-9}$
Betelgeuse	$3,99278 \times 10^{-8}$	Rigil Kent	$1,67642 \times 10^{-8}$
Canopus	$2,09429 \times 10^{-8}$	Sirius	$2,09013 \times 10^{-8}$

Etape 6: Calculer la puissance de bruit due à l'étoile au niveau du détecteur, P_{star} , comme suit:

$$P_{star} = N_{star} \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \quad (20)$$

Etape 7: Déterminer à partir des valeurs du Tableau 5 le diamètre, D_{planet} , l'albédo de Bond χ_{planet} et la densité spectrale de puissance ψ_{planet} de la planète dans le champ de visibilité du récepteur. Si aucune planète n'apparaît dans ce champ, poser $P_{planet} = 0$ et passer à l'Etape 10.

TABLEAU 5

Diamètres, albédo et densité spectrale des planètes

Planète	Diamètre (m)	Albédo de la planète	Densité spectrale incidente sur la planète (W/μm)
Mercure	4 866 070	0,119	$8,336 \times 10^{16}$
Vénus	12 108 756	0,75	$1,469 \times 10^{17}$
Mars	6 778 400	0,25	$1,043 \times 10^{16}$
Jupiter	142 989 171	0,343	$3,950 \times 10^{17}$
Saturne	120 582 610	0,342	$8,228 \times 10^{16}$
Uranus	51 204 220	0,3	$3,891 \times 10^{15}$
Neptune	49 508 383	0,29	$1,373 \times 10^{15}$
Pluton	2 308 404	0,145	$1,803 \times 10^{12}$

Etape 8: Calculer l'angle sous-tendu par la planète vue depuis le récepteur, θ_{planet} , comme suit:

$$\theta_{planet} = \frac{D_{planet}}{R_{planet}} \quad \text{rad} \quad (21)$$

où:

R_{planet} : distance entre la Terre et la planète (m).

Etape 9: Si $\theta_{planet} < \phi$, calculer comme suit la puissance de bruit due à la planète au niveau du détecteur, P_{planet} :

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \quad (22a)$$

sinon,

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \cdot \left(\frac{\phi'}{\theta'_{planet}} \right) \quad \text{W} \quad (22b)$$

où θ'_{planet} est l'angle solide de la planète vue depuis le détecteur, que l'on calcule comme suit:

$$\theta'_{planet} = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\theta_{planet}}{2} \right) \right) \approx \frac{\pi \theta_{planet}^2}{4} \quad \text{Sr} \quad (23)$$

Etape 10: Calculer la puissance totale du bruit de fond parvenant au détecteur, P_{back} , comme suit:

$$P_{back} = P_{sky} + P_{star} + P_{planet} \quad \text{W} \quad (24)$$

3.2 Bruit du détecteur

La plupart des applications prévues pour les radiocommunications interplanétaires en espace lointain utiliseront un récepteur à détection directe muni d'une photodiode à avalanche (PDA). Les détecteurs PDA fonctionneront normalement dans l'une des deux régions de détection limitées par le bruit. Le fonctionnement des détecteurs illuminés par des niveaux élevés de puissance incidente sera généralement entravé par le bruit de grenaille photonique. Toutefois, les détecteurs captant de faibles niveaux de puissance incidente, tels que ceux utilisés pour les liaisons interplanétaires en espace lointain, verront leur fonctionnement entravé par le bruit de détection. On trouvera ci-après le calcul du rapport SNR pour le système à détection directe classique formé d'un détecteur PDA suivi d'un amplificateur.

Calculer le facteur de bruit en excès, N_E , comme suit:

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1 - k) \quad (25)$$

où:

- G : gain
- k : taux d'ionisation (électrons/trous).

Le rapport SNR peut alors être calculé comme suit:

$$SNR = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)} \quad (26)$$

où:

- e : charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ coulomb)
- P_S : puissance moyenne du signal reçu (W)
- R_D : sensibilité de la PDA
- k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : température (K)
- i_S : courant d'obscurité de surface du détecteur (A)
- i_B : courant d'obscurité global du détecteur (A)
- R_L : résistance de l'amplificateur à transimpédance (Ω)
- N_A : facteur de bruit de l'amplificateur
- B_F : largeur de bande du récepteur (Hz).

4 Liste des variables

- a : rayon du miroir du télescope (m)
- A : aire de l'ouverture du télescope (m^2)
- A_{rec} : aire de l'ouverture du télescope de réception (m^2)
- α : rapport, α/ω
- b : rayon du miroir secondaire (m)
- B : largeur de bande du filtre (μm)
- B_F : largeur de bande du filtre (Hz)

c :	vitesse de la lumière (m/s)
χ_{planet} :	albédo de Bond d'une planète
d :	diamètre du détecteur (m)
D :	diamètre de l'ouverture (m)
D_{planet} :	diamètre de la planète (m)
δ :	affaiblissements dus au débordement d'énergie au-delà des limites du détecteur (dB)
e :	charge d'un électron (coulomb)
E_{pulse} :	énergie par impulsion (J)
f :	fréquence optique (Hz)
F :	distance focale du télescope (m)
φ :	champ de visibilité du détecteur (rad)
φ' :	angle solide associé au champ de visibilité du détecteur (srad)
G_0 :	gain d'antenne maximal sur l'axe (dBi)
G_r :	gain de l'antenne de réception (dBi)
g_i :	efficacité de gain
G_i :	gain de l'antenne d'émission (dBi)
γ :	taux d'occultation
H_{sky} :	éclairage du ciel ($W/m^2/\mu m/Sr$)
i_b :	courant d'obscurité global dans le détecteur (A)
i_s :	courant d'obscurité de surface dans le détecteur (A)
k :	taux d'ionisation (électrons/trous)
k_B :	constante de Boltzmann
L_t :	affaiblissements dans l'émetteur
L_r :	affaiblissements dans le récepteur
L_p :	affaiblissements dus au dépointage
L_a :	affaiblissements dans l'atmosphère le long de la liaison espace vers sol
L_s :	affaiblissement en espace libre
λ :	longueur d'onde (m)
M :	indice de modulation
N_A :	facteur de bruit de l'amplificateur
N_E :	facteur de bruit en excès
N_{star} :	éclairage énergétique d'une étoile ($W/m^2/\mu m$)
N_t :	puissance de bruit générée par l'ensemble des sources
P_{ave} :	puissance moyenne d'émission (W)
P_{back} :	puissance de bruit de fond totale reçue (W)
P_{peak} :	puissance crête (W)
P_{planet} :	puissance reçue due à une planète illuminée (W)
P_s :	puissance du signal reçue (W)
P_{sky} :	puissance reçue due au bruit du ciel (W)
P_{star} :	puissance reçue due à une étoile (W)

- P_t : puissance moyenne de sortie du laser (W)
 θ : angle par rapport à l'axe optique (rad)
 θ_{planet} : angle sous-tendu par une planète (rad)
 θ_{1/e^2} : largeur angulaire du faisceau au point $1/e^2$ (rad)
 θ'_{planet} : angle solide sous-tendu par une planète (rad)
 R : distance entre l'émetteur et le récepteur (m)
 R_D : sensibilité de la PDA
 R_L : résistance de l'amplificateur à transimpédance
 R_{planet} : distance entre la planète et le récepteur (m)
 t_d : durée d'un temps mort de l'émetteur (s)
 t_p : durée d'une impulsion de l'émetteur (s)
 t_s : durée d'un intervalle temporel de l'émetteur (s)
 t_w : durée d'un mot de l'émetteur (s)
 T : température (K)
 ω : rayon de contour du faisceau au point $1/e^2$
 Ψ_{planet} : densité spectrale de puissance d'une lune ou d'une planète (W/ μ m).

Annexe 2

1 Diagramme d'antenne d'une ouverture d'émission circulaire sans occultation

L'enveloppe du diagramme de gain d'antenne d'une ouverture d'émission circulaire sans occultation exploitée au voisinage de 283 THz est donnée approximativement par:

$$\begin{aligned}
 G_t(\varphi) &= G_{max} - 0,9 - (4,5 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} & \text{dBi} & \text{ pour } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m \\
 G_t(\varphi) &= G_1 & \text{dBi} & \text{ pour } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r \\
 G_t(\varphi) &= G_{max} + 35 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) & \text{dBi} & \text{ pour } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1 \\
 G_t(\varphi) &= -10 & \text{dBi} & \text{ pour } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

où:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \text{ gain du faisceau principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} - 25,8: \text{ gain du premier lobe latéral (dBi)}$$

$$D: \text{ diamètre de l'ouverture (m)}$$

λ : longueur d'onde (m)

φ : angle par rapport à l'axe (degrés)

$\varphi_r = 5,83 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$: angle du premier lobe latéral (degrés)

$\varphi_m = 0,75\varphi_r$: angle pour lequel le gain dans le lobe principal est égal au gain du premier lobe latéral (degrés)

φ_1 : champ de visibilité limité par des écrans optiques (degrés)

2 Diagramme d'antenne d'une ouverture d'émission circulaire avec occultation

L'enveloppe du diagramme de gain d'antenne d'une ouverture d'émission circulaire avec occultation exploitée au voisinage de 283 THz est donnée approximativement par:

$$G_t(\varphi) = G_{max} - 0,9 + 32 \log(1 - \gamma^2) - \left(4 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{2000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi pour } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi pour } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 40 + 15\gamma - 30 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi pour } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi pour } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

où:

$$G_{max} = 20 \log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right): \text{ gain du faisceau principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} + 2,17 + 15\gamma - 30 \log(5,77 - 2,9\gamma^2): \text{ gain du premier lobe latéral (dBi)}$$

D : diamètre de l'ouverture (m)

λ : longueur d'onde (m)

φ : angle par rapport à l'axe (degrés)

$$\varphi_r = (5,77 - 2,9\gamma^2) \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \text{ angle du premier lobe latéral (degrés)}$$

$\varphi_m = (0,71 - 0,5\gamma) \cdot \varphi_r$: angle pour lequel le gain dans le lobe principal est égal au gain du premier lobe latéral (degrés)

φ_1 : champ de visibilité limité par des écrans optiques

$$\gamma = \frac{b}{a}: \text{ taux d'occultation}$$

a : rayon de l'ouverture principale (m)

b : rayon de l'ouverture secondaire (m).

3 Diagramme d'antenne d'une ouverture de réception circulaire sans occultation

L'enveloppe du diagramme de gain d'antenne d'une ouverture de réception circulaire sans occultation exploitée au voisinage de 283 THz est donnée approximativement par:

$$G_t(\varphi) = G_{max} - (6 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi pour } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi pour } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 42 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi pour } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi pour } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

où:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \text{ gain du faisceau principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} - 17,5: \text{ gain du premier lobe latéral (dBi)}$$

D : diamètre de l'ouverture (m)

λ : longueur d'onde (m)

φ : angle par rapport à l'axe (degrés)

$$\varphi_r = 5,14 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \text{ angle du premier lobe latéral (degrés)}$$

$\varphi_m = 0,65\varphi_r$: angle pour lequel le gain dans le lobe principal est égal au gain du premier lobe latéral (degrés)

φ_1 : champ de visibilité limité par des écrans optiques (degrés).

4 Diagramme d'antenne d'une ouverture d'émission circulaire avec occultation

L'enveloppe du diagramme de gain d'antenne d'une ouverture de réception circulaire avec occultation exploitée au voisinage de 283 THz est donnée approximativement par:

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 20 \log(1 - \gamma^2) - \left(6 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{3000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi pour } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi pour } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 44 + 8\gamma - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi pour } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi pour } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

où:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \text{ gain du faisceau principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} - 15,15 + 8\gamma: \text{ gain du premier lobe latéral (dBi)}$$

D : diamètre de l'ouverture (m)

λ : longueur d'onde (m)

φ : angle par rapport à l'axe (degrés)

$\varphi_r = 5,14 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$: angle du premier lobe latéral (degrés)

$\varphi_m = (0,62 - 0,3\gamma) \cdot \varphi_r$: angle pour lequel le gain dans le faisceau principal est égal au gain du premier lobe latéral (degrés)

φ_1 : champ de visibilité limité par des écrans optiques

$\gamma = \frac{b}{a}$: taux d'occultation

a : rayon de l'ouverture principale (m)

b : rayon de l'ouverture secondaire (m)
