

RECOMMANDATION UIT-R S.1590

**Caractéristiques techniques et opérationnelles des satellites
fonctionnant dans la gamme de 20-375 THz**

(Question UIT-R 264/4)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT-R,

considérant

- a) que les liaisons de télécommunication sont utilisées et qu'il est prévu de les utiliser dans certains systèmes à satellites pour les communications inter-satellites à des fréquences comprises entre 20 et 375 THz;
- b) que la viabilité des systèmes de télécommunication du service fixe par satellite fonctionnant dans la gamme 20-375 THz et utilisant des liaisons Terre vers espace et espace vers Terre est actuellement à l'étude;
- c) que les astronomes font des observations dans cette partie du spectre;
- d) que cette partie du spectre est également utilisée pour d'autres services scientifiques;
- e) que cette partie du spectre est également utilisée à des fins scientifiques et industrielles autres que celles liées aux communications;
- f) que les mécanismes de brouillage entre satellites et systèmes passifs, tels que les systèmes utilisés en astronomie, fonctionnant au-dessus de 20 THz peuvent être différents de ceux survenant dans la gamme des fréquences radioélectriques,

reconnaissant

- a) que le numéro 78 de l'Article 12 de la Constitution de l'UIT dispose que les fonctions du Secteur des radiocommunications consistent entre autres à «... procéder à des études sans limitation quant à la gamme de fréquences et adopter des Recommandations ...»;
- b) que, lorsqu'ils 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;
- c) que, fin 2001, 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 les études de partage pour les satellites fonctionnant dans la gamme de fréquences 20-375 THz tiennent compte des paramètres techniques et opérationnels figurant dans l'Annexe 1.

ANNEXE 1

1 Introduction

Le terme «ondes radioélectriques» est défini dans le Règlement des radiocommunications de la manière suivante: «ondes électromagnétiques dont la fréquence est par convention inférieure à 3 000 GHz, se propageant dans l'espace sans guide artificiel». La demande accrue de spectre et les progrès technologiques accomplis conduisent à porter une plus grande attention à l'utilisation des fréquences au-dessus de 3 000 GHz pour les télécommunications en espace libre. Les nombreuses améliorations techniques récemment apportées à des dispositifs optiques de communication tels que les fibres optiques, les lasers à état solide (GaAs, InP)¹, les modulateurs (modulateurs électro-optiques) ou les détecteurs (photodiodes), ont permis de réaliser des liaisons de télécommunication dans les bandes de fréquences au-dessus de 3 000 GHz. Les télécommunications en espace libre à des fréquences au-dessus de 3 000 GHz permettent d'acheminer des données à des débits de quelques dizaines de Gbit/s, et de satisfaire aux spécifications de gain et de directivité applicable aux faisceaux utilisés pour les applications en espace lointain.

Les travaux relatifs aux applications de télécommunication portent essentiellement sur les fréquences de la bande 20-375 THz (15-0,8 μm). Si la faisabilité de certaines de ces liaisons est avérée, la technologie nécessaire en est encore, pour l'essentiel, au stade des développements, mais connaît des progrès rapides. Ces liaisons peuvent transmettre des signaux de télécommunication sur les trajets Terre vers espace, espace vers Terre, espace-espace, ainsi que sur des trajets de Terre. Elles font intervenir des satellites en orbite géostationnaire (OSG) ou des satellites en orbite non géostationnaire (non OSG), tels que les satellites en orbite terrestre basse.

Il est nécessaire pour les futures études de partage de disposer des caractéristiques techniques et opérationnelles associées aux liaisons de télécommunication en espace libre exploitées dans la région spectrale susmentionnée. Les spécifications et les modes d'exploitation de certains systèmes fonctionnant à ces fréquences sont décrits dans les paragraphes suivants. La présente Recommandation vise à identifier certains paramètres système nécessaires à l'analyse des brouillages subis par des applications spatiales.

2 Considérations liées aux fréquences

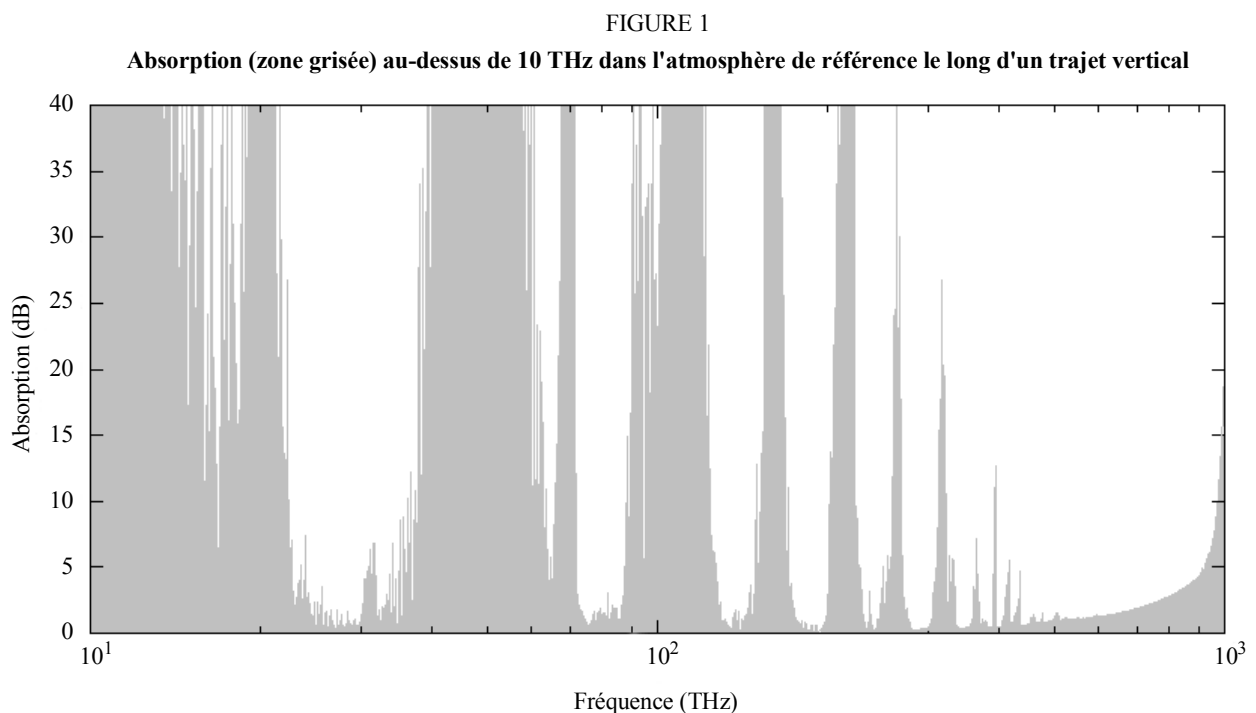
Toutes les fréquences utilisées pour les applications de télécommunication en espace libre ne sont pas équivalentes, car la transparence de l'atmosphère est très dépendante de la longueur d'onde utilisée. S'il convient, pour les liaisons Terre vers espace et espace vers Terre, de choisir une région spectrale à faible absorption, il est préférable d'utiliser des fréquences correspondant à de fortes absorptions pour les liaisons espace-espace, afin de protéger ces dernières de brouillages causés par la Terre et de réduire le risque de brouiller les observations astronomiques.

Les lasers en infrarouge proche (0,850 μm) présentent un meilleur rapport signal/bruit que les détecteurs en infrarouge moyen (15 μm environ), qui nécessitent un refroidissement important pour diminuer le bruit thermique.

¹ Les lasers utilisés en télécommunication sont fabriqués à partir de semi-conducteurs III-V. Il s'agit d'alliages d'arséniure de gallium (GaAs) ou de phosphure d'indium (InP), ce qui correspond à des longueurs d'onde d'émission respectivement de 0,85 μm ou 1,5 μm .

La Fig. 1 représente la variation de l'absorption atmosphérique en fonction de la fréquence pour un signal optique le long d'un trajet vertical (rectiligne de l'atmosphère de référence et commençant au niveau de la mer). En dessous d'environ 15 THz (20 μm), le ciel est réellement opaque. Lorsque l'on se rapproche de la bande du visible (400-750 THz, soit 0,75-0,40 μm), de nombreuses bandes, de largeur et de transparence diverses, apparaissent du fait de la présence de certaines composantes gazeuses de l'atmosphère. Ces gaz ne sont pas nécessairement répartis de manière uniforme et leurs proportions peuvent varier avec l'altitude. L'intensité de ces raies d'absorption dépend aussi généralement de la pression et de la température. A environ 300 THz (1 μm), l'absorption commence à croître, principalement à cause des gaz O_2 et O_3 . Elle continue à augmenter dans la bande du visible jusqu'à environ 1 000 THz (0,3 μm), fréquence à laquelle l'atmosphère redevient opaque, du fait de l'absorption moléculaire.

A l'heure actuelle, les liaisons de télécommunication les plus étudiées correspondent aux fréquences autour de 200 THz (1,5 μm), 283 THz (1,06 μm), 311 THz (0,965 μm) et 353 THz (0,850 μm). Il s'agit également des fréquences les plus utilisées pour les communications par fibres optiques.



Le Tableau 1 contient des caractéristiques de lasers types utilisés pour les communications optiques de Terre.

TABLEAU 1
 Caractéristiques types de lasers à état solide dans la gamme
 allant de 0,75 μm à 1,6 μm

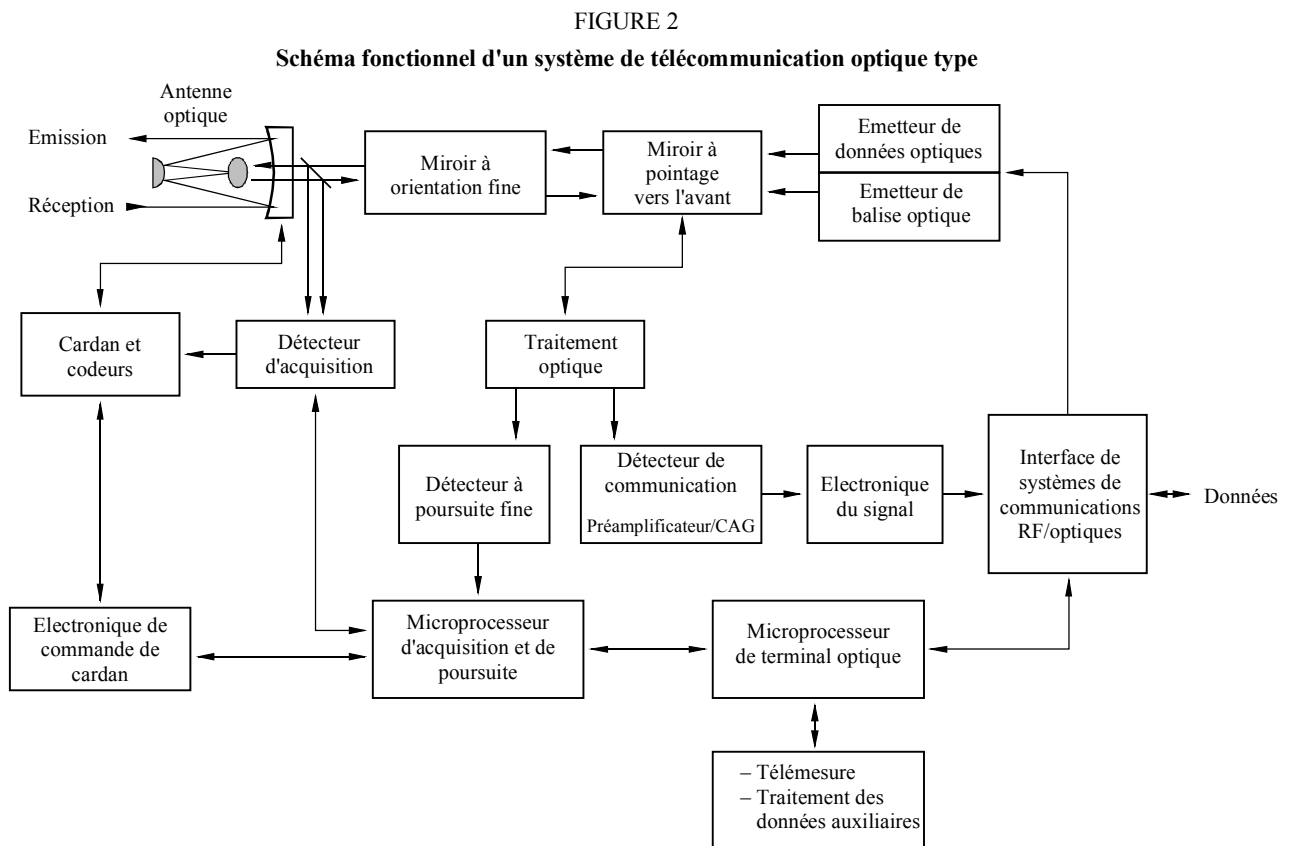
Type de laser	Longueur d'onde de transition	Puissance de sortie maximale type (W)	A ondes entretenues ou ondes pulsées	Monomode (mo) ou multimode (mul)	Largeur de raie de transition
A semi-conducteurs $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Al}_{1-y}\text{P}_y^{(1)}$	1,1 μm à 1,6 μm	1	Onde entretenue	Mo/mul	De quelque GHz à 10 THz
A verre $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}^{(2)}$	1,064 μm	10	Onde entretenue	Mo/mul	120 GHz
A semi-conducteurs $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$	0,965 μm	1	Onde entretenue	Mo/mul	De quelque GHz à 10 THz
A semi-conducteurs $\text{Al}_x\text{Ga}_x\text{As}$	0,75 a 0,87 μm	10	Onde entretenue	Mo/mul	De quelque GHz à 10 THz

(1) $0 < y < 1$ et $0 < x < 1$

(2) YAG: yttrium aluminium grenat.

3 Schéma fonctionnel type

La Fig. 2 correspond au schéma fonctionnel type d'un système de télécommunication optique.



CAG: contrôle automatique de gain

Il convient de noter qu'une liaison de retour est associée à pratiquement chaque liaison optique, ce qui autorise une contre-réaction propre à corriger, le cas échéant, le pointage optique. Chaque paire de liaisons ainsi constituée forme donc une boucle de contrôle permettant de conserver l'alignement optique.

Il est souhaitable de faire l'inventaire des paramètres dont dispose le concepteur de terminal optique. Les terminaux optiques de satellites sont bien évidemment différents suivant l'utilisation ou le type d'application qui s'y rapporte. On décrit dans le présent paragraphe les éléments de base d'un terminal optique, ainsi que les caractéristiques de conception détaillées propres à certaines applications.

3.1 Emetteur

L'émetteur de données (un laser) est représenté dans le coin supérieur droit de la Fig. 2. La puissance type d'un laser homologué pour des applications spatiales est d'environ 1 W. Des considérations liées à la durée de fonctionnement ou à la fiabilité s'opposent pour l'instant à l'utilisation de puissance plus élevée, mais la technologie est en évolution constante. Pour obtenir des débits de données de plusieurs dizaines de Gbit/s, il faudra se limiter à la classe lasers accordables, en particulier les lasers à multiplexage par répartition en longueur d'onde. Les lasers des systèmes de télécommunication hétérodynes ou homodynes doivent présenter des largeurs de raie étroites et un bruit de phase minimal. Ils doivent en outre être stables en fréquence et finement accordables pour s'affranchir de l'effet Doppler optique. Dans le cas d'une liaison OSG-non OSG (c'est-à-dire entre un satellite OSG et un satellite non OSG), les effets Doppler à traiter peuvent approcher ± 10 GHz.

3.2 Récepteur

Le récepteur correspond au bloc du milieu de la Fig. 2 intitulé: «Détecteur de communication: Préamplificateur/CAG». La plupart des récepteurs actuels fonctionnent à partir d'une photodiode à avalanche (PDA) ou d'une diode *Pin*. Du fait de son gain interne, on utilise préférentiellement la photodiode à avalanche, lorsque la puissance optique incidente du détecteur est faible (cas par exemple du récepteur à détection directe). On peut alors obtenir une sensibilité de détection de l'ordre de 100 photons reçus par bit. Cette photodiode peut accepter des débits allant jusqu'à 40 Gbit/s. Bien que sa largeur de bande ne puisse plus être augmentée, sa sensibilité continue d'être affinée grâce aux améliorations apportées aux amplificateurs à fibre optique. Une diode *Pin* est plus simple à utiliser et à concevoir, mais son gain est plus petit. Elle est surtout utilisée dans les systèmes de détection hétérodyne ou homodyne.

3.3 Détection

Les systèmes optiques font pour l'essentiel appel aux mêmes techniques de détection que les systèmes radiofréquence: la détection directe, la détection hétérodyne ou la détection homodyne. Jusqu'à présent la plupart des systèmes ont mis en oeuvre la technique de détection directe, qui consiste à convertir l'énergie des photons (intensité optique) en un courant électrique de porteurs de charge. Ce signal est immédiatement démodulé à l'arrière du récepteur et transformé en un signal de la bande de base. Le récepteur hétérodyne détecte à la fois l'amplitude et la phase du signal, en combinant d'abord le signal optique reçu avec le signal de sortie d'un oscillateur local de forte puissance, avant d'analyser le signal optique résultant. La détection homodyne est un cas particulier de détection hétérodyne pour lequel le signal entrant et celui de l'oscillateur local ont même fréquence et même phase.

3.4 Acquisition

L'acquisition est un processus complexe contrôlé par le bloc «Microprocesseur d'acquisition et de poursuite» ainsi que par les blocs associés en fonction du cardan à gauche de la Fig. 2. Pour l'établissement d'une liaison optique, on passe par une phase d'acquisition permettant d'aligner les composantes optiques et de parvenir à un verrouillage sur une des porteuses. On utilise généralement au cours de cette étape une balise pour émettre un signal, ainsi qu'une barrette d'éléments photosensibles à transfert de charges pour détecter tout éventuel défaut d'alignement. Cette technologie est très au point. Les éléments photosensibles à transfert de charges resteront certainement la principale technique utilisée pour ce volet des communications optiques.

3.5 Emetteur de signal balise

Il est représenté à côté de l'émetteur de données dans le coin supérieur droit de la Fig. 2. Durant la phase acquisition, chaque terminal émet un signal balise (dont le faisceau est beaucoup plus large que le faisceau d'émission des données de communication) afin de vérifier l'alignement initial des détecteurs optiques. La technologie des balises laser est bien maîtrisée, ce qui permet un choix entre plusieurs types de conception associée au terminal.

3.6 Poursuite/asservissement

Il s'agit, comme on l'indique sur la Fig. 2, des opérations de pointage de précision effectuées par le «Miroir à orientation fine» et «Miroir à pointage vers l'avant». Ces opérations sont effectuées conjointement car les fonctions remplies par ces deux dispositifs se recoupent totalement. Il est extrêmement difficile de satisfaire aux spécifications de pointage et de poursuite en matière de liaison croisée optique lorsque l'engin spatial se déplace et connaît des phénomènes de gigue. Le prix à payer en cas de non-respect de ces spécifications est l'apparition d'erreurs par salve, ce qui peut conduire à des pertes de données très importantes.

3.7 Electronique du système

Bien que l'électronique soit certainement la technologie la plus mûre intervenant dans les télécommunications optiques, le concepteur du terminal ne doit pas oublier que les liaisons acheminant des données numériques de quelques dizaines de Gbit/s nécessitent des largeurs d'intervalle d'environ 10 ps, ainsi que des temps de montée et de descente inférieurs ou égal à 2 ps. Ces impératifs constituent un défi technologique.

4 Liaisons par satellites

On trouvera dans le présent paragraphe les paramètres de liaison optique intervenant dans plusieurs applications types ainsi que les valeurs habituellement utilisées. Ces liaisons peuvent tout à la fois causer ou subir des brouillages. Les caractéristiques techniques des émetteurs et des récepteurs utilisés pour les liaisons Terre vers espace et inter-satellites aux fréquences au-dessus de 20 THz varient en fonction des spécifications liées aux données et des paramètres orbitaux.

4.1 Liaisons inter-satellites

Les liaisons croisées OSG/OSG sont relativement stables lorsque la vitesse de déplacement relative des deux satellites est faible en termes de distance et d'angle azimutal. Les satellites sont en effet pratiquement immobiles au-dessus d'une certaine zone de la Terre, et leur angle de pointage pour

les liaisons de communication varie faiblement en azimut et en élévation. Les spécifications d'acquisition et de pointage sont identiques à celles associées aux liaisons OSG/non OSG, car l'incertitude de pointage avant acquisition dépend surtout des variables roulis, tangage et lacet.

La classe des terminaux optiques OSG/non OSG est traitée dans le présent paragraphe car elle possède de nombreux points communs avec la classe des terminaux OSG/OSG. Les antennes optiques associées à ces deux classes de terminaux sont de taille similaire (ce paramètre intervenant pour l'essentiel dans le poids du terminal), et permettent d'établir des distances de liaison de même ordre ($\geq 40\ 000$ km). La principale différence entre les liaisons OSG/OSG et OSG/non OSG a trait aux exigences de qualité de fonctionnement associées à la vitesse angulaire du cardan d'antenne. Dans le cas des liaisons OSG/non OSG, le cardan évolue non seulement sur une plage angulaire plus grande, mais aussi avec une vitesse et une accélération plus importantes. Les paramètres associés à des systèmes OSG/OSG et OSG/non OSG types sont indiqués dans le Tableau 2. Le système OSG/non OSG considéré est fondé sur la liaison entre les satellites SPOT4 et ARTEMIS.

TABLEAU 2

Liaisons croisées OSG/OSG et OSG/non OSG

Paramètres		OSG/OSG	OSG/non OSG
Distance (km)		40 000-80 000	
Fréquence (THz)		200, 283, 311, 353	
Longueur d'onde (μm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}	
Terminal N° 1	Puissance (mW)	500-1 500	
	Diamètre (cm)	20-30	
	Plage de variation angulaire du cardan ⁽¹⁾ (degrés)	± 2 en azimut; 0 à -60 en élévation	± 20 en azimut; ± 20 en élévation
	Vitesse angulaire ⁽²⁾ ($\mu\text{rad/s}$)	Sans objet	200 en azimut; 200 en élévation
	Champ de balayage ⁽³⁾ (mrad)	8,0 \times 8,0	
	Divergence – Acquisition (μrad)	130	
	Divergence – Communication (μrad)	10	
Terminal N° 2	Diamètre (cm)	20-30	10-15
	Plage de variation angulaire du cardan (degrés)	± 2 en azimut; 0 à -60 en élévation	± 175 en azimut; ± 140 en élévation
	Champ de balayage (mrad)	8,0 \times 8,0	
	Divergence – Acquisition (μrad)	130	
	Divergence – Communication (μrad)	10	

(1) Plage de variation du cardan: angle de variation de l'antenne optique.

(2) Vitesse angulaire: vitesse angulaire maximale de pointage de l'antenne optique.

(3) Champ de balayage: région angulaire d'incertitude du nœud opposé en début d'acquisition.

On trouve sur le marché plusieurs types de terminaux associés aux liaisons croisées OSG/OSG ou OSG/non OSG. Les terminaux fabriqués jusqu'à présent ont servi à illustrer la faisabilité d'applications de télécommunication optiques spatiales existantes.

Le Tableau 3 donne les valeurs génériques d'une liaison de télécommunication optique non OSG/non OSG entre deux satellites évoluant sur des orbites circulaires adjacentes.

TABLEAU 3

Liaisons croisées non OSG/non OSG

Paramètres		Non OSG/non OSG
Distance (km)		1 000-7 000
Fréquence (THz)		200, 283, 311, 353
Longueur d'onde (µm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}
Terminal N° 1	Puissance (mW)	1 000
	Diamètre (cm)	4-15
	Plage de variation angulaire du cardan (degrés)	±90 en azimut; ±5 en élévation
	Champ de balayage (mrad)	5,5 × 5,5
	Divergence – Acquisition (µrad)	160
	Divergence – Communication (µrad)	16
Terminal N° 2	Diamètre (cm)	4-15
	Plage de variation angulaire du cardan (degrés)	±90 en azimut; ±5 en élévation
	Champ de balayage (mrad)	5,5 × 5,5
	Divergence – Acquisition (µrad)	700
	Divergence – Communication (µrad)	16

4.2 Liaisons Terre vers espace

Les liaisons OSG/Sol sont relativement stables puisque la vitesse relative du satellite par rapport à la station terrienne est faible en termes de distance et d'angle azimutal. Le satellite est pratiquement immobile au-dessus d'une certaine zone de la Terre, et la plage de variation des angles d'azimut et d'élévation associée au pointage pour une liaison donnée est relativement petite. Les spécifications d'acquisition et de pointage pour le satellite sont identiques à celles associées aux liaisons OSG/OSG, car l'incertitude de pointage avant acquisition dépend surtout des variables roulis, tangage et lacet.

L'utilisation de liaisons optiques pour les communications non OSG/Sol présente peu d'intérêt pour les configurations actuelles des systèmes spatiaux. Il est difficile en effet, en raison des phénomènes atmosphériques survenant pour les petits angles, de conserver une liaison optique avec les stations terriennes exploitées à des angles d'élévation inférieurs à 40° E. L'arc orbital et le temps de visibilité du satellite depuis la station terrienne s'en trouvent donc fortement diminués.

TABLEAU 4
Liaisons OSG/Sol

Paramètres		OSG/Sol
Distance (km)		35 000-40 000
Fréquence (THz)		200, 283, 311, 353
Longueur d'onde (µm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}
Terminal N.° 1	Puissance (mW)	500-1 500
	Diamètre (cm)	20-30
	Plage de variation angulaire du cardan de la station terrienne (degrés)	±90 en azimut; 40 à 90 en élévation
	Plage de variation angulaire du cardan de la station satellite (degrés)	±180 en azimut; -80 à -90 en élévation
	Champ de balayage (mrad)	8 × 8
	Divergence – Acquisition (µrad)	130
	Divergence – Communication (µrad)	10

5 Rapport signal/bruit (SNR)

Comme pour la plupart des liaisons de télécommunication, la qualité de fonctionnement d'une liaison optique dépend fortement du rapport SNR à l'entrée du récepteur. En général:

$$SNR = \frac{P_r}{N_t} \quad (1)$$

où:

P_r : puissance reçue (W)

N_t : puissance de bruit en provenance de toutes les sources (W).

Il est possible de simplifier les équations de base décrivant la qualité de fonctionnement d'une liaison croisée optique de laser ou d'une liaison à travers l'atmosphère en se plaçant dans les hypothèses de base suivantes:

- les antennes optiques d'émission et de réception n'ont pas d'occultation centrale;
- les formes d'ondes émises 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.

5.1 Signal

La puissance du signal reçu est liée à la puissance de sortie du laser d'émission ainsi qu'à d'autres paramètres de liaison via l'équation suivante, très proche de l'équation classique associée aux hyperfréquences.

$$P_S = P_t G_t G_r T_t T_r T_a L_S \quad (2)$$

où:

- P_S : puissance du signal reçu (W)
- P_t : puissance moyenne de sortie du laser (de l'ordre de 1 W)
- G_t : gain de l'antenne d'émission (de l'ordre de 10^{11})
- G_r : gain de l'antenne de réception (de l'ordre de 10^{11})
- T_t : affaiblissements à l'émission (de l'ordre de 0,5), dus en particulier aux effets d'absorption, de diffusion, ou aux affaiblissements de réflexion des trains optiques de l'émetteur
- T_r : affaiblissements en réception (de l'ordre de 0,5), dus en particulier aux effets d'absorption, de diffusion, ou aux affaiblissements de réflexion des trains optiques du récepteur
- T_a : affaiblissements atmosphériques (de l'ordre de 0,03) pour une liaison espace vers sol ou sol vers espace. Dans le cas d'une liaison espace-espace, on suppose que T_a vaut 0 dB. Le calcul de T_a fait l'objet du § 8
- L_S : affaiblissement en espace libre.

L'expression classique du gain d'antenne d'émission ou de réception est la suivante:

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \quad (3)$$

où:

- D : diamètre non occulté de l'ouverture principale de l'antenne (m)
- λ : longueur d'onde (m)
- f : fréquence (Hz)
- c : vitesse de la lumière (m/s).

L'affaiblissement en espace libre ou affaiblissement du canal, L_S , est donné par:

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

où:

- R : distance entre les terminaux (m).

On trouvera dans les Tableaux 5 et 6 les valeurs types de paramètres pour trois liaisons différentes. Ces Tableaux ont été élaborés à partir de l'équation de liaison simplifiée décrite précédemment.

TABLEAU 5

**Paramètres types intervenant dans le bilan de liaison
de systèmes non OSG/non OSG ou OSG/OSG**

Paramètres du bilan de liaison	Non OSG/non OSG		OSG/OSG	
	P_t	1,0 W (valeur moyenne) 2,29 W (valeur crête)	33,6 dBm	1,0 W (valeur moyenne) 2,29 W (valeur crête)
G_t	10 cm (diamètre)	110 dB	30 cm (diamètre)	119,5 dB
G_r	10 cm (diamètre)	110 dB	30 cm (diamètre)	119,5 dB
T_t	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_r	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_a	Sans objet	0,0 dB	Sans objet	0,0 dB
L_s	7 000 km	-278 dB	40 000 km	-294 dB
P_s	0,912 μ W $4,6 \times 10^{12}$ P/s	-30,4 dBm	1,81 μ W $9,1 \times 10^{12}$ P/s	-27,4 dBm

Fréquence = 283 THz

(Longueur d'onde = 1,06 μ m)

P/s: photons par seconde

TABLEAU 6

**Paramètres types intervenant dans le bilan de liaison des
systèmes OSG/Sol ou OSG/non OSG**

Paramètres du bilan de liaison	OSG/sol		OSG/non OSG	
	P_t	1,0 W (valeur moyenne) 2,29 W (valeur crête)	33,6 dBm	1,0 W (valeur moyenne) 2,29 W (valeur crête)
G_t	10 cm (diamètre)	110 dB	30 cm (diamètre)	119,5 dB
G_r	100 cm (diamètre)	130 dB	30 cm (diamètre)	119,5 dB
T_t	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_r	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_a	0,03 (cas le plus défavorable)	-15 dB	Sans objet	0,0 dB
L_s	36 300 km	-293 dB	40 000 km	-294 dB
P_s	0,091 μ W $4,6 \times 10^{11}$ P/s	-40,4 dBm	1,81 μ W $9,1 \times 10^{12}$ P/s	-27,4 dBm

Fréquence = 283 THz

(Longueur d'onde = 1,06 μ m)

Il est raisonnable, au vu des progrès considérables accomplis en matière de technologie optique adaptative et d'étoiles lasers artificielles de guidage, de supposer pouvoir diminuer d'au moins 10 dB la valeur des affaiblissements atmosphériques figurant dans le Tableau 6.

5.2 Bruit

La qualité de fonctionnement d'une liaison de télécommunication optique dépend directement du rapport SNR à l'entrée du récepteur: plus le SNR est grand, plus le taux d'erreur binaire est petit. Les détecteurs à privilégier pour les communications optiques sont les dispositifs à état solide tels que la PDA et la diode *Pin*. On utilise actuellement dans la plupart des applications un récepteur à détection directe muni d'une photodiode à avalanche disposant d'un gain interne. Quelques-unes des applications les plus récentes font appel à des diodes *Pin*, plus simples à exploiter et à fabriquer que les diodes PDA, mais dont le gain est plus petit. Ces diodes sont généralement utilisées pour des systèmes de détection hétérodyne ou homodyne.

On explicite ci-dessous l'expression du rapport SNR pour une PDA couramment utilisée en détection directe. On suppose que le signal utile est suffisamment grand par rapport au bruit généré par les photons, et que d'autres sources telles que le bruit de l'amplificateur ou les illuminations à l'arrière peuvent être négligées. Dans le cas d'un détecteur associé à un filtre passe-bas de largeur de bande B , le courant total en sortie est donné par:

$$i = i_S + i_N \quad (5)$$

Le courant du signal i_S , est défini par:

$$i_S = \frac{\eta e P_S}{h f} \quad (6)$$

et le courant de bruit de grenaille, i_N , de moyenne et de moyenne quadratique nulles, est donné par:

$$\sigma_N^2 = \langle i_N^2 \rangle = 2e B i_S = \frac{2\eta e^2 B P_S}{h f} \quad (7)$$

où:

- η : efficacité quantique du détecteur (généralement entre 0,7 et 1)
- e : charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
- h : constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J/s)
- f : fréquence optique (Hz)
- P_S : puissance du signal reçu (W)
- B : largeur de bande du filtre (Hz).

Il convient de noter que la puissance de bruit est directement proportionnelle à la puissance P_S de signal.

En l'absence d'effets atmosphériques, SNR en sortie est donc égal à:

$$SNR = \frac{i_S}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{\eta P_S}{2h f B}} \quad (8a)$$

ou, exprimé sous forme d'un rapport de puissance:

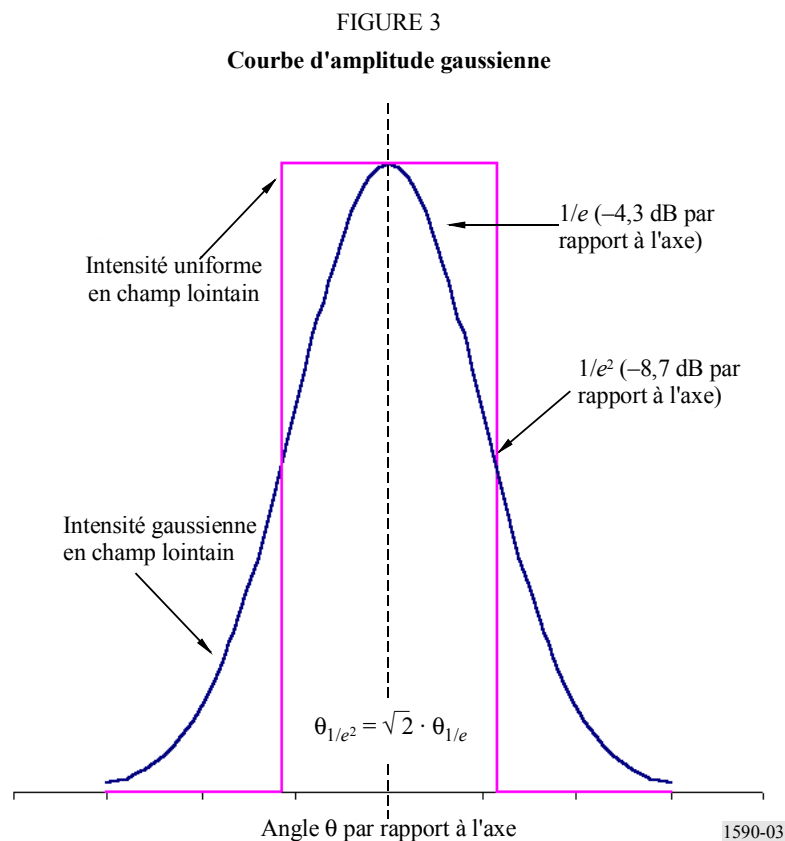
$$SNR = \frac{\eta P_S}{2h f B} \quad (8b)$$

6 Considérations relatives à l'antenne

Les systèmes laser de télécommunication en espace libre utilisent des télescopes conventionnels comme antenne d'émission et de réception. Ces télescopes étaient généralement de type Cassegrain, mais les progrès récents accomplis en matière de fabrication et l'accroissement considérable de la puissance optique disponible conduisent actuellement à utiliser principalement des éléments réfléchissants ou des télescopes à axe décalé, pour s'affranchir des effets de masque et de la diminution résultante du gain axial. Les diagrammes d'antenne en émission et en réception sont différents, car l'optique d'émission est généralement alimentée par un laser à faisceau gaussien, alors que l'optique de récepteur est associée à un détecteur plan.

6.1 Antenne d'émission

On utilise à l'émission 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 conduit à un faisceau de distribution d'énergie gaussienne présentant une intensité maximale sur l'axe d'émission. Le diagramme de faisceau est conçu de manière telle que l'intensité du faisceau décroît en amplitude avec la séparation angulaire par rapport à l'axe d'émission, et seuls quelques pourcentages de la puissance du faisceau sont perdus. Les deux points de référence correspondent aux points pour lesquels l'amplitude de faisceau diminue de 37% ou de 13% par rapport à l'amplitude sur l'axe. Ce sont les points $1/e$ et $1/e^2$ respectivement, souvent mentionnés pour caractériser le diagramme d'émission d'un laser. La Fig. 3 est un exemple de ce type de diagramme.



L'ouverture de faisceau $1/e^2$ est donnée par:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{2,44 \lambda}{D} \quad (9)$$

où:

θ_{1/e^2} : ouverture de faisceau (rad).

L'ouverture des faisceaux est généralement de l'ordre de 1×10^{-5} rad (c'est-à-dire $5,7 \times 10^{-4}$ degrés).

Dans le cas d'un terminal d'émission, on peut utiliser les équations suivantes pour calculer le diagramme de rayonnement en champ lointain d'un laser à ondes planes d'amplitude gaussienne alimentant un télescope, compte tenu des hypothèses de base suivantes:

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

Soit un télescope de rayon « a », alimenté par une onde plane d'amplitude gaussienne, le rayon de contour « ω » (distance entre l'axe central du système optique et le point d'intensité $1/e^2$), et présentant une occultation centrale de rayon « b ». Son gain est donné par l'équation (10). 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, $g_t(\alpha, \gamma, X)$ correspond au terme d'efficacité de gain, qui rend compte des effets d'occultation, de troncature, d'intensité hors axe et de défocalisation.

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad (10)$$

où:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2 \alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (12)$$

A : surface d'ouverture du télescope (m^2)

a : rayon d'ouverture du télescope (m)

λ : longueur d'onde (m)

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

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

γ : rapport b/a entre le rayon, b , de l'occultation centrale et le rayon, a , d'ouverture à l'émission

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).

L'efficacité de gain sur l'axe (équation (12), avec $X = 0$) devient:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (13)$$

Le gain maximal du faisceau principal sur l'axe (équation (10), avec $X = 0$) est alors:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (14)$$

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

6.1.1 Exemple

La qualité de fonctionnement d'une antenne optique de 15 cm de diamètre d'ouverture, exploitée à une fréquence de 282,8 THz (soit 1,06 μm de longueur d'onde) et sans occultation centrale, se calcule comme suit:

$$\lambda = 1,06 \mu\text{m}$$

$$a = 0,075 \text{ m}$$

$$b = 0$$

d'où:

$$\gamma = \frac{b}{a} = 0$$

L'efficacité de gain sur l'axe vaut alors:

$$g_t(\alpha, 0, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - 1 \right]^2 \right] \quad (15)$$

Il a été prouvé que la qualité de fonctionnement est optimale en présence d'une occultation lorsque le faisceau d'alimentation, α , et l'efficacité de gain, γ , sont liés par l'équation (16) (dont la précision est de $\pm 1\%$ si $\gamma \leq 0,4$):

$$\alpha = 1,12 - 1,30 \gamma^2 + 2,12 \gamma^4 \quad (16)$$

Dans notre cas, $\gamma = 0$ (pas d'occultation), ce qui donne $\alpha = 1,12$. D'où l'efficacité de gain:

$$g_t(1,12; 0; 0) = 0,8145 \quad (17)$$

La limite supérieure du gain sur l'axe pour notre ouverture circulaire uniformément éclairée et sans occultation de 15 cm de diamètre est alors:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 = 1,976 \times 10^{11} \quad (18)$$

Le gain maximal sur l'axe est alors obtenu en utilisant l'équation (10):

$$G_t(1,12; 0; 0) = 1,61 \times 10^{11} \quad (19)$$

Le diagramme de rayonnement hors axe (dB) en utilisant l'équation (10) devient:

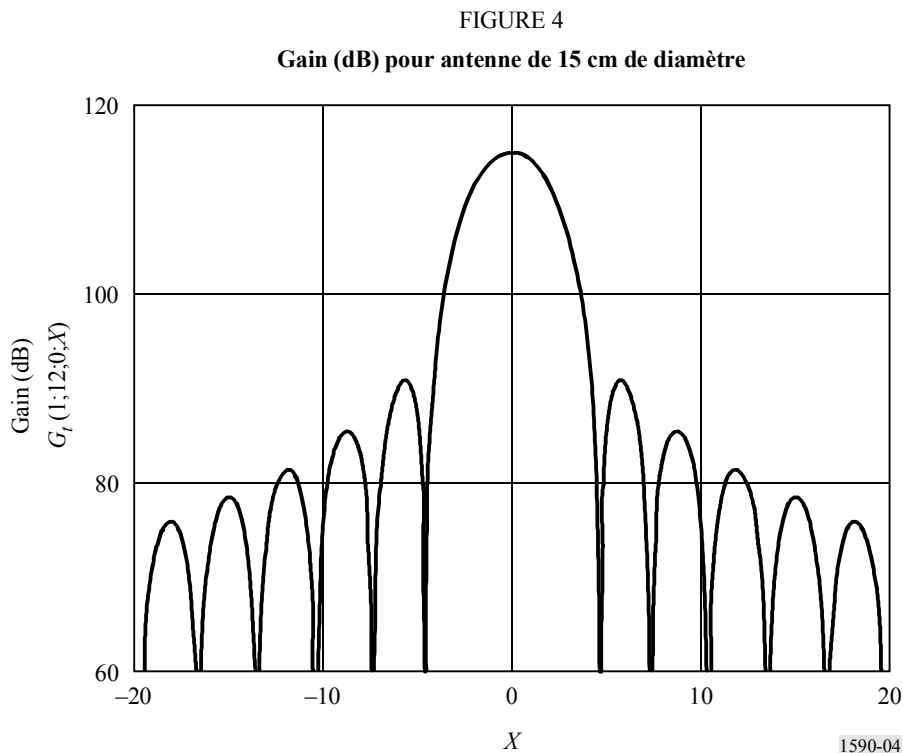
$$G_t(1,12;0;X) = 10 \log [G_0 \cdot g_t(1,12;0;X)] \quad (20)$$

où:

$$g_t(1,12;0;X) = 2\alpha^2 \cdot \left| \int_0^1 J_0(X\sqrt{u}) \cdot e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (21)$$

avec:

$$X = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot a \cdot \sin(\theta) \quad (22)$$



On observe un premier zéro pour $X = 4,7$ environ, c'est-à-dire $\theta = 10,6 \mu\text{rad}$ ($0,0006^\circ$). Le premier lobe latéral correspond à $X = 5,6$ environ, c'est-à-dire $\theta = 12,6 \mu\text{rad}$ ($0,0007^\circ$); il est inférieur d'environ 27 dB au gain de faisceau principal.

6.2 Antenne de réception

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, l'ouverture du faisceau de l'antenne de réception est généralement exprimée grâce à la donnée du point $1/e^2$.

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

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad (24)$$

où:

A : surface du miroir primaire (m^2)

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

et

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (25)$$

où:

a : rayon du miroir primaire (m)

b : rayon du miroir secondaire (m).

Le gain obtenu par l'équation (24) 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 antenne et un détecteur circulaires. Le premier terme de l'équation (24) correspond au gain classique d'une antenne idéale sans occultation de surface A . Le second terme correspond aux pertes dues à l'occultation constituée par le miroir secondaire d'un système Cassegrain. En l'absence de miroir secondaire, b s'annule dans l'équation (25) ce qui conduit à annuler le second terme de l'équation (24). Le troisième terme, δ , qui correspond aux pertes (dB), représente les débordements de l'énergie du signal au-delà des limites du détecteur.

Dans le cas d'un système à détection directe, δ est inversement proportionnel au rapport entre la taille du détecteur et la distance focale du télescope. Il est le plus souvent inférieur ou égal à $-0,5$ dB. Dans le cas d'un système hétérodyne ou homodyne, δ dépend de la distribution d'énergie de l'oscillateur local associé au détecteur, qui peut être gaussienne ou uniforme. δ est donné respectivement par les équations (26 a) et (26 b) en cas d'éclairement gaussien ou uniforme.

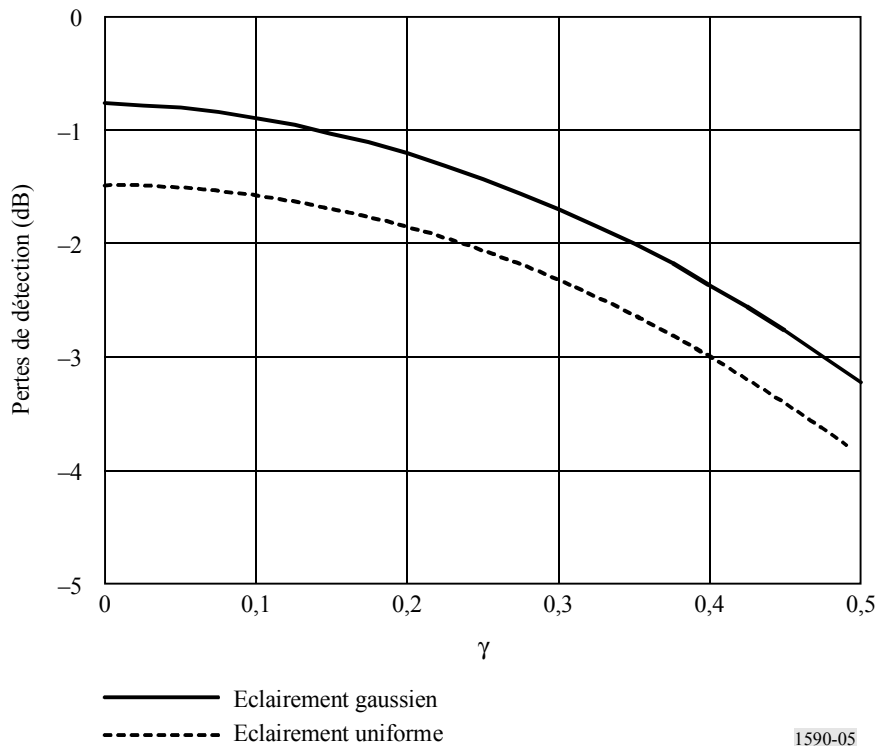
$$\delta = -8,9114\gamma^2 - 0,452\gamma - 0,7621 \quad (26a)$$

$$\delta = -9,5836\gamma^2 + 0,1113\gamma - 1,4937 \quad (26b)$$

On observe des pertes légèrement plus petites en cas d'éclairement gaussien (valeurs généralement inférieures d'environ 0,6 à 0,7 dB par rapport au cas d'un éclairement uniforme). Les pertes données par les équations (26 a) et (26 b) sont représentées sur la Fig. 5.

FIGURE 5

Pertes de détection hétérodyne ou homodyne en fonction du rapport d'occultation γ



6.2.1 Champ de vision

Le champ de vision dépend de la taille du détecteur et de la distance focale du télescope. Il est donné par:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (27)$$

où:

φ : champ de vision (rad)

d : diamètre du détecteur (m)

F : distance focale du télescope (m)

φ (équation (27)) correspond à l'ouverture angulaire au point $1/e$.

6.2.2 Considérations relatives aux angles hors axe

On adapte généralement le diagramme de l'antenne de réception au détecteur. Celui-ci est protégé des brouillages grâce à des écrans et n'est exposé qu'aux émissions à moins de φ rad de l'axe du faisceau principal. Le détecteur n'est pas soumis aux énergies brouilleuses parvenant aux lobes latéraux de l'antenne de réception, qui peuvent donc être négligées lors de l'analyse des brouillages.

6.2.3 Exemples

Soit une station terrienne comprenant un détecteur hétérodyne uniformément éclairé dont les caractéristiques sont les suivantes:

$$f = 353 \text{ THz}$$

$$\lambda = 0,85 \text{ } \mu\text{m}$$

$$a = 0,50 \text{ m}$$

$$b = 0,15 \text{ m}$$

alors:

$$A = \pi(0,5^2) = 0,7854 \quad \text{m}^2$$

$$\gamma = \frac{0,15}{0,50} = 0,3$$

$$\delta = -9,5836(0,3^2) + 0,1113(0,3) - 1,4937 = -2,3$$

$$G_R = 10 \log \left(4\pi \frac{0,7854}{(0,85 \times 10^{-6})^2} \right) + 10 \log (1 - 0,3^2) + (-2,3) = 131,4 - 0,4 - 2,3 = 128,7 \quad \text{dB}$$

Dans le cas d'une antenne de réception embarquée sur un engin spatial et munie d'un système de détection directe présentant les caractéristiques suivantes:

$$a: \quad 0,075 \text{ m et}$$

$$b: \quad 0,0 \text{ m (pas de miroir secondaire)}$$

on obtient:

$$A = 0,018 \text{ m}^2$$

$$\gamma = 0 \text{ et}$$

$$\delta = -0,5 \text{ dB}$$

pour

$$f: \quad 200, 283, 311 \text{ ou } 353 \text{ THz}$$

$$G_R = 109,5, 112,5, 113,4 \text{ ou } 114,5 \text{ respectivement.}$$

7 Réflectivité

Chaque satellite utilisant une liaison de télécommunication optique est éclairé par un faisceau laser et réfléchit une partie de l'onde incidente. Chaque liaison est presque toujours associée à une liaison de retour, ce qui offre un effet de rétroaction permettant de corriger le pointage optique. Les deux liaisons ainsi constituées forment une boucle de contrôle permettant de conserver l'alignement optique. Chaque émetteur optique est donc éclairé par un faisceau de retour susceptible de générer des réflexions importantes. On sait que les grands panneaux solaires sont très réfléchissants et peuvent provoquer de fortes réflexions durant les rares et brèves périodes d'alignement avec l'observateur. De nombreux satellites sont en outre entourés d'une enveloppe thermique réfléchissante généralement ridée, constituée de nombreuses facettes à forte réflectivité. Il peut en résulter des réflexions intenses, mais concentrées dans un faisceau très étroit.

On trouvera ci-dessous les valeurs types de réflectivité d'un certain nombre de matériaux actuellement utilisés pour les enveloppes thermiques. Les valeurs dépendent de la fréquence, en particulier dans le cas des semi-conducteurs et les métaux.

Kapton noir	6% (-12 dB)
Mylar aluminisé	86% (-0,7 dB)
Germanium	50% (-3 dB)
Kapton «Or»	62% (-2,1 dB)

8 Propagation

La propagation atmosphérique dans cette région du spectre est actuellement étudiée par la Commission d'études 3 des radiocommunications au travers de la Question 228/3 – Données de propagation requises par la planification des systèmes de radiocommunications spatiales et des systèmes des services scientifiques spatiaux fonctionnant au-dessus de 275 GHz.

9 Emplacement de la station terrienne

La qualité de fonctionnement d'une station terrienne exploitée à des fréquences au-dessus de 30 THz dépend fortement de l'atmosphère (tant de son affaiblissement que de sa turbulence). L'emplacement idéal d'une station terrienne correspond généralement à une altitude élevée (au moins 2 km au-dessus du niveau de la mer), essentielle pour s'affranchir de la majeure partie des turbulences atmosphériques. Il est souhaitable en outre que l'humidité soit faible, celle-ci pouvant générer d'importants effets d'absorption ou de diffusion dans l'atmosphère.
