

RECOMMANDATION UIT-R S.1782

Possibilités de fournir un accès à l'Internet large bande au niveau mondial à l'aide de systèmes du service fixe par satellite

(Question UIT-R 269/4)

(2007)

Domaine de compétence

En réponse aux questions posées à la fois par l'Assemblée des radiocommunications et par la CMR-03, le présent projet contient une étude préliminaire sur les possibilités de fournir un accès à l'Internet à haut débit par l'intermédiaire d'un satellite. La première Annexe a pour objet d'identifier des bandes appropriées du service fixe par satellite (SFS) et c'est ainsi que des paires de largeur de bande de 500 MHz sont choisies dans les attributions faites au SFS dans les bandes 11/14 GHz, 20/30 GHz et 40/50 GHz. De plus, sur la base des liaisons satellitaires directes à partir des terminaux d'utilisateur équipés d'antennes de 30 cm de diamètre, on a calculé les caractéristiques des liaisons montante et descendante dans chaque cas ainsi que les capacités par satellite. Une estimation est faite de la capacité totale de ces systèmes à desservir une zone de référence de 10 000 000 de km². Dans la deuxième Annexe on trouvera les caractéristiques des liaisons montante et descendante dans les bandes 20/30 GHz et 11/14 GHz applicables à un système conçu pour assurer des liaisons satellitaires directes à partir de terminaux d'utilisateur équipés d'antennes de 1,2 m de diamètre; on y trouvera aussi un calcul de la capacité par satellite ainsi que de la capacité totale. Enfin, la troisième Annexe a pour objet de définir les caractéristiques d'un exemple de système fondé sur un accès d'utilisateur par l'intermédiaire de liaisons radioélectriques de Terre à destination de stations terriennes «communautaires» et, par conséquent, sur l'utilisation d'un satellite dans les bandes 20/30 GHz ou 11/14 GHz vers une seule station terrienne centrale; dans ce cas également, la capacité correspondante par satellite a été calculée, tout comme la capacité totale.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la technologie des télécommunications par satellite a la possibilité d'accélérer la disponibilité de services Internet à haut débit dans les pays en développement, y compris dans les pays les moins avancés, les pays en développement enclavés ou insulaires ainsi que dans les économies en transition;
- b) qu'il est souhaitable de déterminer les caractéristiques techniques et d'exploitation des systèmes du service fixe par satellite (SFS) qui pourraient faciliter la production en série de terminaux d'utilisateur simples à un coût abordable;
- c) qu'il est souhaitable d'évaluer la capacité au niveau mondial qui pourrait être fournie dans des attributions de fréquence faites au SFS par des systèmes ayant les caractéristiques indiquées au b) du *considérant*;
- d) que les caractéristiques indiquées au b) du *considérant* devraient tenir compte de la possibilité de concevoir des systèmes spécifiques pour fournir un accès à l'Internet à haut débit par l'intermédiaire de petits terminaux d'utilisateur mais aussi de l'existence de certains systèmes possédant déjà des moyens d'accès à l'Internet large bande;
- e) que l'on emploie actuellement différentes tailles de station terrienne pour fournir un accès à l'Internet large bande par l'intermédiaire des systèmes existants du SFS conçus pour prendre en charge également d'autres applications et utilisant plusieurs bandes de fréquences;

f) que l'élaboration de normes relatives à la technologie satellitaire mentionnée au a) du *considérant* pour les applications Internet facilite l'utilisation plus générale du satellite pour l'accès à l'Internet,

notant

a) que la Recommandation UIT-R S.1783 décrit les caractéristiques des systèmes à haute densité du service fixe par satellite (HDFSS);

b) que la Recommandation UIT-R S.1709 décrit les caractéristiques techniques des interfaces radioélectriques pour les systèmes à satellites large bande mondiaux,

reconnaissant

a) que les attributions de fréquence au SFS peuvent être utilisées à court, moyen et long terme pour la fourniture au niveau mondial de services Internet à haut débit,

recommande

1 que les informations contenues dans les Annexes 1, 2 et 3 constituent trois exemples susceptibles d'être utilisés en vue d'assurer un accès à l'Internet au niveau mondial à haut débit par l'intermédiaire du SFS.

Annexe 1

Possibilités de fournir au niveau mondial¹ un accès à l'Internet large bande² à l'aide de systèmes du SFS conçus pour de très petites antennes de station terrienne

1 Considérations relatives aux bandes de fréquences

1.1 Bandes appropriées

L'expression «à court terme» s'applique aux bandes pour lesquelles il existe déjà une technologie de télécommunication par satellite. A l'heure actuelle, cela est totalement vrai en ce qui concerne les attributions faites au SFS dans les bandes 4/6 GHz et 11/14 GHz mais ne l'est qu'en partie en ce qui concerne les attributions faites au SFS dans les bandes 20/30 GHz. On peut s'attendre qu'«à moyen terme», c'est-à-dire au cours des dix années à venir, la technologie de télécommunication par satellite à 20/30 GHz sera totalement arrivée à maturité et qu'elle se développera également dans une certaine mesure à 40/50 GHz bien que l'expérience semble indiquer que ce développement ne pourra être considéré comme total qu'«à long terme». Dans l'Article 5 du Règlement des radiocommunications (RR), il existe des attributions faites au SFS au-dessus de 50 GHz mais il semble peu probable que l'on assiste à des progrès significatifs dans ces bandes avant le long terme de sorte qu'il n'en sera pas question ici.

¹ Dans la présente étude, l'expression «au niveau mondial» signifie tout point pouvant être desservi par un satellite géostationnaire.

² Dans la présente étude, l'exemple du «large bande» utilisé est un débit d'utilisateur de 2 Mbit/s.

Compte tenu des études préliminaires réalisées, l'utilisation des bandes 4/6 GHz a été écartée pour l'application considérée, au motif que les terminaux peu coûteux sont associés à de très petites antennes dont le gain ne pourrait probablement pas être suffisant à ces fréquences pour un fonctionnement avec les satellites à large faisceau qui sont généralement utilisés. En outre, les bandes 4/6 GHz sont déjà fortement utilisées de sorte que même si l'on disposait de satellites avec faisceaux ponctuels dans la bande C, il serait très difficile que les très petites stations terriennes à antennes paraboliques ayant un faisceau à grande ouverture puissent partager des fréquences avec les services existants. Dans ces conditions, les bandes 4/6 GHz ne sont pas examinées plus avant dans la présente Annexe.

Par ailleurs, il ressort de ces études préliminaires que les considérations évoquées au paragraphe précédent s'appliquent aussi, dans une certaine mesure, aux bandes 11/14 GHz. La limitation applicable à la taille de l'antenne de station terrienne est moins stricte que pour les bandes 4/6 GHz car le gain est plus élevé et que l'utilisation de faisceaux ponctuels (moyens) est plus courante mais, comme pour les bandes 4/6 GHz, il se peut que le partage des fréquences constitue un problème car les fréquences non planifiées à 11/14 GHz sont fortement utilisées depuis de nombreuses années.

Il semble que les attributions du SFS dans les bandes 20/30 GHz s'avèrent, pour des raisons propres, comme les mieux adaptées pour fournir un accès à l'Internet large bande à court terme, cela pour les raisons suivantes: la longueur d'onde se prête à de très petites antennes, la technologie est relativement bien au point et son utilisation est encore assez limitée. En outre, l'accès à l'Internet par les utilisateurs est incompatible avec la façon dont la grande majorité des bandes du SFS au niveau international est réglementée jusqu'ici, c'est-à-dire par la coordination des différentes stations terriennes. Etant donné qu'il est possible que les terminaux d'utilisateur soient vendus en grande quantité par de «gros» détaillants pour être installés aussi bien à domicile que dans les bureaux, il est nécessaire de mettre en place un régime réglementaire semblable à celui qui est élaboré pour prendre en compte les applications HDFSS. Le numéro 5.516B du RR, cité par la CMR-03 dans les études préconisées par cette conférence sur les possibilités de fournir un accès à l'Internet large bande au niveau mondial à l'aide de systèmes du SFS, est reproduit ci-après à toutes fins utiles:

«Les bandes ci-après sont identifiées pour des applications à haute densité du service fixe par satellite:

17,3-17,7 GHz	(espace vers Terre) en Région 1,
18,3-19,3 GHz	(espace vers Terre) en Région 2,
19,7-20,2 GHz	(espace vers Terre) dans toutes les Régions,
39,5-40 GHz	(espace vers Terre) en Région 1,
40-40,5 GHz	(espace vers Terre) dans toutes les Régions,
40,5-42 GHz	(espace vers Terre) en Région 2,
47,5-47,9 GHz	(espace vers Terre) en Région 1,
48,2-48,54 GHz	(espace vers Terre) en Région 1,
49,44-50,2 GHz	(espace vers Terre) en Région 1,
et	
27,5-27,82 GHz	(Terre vers espace) en Région 1,
28,35-28,45 GHz	(Terre vers espace) en Région 2,
28,45-28,94 GHz	(Terre vers espace) dans toutes les Régions,
28,94-29,1 GHz	(Terre vers espace) en Régions 2 et 3,

29,25-29,46 GHz	(Terre vers espace) en Région 2,
29,46-30 GHz	(Terre vers espace) dans toutes les Régions,
48,2-50,2 GHz	(Terre vers espace) en Région 2.»

Il convient de noter que ces désignations s'ajoutent aux largeurs de bande totales suivantes:

<i>Bandes 20/30 GHz</i>	Niveau mondial	plus	Région 1	Région 2	Région 3
Liaison descendante	500 MHz		400 MHz	1 000 MHz	–
Liaison montante	1 030 MHz		320 MHz	470 MHz	160 MHz
<i>Bandes 40/50 GHz</i>					
Liaison descendante	500 MHz		2 000 MHz	1 500 MHz	–
Liaison montante	–		–	2 000 MHz	–

Par conséquent, en supposant que les fréquences figurant dans les bandes identifiées pour une utilisation au niveau mondial puissent être réutilisées simultanément dans deux ou trois Régions, le spectre total identifié pour des applications HDFSS dans ces bandes est le suivant, Région par Région:

Région 1 – 3 400 MHz liaison descendante, 1 350 MHz liaison montante;

Région 2 – 3 500 MHz liaison descendante, 3 500 MHz liaison montante;

Région 3 – 1 000 MHz liaison descendante, 1 190 MHz liaison montante.

Il ressort de ces chiffres totaux qu'il faudra peut-être une largeur de bande beaucoup plus grande sur la liaison descendante que sur la liaison montante pour répondre aux besoins des applications HDFSS dans la Région 1 alors que dans les deux autres Régions les besoins peuvent être du même ordre dans les deux sens de transmission.

En ce qui concerne les bandes 20/30 et 40/50 GHz, les considérations exposées dans la présente Recommandation sont limitées aux bandes identifiées au numéro 5.516B du RR pour les trois Régions, c'est-à-dire 19,7-20,2 GHz, 28,45-28,94 GHz, 29,46-30,0 GHz et 40,0-40,5 GHz (voir le Tableau 1).

Bien qu'ayant invité l'UIT-R à étudier le présent sujet, la CMR-03 et l'Assemblée des radiocommunications ont envisagé l'utilisation des bandes du SFS et les résultats des analyses figurant dans la présente Annexe pour les bandes 11/14 GHz du SFS seraient analogues à ceux obtenus pour les bandes adjacentes du SRS (c'est-à-dire 11,7-12,5 GHz dans les Régions 1 et 3 et 12,2-12,7 GHz dans la Région 2).

1.2 Utilisation actuelle des bandes dans le SFS

Afin d'évaluer dans quelle mesure il serait possible de répondre aux besoins d'accès à l'Internet large bande grâce aux futurs satellites dans les bandes visées au § 2.1, il faut déterminer le degré d'utilisation actuelle de la ressource orbite/spectre par les systèmes à satellites existants ou encore l'utilisation future par des systèmes déjà en cours de développement pour d'autres applications du SFS. Si l'on veut obtenir une indication de la différence entre l'utilisation actuelle et l'utilisation prévue pour chaque bande il est possible de consulter la base de données SNS du Bureau des radiocommunications. Le Tableau 1 a pour objet de comparer le nombre de demandes d'assignation de fréquence pour des réseaux OSG du SFS qui ont été présentées jusqu'en janvier 2005 dans un

segment de 500 MHz de chaque attribution au SFS dans les bandes 11/14 GHz, 20/30 GHz et 40/50 GHz. Chacune de ces bandes de 500 MHz (sauf la dernière) est attribuée au SFS dans les trois Régions:

TABLEAU 1
Comparaison des demandes d'assignation de fréquence

Attribution au SFS (GHz)	Largeur de bande (MHz)	Sens de transmission	Principale utilisation	Nombre de fiches de notification
10,95-11,2 } 11,45-11,7 }	500	Espace vers Terre	Applications commerciales générales du SFS	12 417
14,0-14,5	500	Terre vers espace		16 467
19,7-20,2	500	Espace vers Terre	Identifiée pour des applications HDFSS	5 245
29,5-30,0	500	Terre vers espace		4 830
40,0-40,5	500	Espace vers Terre	Identifiée pour des applications HDFSS	1 205
(48,2-48,7 ⁽¹⁾)	500	Terre vers espace		(797)

⁽¹⁾ Partie d'une bande identifiée par la CMR-03 pour des liaisons montantes HDFSS en Région 2. Bien qu'elle n'ait pas été identifiée de la même façon pour les Régions 1 et 3, cette partie de bande est ajoutée de façon que le Tableau puisse s'appliquer aux liaisons montantes pour compléter les liaisons descendantes à 40 GHz.

Sachant que le nombre de charges utiles de satellite fonctionnant actuellement à 11/14 GHz est beaucoup plus élevé que dans les bandes de fréquences supérieures, d'après les informations contenues dans le Tableau 1, il est possible de déduire ce qui suit:

- les principales attributions mondiales faites au SFS à 11/14 GHz sont actuellement beaucoup plus utilisées que les parties des attributions à 20/30 GHz qui ont été identifiées pour une future utilisation au niveau mondial des applications HDFSS;
- dans le SFS, l'utilisation des fréquences 40/50 GHz identifiées pour les applications futures HDFSS n'a pas encore commencé.

2 Caractéristiques techniques possibles

2.1 Faisceaux de satellite

Selon les études réalisées, les systèmes les plus appropriés pour offrir des services d'accès à l'Internet par satellite à haut débit à l'aide de terminaux d'utilisateur à un coût abordable seront ceux qui seront conçus pour prendre en charge des nanostations (USAT, *ultra-small aperture terminals*) à l'extrémité utilisateur de la liaison. Dans la présente étude, un diamètre de 30 cm a été choisi comme exemple. Etant donné le gain relativement faible de ces terminaux, en particulier lorsqu'il s'agit des basses fréquences, on obtiendrait une capacité modérée par satellite d'où il s'ensuit que le coût du secteur spatial par bit d'information serait relativement élevé, à moins que la conception de chaque satellite tienne compte d'une réutilisation des fréquences par l'intermédiaire de faisceaux ponctuels multiples.

Les Tableaux 3, 4 et 5 fournissent un résumé des paramètres tirés des Annexes de la Recommandation UIT-R S.1328 qui présentent de l'intérêt pour la présente étude et donnent en outre une indication sur les dimensions des faisceaux ponctuels susceptibles d'être disponibles à l'heure actuelle ou dans un proche avenir. Dans le cas des bandes 11/14 GHz, les données du

Tableau 3 ont été multipliées par les valeurs de gain de l'antenne de réception du satellite, obtenues d'après les réponses à un questionnaire envoyé par le Bureau des radiocommunications en 1998. On peut supposer que les satellites conçus dans un avenir immédiat pour fournir un accès à l'Internet large bande comporteront de multiples faisceaux ponctuels tendant vers un objectif bien précis (c'est-à-dire un gain élevé), compte tenu des caractéristiques indiquées aux Tableaux 3, 4 et 5. Par conséquent, pour déterminer les caractéristiques des liaisons d'utilisateur de systèmes à satellites appropriés, on a choisi pour base les paramètres du Tableau 2. Pour faciliter les calculs, on part de l'hypothèse que les sous-systèmes d'antenne du satellite seront conçus de telle sorte que chaque paire de faisceaux d'émission et de réception aura la même ouverture et que leurs empreintes auront la même position fixe à la surface de la Terre.

TABLEAU 2

Caractéristiques choisies du faisceau ponctuel de satellite

Gamme de fréquences du SFS	11/14 GHz	20/30 GHz	40/50 GHz
Gain au centre du faisceau (dBi)	42	50	55
Ouverture de faisceau à -3 dB (degrés)	1,4	0,6	0,3
Nombre, n , de faisceaux d'émission/de réception à double polarisation par satellite	12	32	64

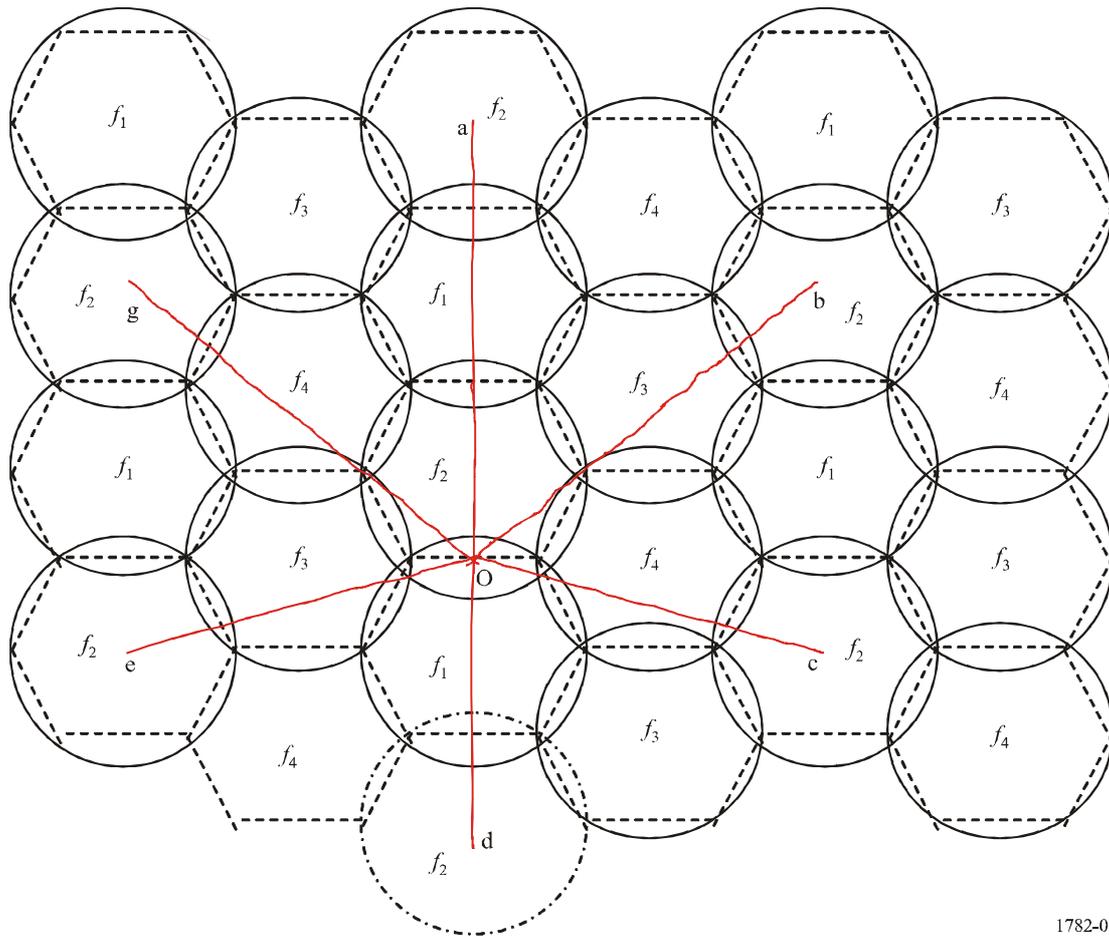
Il est important de noter à ce stade que, à mesure que l'ouverture de faisceau diminue, l'exigence de précision de pointage augmente, ce qui accroît la difficulté et le coût du contrôle des empreintes du faisceau.

Compte tenu des progrès réalisés au niveau des engins spatiaux au cours des dernières années, il est raisonnable de supposer qu'il existe une configuration d'alimentation de l'antenne pour compenser la courbure de la surface de la Terre afin que tous les faisceaux générés par un satellite donné possèdent des empreintes circulaires du même diamètre, indépendamment de la direction de pointage. Ainsi, à l'exception d'un faisceau orienté vers le point de projection du satellite, chaque faisceau aura une section transversale presque elliptique et son taux d'ellipticité ainsi que son orientation dépendront de sa direction de pointage par rapport à la direction du point de projection du satellite. Les ouvertures de faisceau du grand axe (φ_a) et du petit axe (φ_b) seront telles que $((\varphi_a) \cdot (\varphi_b))^{0,5} = (\varphi_0)$, où (φ_0) est l'ouverture à -3 dB du faisceau (circulaire) orienté vers le point de projection du satellite.

Pour une couverture continue à l'aide de faisceaux multiples avec des empreintes circulaires, on part de l'hypothèse que les chevauchements forment une grille hexagonale (voir la Fig. 1).

FIGURE 1

Grille hexagonale des empreintes de faisceaux de satellite avec chevauchement



1782-01

Sur le diagramme de réutilisation à quatre fréquences représenté sur la Fig. 1, on suppose que chaque faisceau a une polarisation double. Dans l'hypothèse de taux de décroissance réalisables et de niveaux dans les premiers lobes latéraux semblables à ceux décrits dans les équations de la Recommandation UIT-R S.672, la discrimination entre le centre d'un faisceau et le bord le plus proche du faisceau suivant fonctionnant à la même fréquence devrait suffire pour ce mode de fonctionnement. Par exemple, au point «o» à l'extrémité de l'un des hexagones desservis par un faisceau à la fréquence f_2 , les contributions de brouillage provenant des six faisceaux les plus proches fonctionnant à la même fréquence peuvent être calculées à partir des angles hors axe oa, ob, oc, od, oe et og, qui sont sous-tendus au niveau du satellite. Selon la géométrie du diagramme:

$$oa = 5(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 2,165(\varphi_0)$$

$$ob = og = (\{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2 + \{3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2)^{0,5} = 1,984(\varphi_0)$$

$$oc = oe = (\{(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2 + \{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2)^{0,5} = 1,561(\varphi_0) \text{ et}$$

$$od = 3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 1,299(\varphi_0)$$

TABLEAU 3

Dimensions des faisceaux ponctuels de satellites OSG/SFS conçus pour fonctionner dans les bandes 11/14 GHz

a) Informations extraites de la Recommandation UIT-R S.1328

Tableau des Annexes de la Recommandation UIT-R S.1328	Tableau 2		Tableau 17	Tableau 29
	OSG-C	OSG-D	OSG-VX	Pan-Af
Système à satellites				
Gain crête de l'antenne d'émission du satellite (dBi)	30	30	33,5	32-38
Ouverture à -3 dB du faisceau d'émission du satellite (degrés)	(5,6)	(5,6)	(3,7)	(4,5-2,2)
Gain crête de l'antenne de réception du satellite (dBi)			33,5	
Ouverture à -3 dB du faisceau de réception du satellite (degrés)			(3,7)	
Polarisation	Circulaire	Double C	Double C	Rectiligne
Nombre de faisceaux de service par satellite				10

b) Informations extraites des réponses à un questionnaire envoyé par le Bureau des radiocommunications

S'agissant des liaisons à 11/14 GHz pour lesquelles des données ont été fournies, 90 ont un gain crête de l'antenne de réception du satellite supérieur à 30 dBi. Ainsi, les ouvertures correspondantes à mi-puissance sont inférieures à 6°, et l'on peut considérer que ces faisceaux sont de type ponctuel.

Ces valeurs de gain sont comprises entre 30,1 et 45,6 dBi, avec une valeur moyenne de 36,5 dBi, ce qui correspond respectivement à des ouvertures de faisceau de 5,5° (maximum), 0,93° (minimum) et 2,7° (moyenne).

TABLEAU 4

**Dimensions des faisceaux de satellites OSG/SFS conçus pour fonctionner dans les bandes 20/30 GHz;
informations extraites de la Recommandation UIT-R S.1328**

Tableau des Annexes de la Recommandation UIT-R S.1328	Tableau 1		Tableau 2		Tableau 3			Tableau 5		Tableau 6	Tableau 12		Tableau 13
	OSG13	OSG20	OSG30	OSGF	OSG11	OSG12	OSG13	Système P		Système Q	OSG Ka-J		EKX
Système à satellites													
Gain crête de l'antenne d'émission du satellite (dBi)	46,5	43,5	55	49	49,5	33	46,5	53,2	46,2	49	41	47	48,4
Ouverture à -3 dB du faisceau d'émission du satellite (degrés)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	0,44	(3,97)	1,4	0,3	0,6	0,55	(1,58)	(0,79)	(0,67)
Gain crête de l'antenne de réception du satellite (dBi)	46,5	43,5	55	49	~50 ⁽¹⁾		~47 ⁽¹⁾	57,2	47,7	49			48,4
Ouverture à -3 dB du faisceau de réception du satellite (degrés)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	(~0,56)		0,9	0,3	0,6	0,55			(0,67)
Polarisation	Circulaire	Double C	Double C		Double L	Circulaire	Double C			Double C	Circulaire	Circulaire	Double
Nombre de faisceaux de service par satellite					7 + 7	1	24 + 24						

⁽¹⁾ A partir du rapport G/T .

TABLEAU 5

Dimension des faisceaux de satellites OSG/SFS conçus pour fonctionner dans les bandes 40/50 GHz; informations extraites de la Recommandation UIT-R S.1328

Tableau des Annexes de la Recommandation UIT-R S.1328	Tableau 17	Tableau 18	Tableau 19	Tableau 21	Tableau 22	Tableau 27	Tableau 28
Système à satellites	OSG-VX	OSG-SV	OSG-LV	OSG-VI	GEOSAT-X	OSGV-B1	OSGV-B2
Gain crête de l'antenne d'émission du satellite (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0	56,5	51,5	53,1
Ouverture à -3 dB de l'antenne d'émission du satellite (degrés)	(0,63)	0,15	0,15	(0,4)	(0,27)	0,3	(0,39)
Gain crête de l'antenne de réception du satellite (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0			53,1
Ouverture à -3 dB de l'antenne de réception du satellite (degrés)	(0,63)	(0,22)	0,15	(0,4)			(0,39)
Polarisation	Circulaire double	Rectiligne					
Nombre de faisceaux de service par satellite		40		24	48	24	80

Notes relatives aux Tableaux 3, 4 et 5:

Les chiffres qui ne figurent pas entre parenthèses dans ces Tableaux ont été tirés directement de la Recommandation UIT-R S.1328. Les ouvertures de faisceau indiquées entre crochets ont été obtenues à partir des chiffres de gain crête correspondants, de la manière suivante:

Pour une antenne parabolique $G_m = 10 \log((4\pi/\lambda^2)(\pi D^2/4)\eta)$

où:

G_m : gain crête (dBi)

D : diamètre (m)

λ : longueur d'onde (m)

η : rendement d'ouverture, soit 0,65.

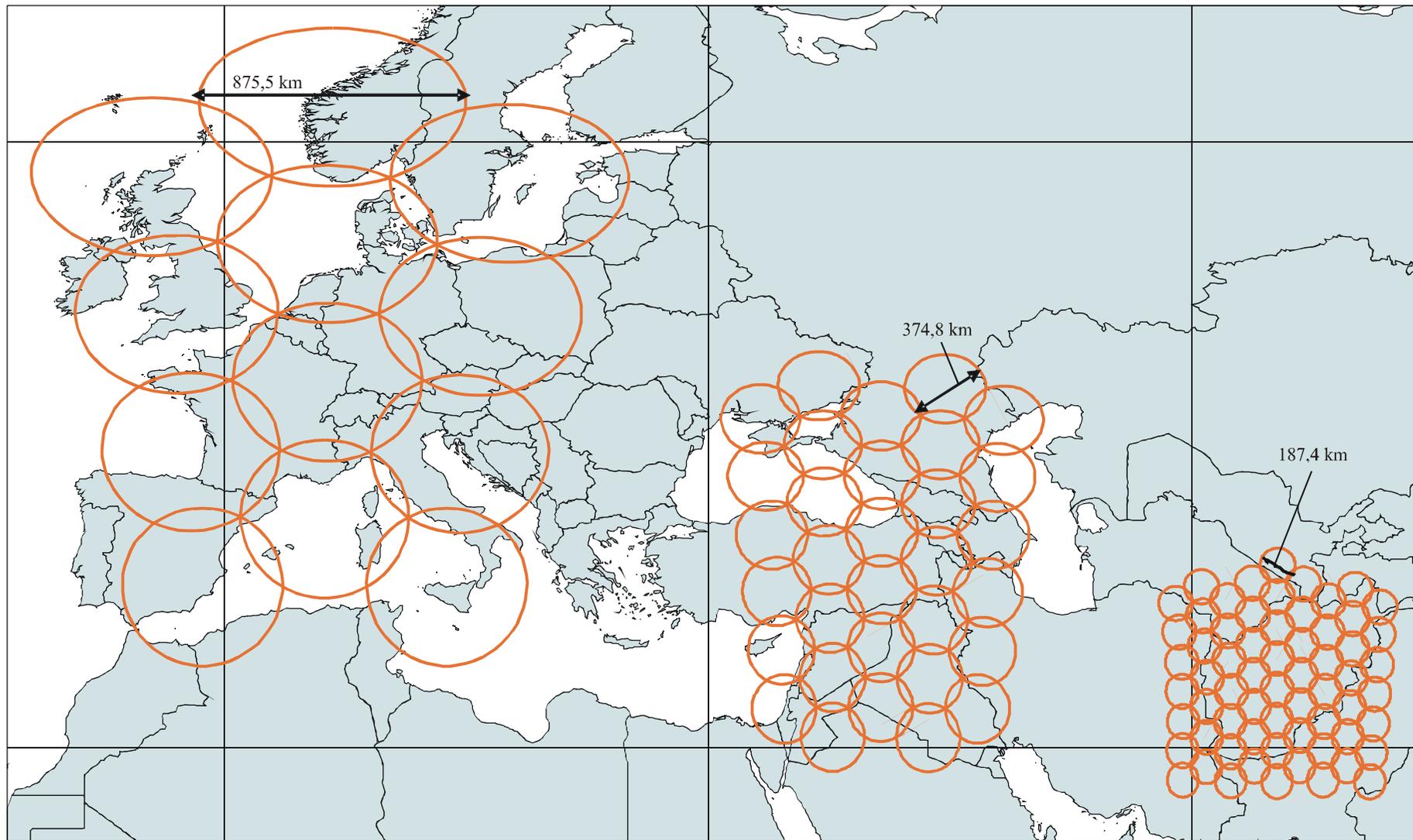
Par conséquent, $D/\lambda = (10^{0,05G_m})/(\pi\sqrt{(0,65)})$.

De plus, l'expression empirique de l'ouverture à mi-puissance est $\phi_{-3} = 70 \lambda/D$ degrés, si bien qu'en remplaçant D/λ on obtient: $\phi_{-3} = (177,3)10^{-0,05G_m}$ degrés.

Les cases laissées en blanc dans les tableaux indiquent que les données pertinentes manquent dans la Recommandation UIT-R S.1328 et ne peuvent être déduites de manière fiable à partir des données disponibles.

FIGURE 2

Exemples de configurations de faisceaux pour des satellites du SFS qui pourraient fournir un accès à l'Internet à haut débit



Empreintes de 12 faisceaux dans les bandes 11/14 GHz

Empreintes de 32 faisceaux dans les bandes 20/30 GHz

Empreintes de 64 faisceaux dans les bandes 40/50 GHz

Conformément à la Recommandation UIT-R S.672 concernant les faisceaux circulaires et elliptiques simples, si le gain dans les premiers lobes latéraux est de 25 dB inférieur au gain crête et en supposant d'une part, que la p.i.r.e. soit la même au centre de chaque faisceau et, d'autre part, que le rapport copolaire/contrapolaire de chaque faisceau soit également de 25 dB, le rapport porteuse/brouillage dans le cas de la réutilisation des fréquences est donné par l'expression:

$$(C/I)_{FR} = -10 \log(7 \{10^{-(25/10)}\}) = 16,5 \text{ dB}$$

Dans la pratique, le rapport $(C/I)_{FR}$ aura vraisemblablement une valeur plus élevée car il est peu probable que l'ensemble des six contributions corresponde à des valeurs crête des lobes latéraux.

Les exemples de couverture de satellites géostationnaires dont les configurations de faisceaux sont résumées au Tableau 2 sont illustrés sur la Fig. 2. Il convient de noter que la couverture globale diminue fortement en proportion inverse par rapport à la fréquence.

2.2 Exemples de paramètres de liaison

La présente étude concerne le cas où des utilisateurs accèdent directement au satellite par l'intermédiaire de USAT. L'autre solution qui consiste à utiliser des stations terriennes équipées d'antennes plus grandes est examinée dans les Annexes 2 et 3.

Dans les calculs effectués pour obtenir les paramètres des liaisons d'utilisateur avec un satellite, les hypothèses ci-après ont été retenues, compte tenu des trois séries de bandes de fréquences décrites au § 1:

- Si les stations terriennes d'utilisateur étaient fondées sur des USAT, les stations terriennes avec lesquelles elles communiqueraient par satellite et qui constitueraient l'interface avec l'Internet comporteraient de grandes antennes; elles sont appelées ici: «stations de base». On compterait beaucoup moins de stations de base que de terminaux d'utilisateur.
- On utiliserait la modulation MDP-4 avec un taux de correction d'erreur directe (CED) 3/4. Le seuil de disponibilité serait atteint lorsque le taux d'erreur binaire (TEB) à la sortie du démodulateur tombe à 1×10^{-6} , ce qui correspond à un rapport $C/N = 8,5$ dB. Si l'on tient compte des dégradations dues à la liaison de connexion et aux brouillages causés par la réutilisation des fréquences dont il est question au § 2.1 ($C/I = 16,5$ dB), les valeurs requises de $(C/N)_{\uparrow}$ et $(C/N)_{\downarrow}$ pour le seuil ne devraient pas être inférieures à 9,85 dB.

NOTE 1 – L'utilisation d'un taux CED 1/2, à quoi il convient d'ajouter un codage comme celui de Reed Solomon, permettrait de réduire le rapport C/N requis et par conséquent la p.i.r.e. nécessaire des liaisons montante et descendante ainsi que la puissance primaire du satellite. Le codage turbo est une autre possibilité dont les objectifs sont analogues. Les résultats fondés sur les valeurs de seuil de $(C/N)_{\uparrow}$ et $(C/N)_{\downarrow}$ de 7,0 dB dans l'hypothèse d'un codage plus efficace sont ajoutés aux résultats ci-après.

- Les systèmes prendront en charge des terminaux d'utilisateur équipés d'antennes de 30 cm de diamètre, ce qui devrait contribuer à réduire les prix et faciliterait l'utilisation de terminaux portables. Le gain de l'antenne d'émission aurait alors les valeurs de 30,2 dBi à 12,75 GHz, 31,0 dBi à 14 GHz, 37,2 dBi à 28,45 GHz et 41,7 dBi à 48,2 GHz. Les valeurs du gain de l'antenne de réception seraient de 28,7 dBi à 10,7 GHz, 28,9 dBi à 10,95 GHz, 34,0 dBi à 19,7 GHz et 40,1 dBi à 40 GHz.
- Les valeurs minimales de l'angle d'élévation de fonctionnement seraient de 10° à 11/14 GHz, 17° à 20/30 GHz et 25° à 40/50 GHz.

- Les niveaux de p.i.r.e. seraient fixés de façon à tenir compte des marges ci-après qui visent à compenser les dégradations imputables à l'évanouissement dû à la pluie pendant au moins 99% du temps dans la plupart des climats:

- liaisons montantes: 4,5 dB à 14 GHz, 11 dB à 30 GHz et 21 dB à 50 GHz;
- liaisons descendantes: 3,5 dB à 11 GHz, 7 dB à 20 GHz et 20 dB à 40 GHz.

Dans les bandes des 30 et 50 GHz on utilisera probablement la commande de puissance sur la liaison montante, sauf peut-être dans les climats les plus secs, afin de minimiser le risque de causer des brouillages. Toutefois, il faudrait toujours que les étages de sortie des terminaux d'utilisateur puissent générer une valeur de p.i.r.e. calculée avec une marge, même si le niveau se trouve fortement réduit la plupart du temps. La commande de puissance sur la liaison montante permettrait d'économiser l'autonomie de batterie dans les terminaux portables, mais il convient aussi de maintenir la p.i.r.e. par temps clair à environ 2,5 dB au-dessus du seuil de disponibilité pour garantir un TEB normal d'au moins 1×10^{-9} .

- Les valeurs minimales de gain du faisceau de satellite utilisées dans les calculs étaient de 3 dB inférieures aux valeurs indiquées dans la deuxième rangée du Tableau 2, c'est-à-dire des valeurs en bordure de faisceau.
- La température de bruit sur la liaison montante, compte tenu d'une marge pour le brouillage externe, serait de l'ordre de 800 K dans la bande des 14 GHz, de 1 000 K dans la bande des 30 GHz et de 1 200 K à 50 GHz.
- La température de bruit sur la liaison descendante, compte tenu, ici aussi, d'une marge pour le brouillage externe, serait de l'ordre de 200 K dans la bande des 11 GHz, de 300 K dans la bande des 20 GHz et de 500 K à 40 GHz.
- S'agissant des termes «large bande» et «haut débit» appliqués à l'accès à l'Internet, on suppose qu'un débit binaire d'utilisateur de 2 Mbit/s est appliqué à la fois pour les deux sens de transmission, c'est-à-dire en direction et en provenance du satellite. Pour ce qui est de la modulation MDP-4 avec un taux CED 3/4, et compte tenu d'une marge de filtrage à coupure progressive en cosinus de 50%, la largeur de bande correspondante est de 1,6 MHz par porteuse.

Si l'on transpose ces hypothèses aux équations du bilan de la liaison, on obtient les niveaux de puissance porteuse ci-après qui seront appliqués à l'antenne du terminal d'utilisateur dans des conditions de temps clair (les chiffres entre crochets, {}, correspondent à l'hypothèse précitée d'un codage avec correction d'erreur additionnelle et la largeur de bande associée par porteuse serait alors d'environ 3 MHz).

- Bande des 14 GHz: 14,3 dBW (27 W), ou 12,3 dBW (17 W) si on utilise la commande de puissance sur la liaison montante;
 {11,5 dBW (14 W)} {9,5 dBW (8,8 W)}
- Bande des 30 GHz: 13,6 dBW (23 W), ou 5,1 dBW (3,2 W) si on utilise la commande de puissance sur la liaison montante;
 {10,8 dBW (12 W)} {2,3 dBW (1,7 W)}
- Bande des 50 GHz: 19,2 dBW (83 W), ou 0,7 dBW (1,2 W) si on utilise la commande de puissance sur la liaison montante;
 {16,4 dBW (43 W)} {-2,2 dBW (0,6 W)}

et l'on obtient les niveaux ci-après de puissance porteuse à appliquer à l'antenne d'émission du satellite:

Bande des 11 GHz: 7,3 dBW (5,4 W);
{4,5 dBW (2,8 W)}

Bande des 20 GHz: 4,4 dBW (2,8 W);
{1,6 dBW (1,4 W)}

Bande des 40 GHz: 14,4 dBW (27,5 W);
{11,6 dBW (14,3 W)}.

Puisqu'on suppose que la commande de puissance ne sera pas appliquée sur les liaisons descendantes et que les marges pour la pluie sont toutes sensiblement supérieures à 2,5 dB, le TEB par temps clair sera nettement supérieur à 1×10^{-9} dans la direction qui va de la station centrale vers le terminal d'utilisateur dans les trois bandes de la liaison descendante.

S'il est vrai que les prescriptions de santé publique applicables aux équipements d'utilisateur sortent du domaine de compétence de l'UIT, il est important que les planificateurs de systèmes tiennent compte des niveaux de protection contre les rayonnements qui ont été fixés sur les plans national et international ainsi que des lignes directrices visant à assurer le respect de ces niveaux, en particulier dans le cas d'un déploiement ubiquitaire.

2.3 Capacité par satellite (C_s)

NOTE 1 – Les résultats exposés dans le présent paragraphe, ainsi qu'au § 3, ont été calculés pour des porteuses MDP-4 avec un codage au taux 3/4. On trouvera à la fin du présent paragraphe, ainsi qu'à la fin du § 3, des résultats approximatifs correspondants fondés sur un codage plus efficace, comme mentionné au § 2.2.

Dans de nombreux satellites de télécommunication, la puissance de sortie d'un répéteur est d'environ 40 W au point de saturation d'une seule porteuse, bien que des satellites équipés de répéteurs plus puissants aient été construits pour des applications spécifiques. Un certain nombre de satellites sur orbite fonctionnent dans les bandes 14/11 GHz avec des répéteurs d'une puissance comprise entre 90 et 120 W. En mode multiporteuse, il est nécessaire d'appliquer une réduction d'environ 4 dB à la sortie afin de maintenir les effets de l'intermodulation à un niveau suffisamment faible au-dessous de la valeur de dégradation due à la réutilisation des fréquences, ce qui ramène la puissance de sortie utilisable à environ 16 W. Conformément aux valeurs de puissance de sortie par porteuse de l'émetteur de satellite obtenues au § 2.2, il serait possible d'utiliser un très petit nombre de porteuses (chacune ayant une largeur de bande de 1,6 MHz) par répéteur. Le grand nombre de répéteurs qui s'avérera donc nécessaire pour utiliser entièrement une bande de 500 MHz entraînera une charge utile non optimale de sorte qu'il y a lieu de supposer que des répéteurs de plus grande puissance seront utilisés, pour la présente application. On supposera donc que la puissance de sortie des répéteurs est de 100 W au niveau de saturation, c'est-à-dire 40 W pour une réduction de puissance à la sortie de 4 dB, pour les satellites dans les bandes 11/14 GHz et 20/30 GHz. Dans le cas du satellite à 40/50 GHz, la capacité du répéteur est de 500 W au niveau de saturation, c'est-à-dire 200 W après réduction de puissance à la sortie – étant donné qu'il faut tenir compte d'une marge importante contre les évanouissements sur la liaison descendante. Il convient de noter qu'il est possible de remédier aux évanouissements par d'autres moyens qu'en produisant une p.i.r.e. élevée – par exemple, grâce au codage adaptable – et il est possible que d'autres études préconisent le recours à des répéteurs de faible puissance, l'objectif étant de limiter la puissance nécessaire à la fois dans le terminal d'utilisateur et dans le satellite. Cette question semblerait prioritaire pour le cas de la bande 40/50 GHz, car s'il est vrai que des émetteurs de satellite à 100 W fonctionnent actuellement dans les bandes des 11 GHz et 20 GHz, les émetteurs à 500 W, susceptibles de fonctionner à 40 GHz, ne sont pas encore réalisables dans la pratique.

Dans le cas d'un satellite fonctionnant à 20/30 GHz, le nombre de porteuses de 2 Mbit/s pouvant être transmises par un répéteur est donc de $40/2,8 = 14$. En admettant que la bande de garde entre les porteuses soit de 10%, la largeur de bande requise du répéteur se calcule donc comme suit: $1,6 \times 1,1 \times 14 = 24,6$ MHz, d'où un espacement de 25 MHz entre les répéteurs adjacents. On peut donc connecter cinq répéteurs à chaque faisceau de satellite, ce qui donne une largeur de bande totale de 125 MHz par faisceau et de 500 MHz pour les quatre faisceaux. Ces paramètres sont compatibles avec le diagramme de réutilisation à 4 fréquences de la Fig. 1. La capacité totale d'un tel satellite peut être calculée comme suit:

$$\text{Capacité} = (2 \text{ Mbit/s par porteuse}) \times (14 \text{ porteuses par répéteur}) \times (2 \text{ polarisations}) \\ \times (5 \text{ répéteurs par polarisation et par faisceau}) \times (32 \text{ faisceaux}) = 8\,960 \text{ Mbit/s}$$

De même, d'après les calculs, la capacité du satellite fonctionnant à 11/14 GHz est de 3 024 Mbit/s et de 16 128 Mbit/s pour le satellite fonctionnant à 40/50 GHz. La configuration du répéteur et celle des faisceaux telles qu'elles ont été élaborées plus haut pour un satellite dans chacune des trois bandes sont représentées sur les Fig. 3, 4 et 5.

Il convient de noter que le nombre de répéteurs par satellite est élevé. Le satellite fonctionnant à 11/14 GHz compterait 216 répéteurs, ce qui peut être réalisable avec des étages de sortie à semi-conducteurs et la puissance primaire nécessaire serait de l'ordre de 54 kW. Pour le satellite fonctionnant à 20/30 GHz, les chiffres correspondants seraient de 320 répéteurs et 80 kW et pour le satellite à 40/50 GHz, pas moins de 1 152 répéteurs et 1,44 MW. Les engins spatiaux à 11/14 GHz et 20/30 GHz auraient de grandes dimensions et seraient relativement coûteux³ et dans chaque cas il convient d'envisager la possibilité de diviser la couverture entre deux satellites ou plus occupant la même position nominale, chacun d'eux possédant proportionnellement moins de faisceaux et de répéteurs mais aussi une puissance primaire plus réduite. Cette option semble inévitable dans le cas des bandes 40/50 GHz où il faudrait diviser la couverture entre quelque 20 satellites plus petits, uniquement pour réduire la taille et la puissance de chacun d'eux à un seul satellite fonctionnant à 11/14 GHz ou 20/30 GHz.

NOTE 1 – Dans l'hypothèse d'un codage avec correction d'erreur plus efficace, il se peut que la configuration du répéteur soit différente des configurations représentées sur les Fig. 3, 4 et 5 du fait que la largeur de bande par porteuse sera plus grande, mais aux fins de comparaison avec ce qui précède, les paramètres essentiels seraient approximativement les suivants:

Capacité par satellite:

11/14 GHz – 1 612 Mbit/s; 20/30 GHz – 4 778 Mbit/s; 40/50 GHz – 8 600 Mbit/s

Puissance primaire du satellite:

11/14 GHz – 29 kW; 20/30 GHz – 43 kW; 40/50 GHz – 770 kW.

En ce qui concerne la puissance primaire du satellite, il y a lieu de signaler que la valeur maximale applicable aux plates-formes conçues à ce jour est de 20 kW, si bien qu'il est intéressant d'étudier les moyens de réduire cette valeur. A cet égard, il convient d'envisager la possibilité de conserver la technique AMRF sur les liaisons montantes mais d'employer la technique AMRT sur les liaisons descendantes, ce qui permettrait d'éviter de devoir réduire la puissance du répéteur et par conséquent de réduire la puissance primaire nécessaire du satellite de 4 dB.

³ Le coût de la construction et du lancement d'un grand satellite qui soit concrètement réalisable s'élève à plusieurs centaines de millions USD (en 2006).

FIGURE 3

Configurations du répéteur et des faisceaux pour un satellite du SFS à 11/14 GHz conçu pour fournir un accès à l'Internet à haut débit

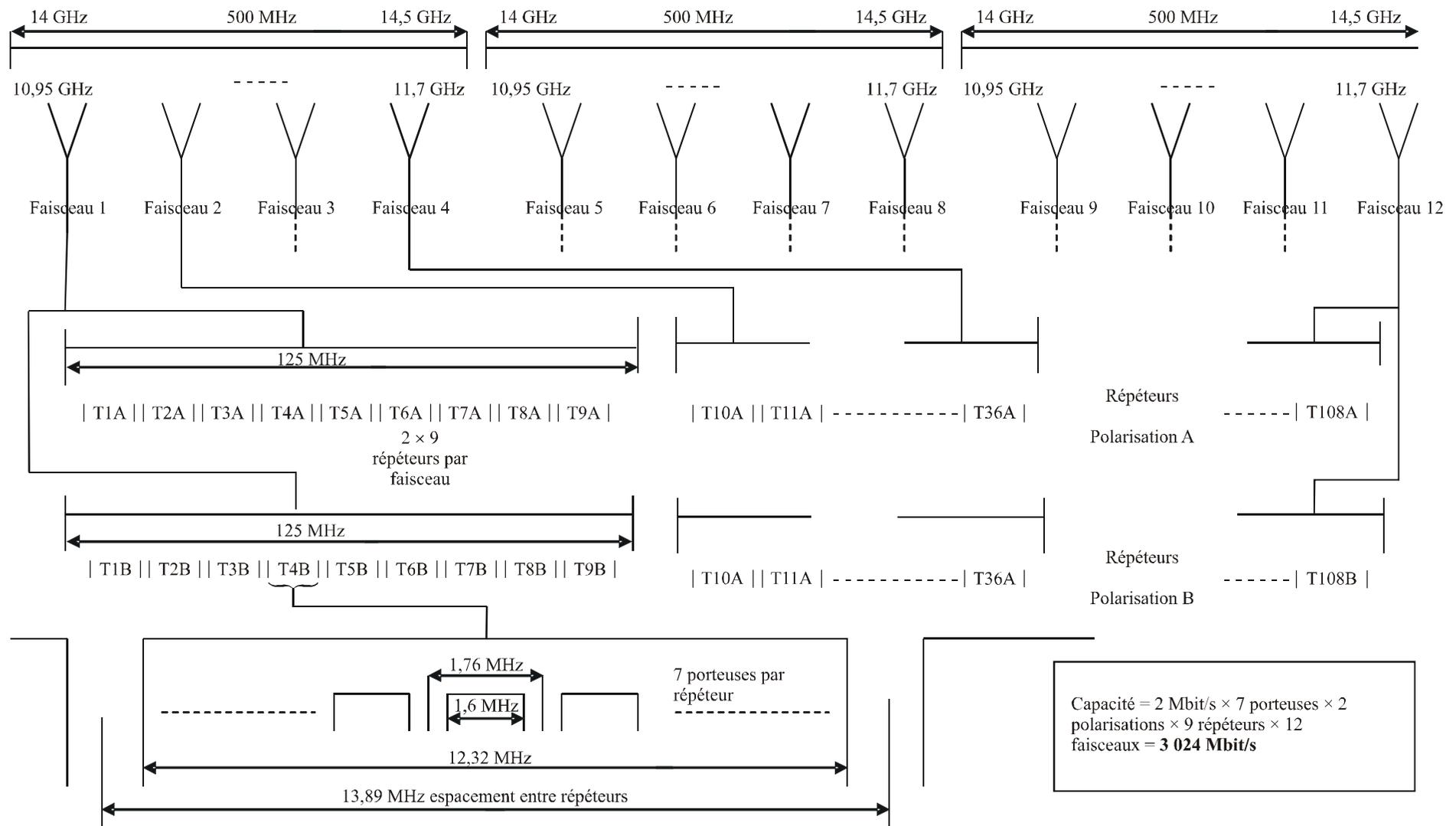


FIGURE 4

Configurations du répéteur et des faisceaux pour un satellite du SFS à 20/30 GHz conçu pour fournir un accès à l'Internet à haut débit

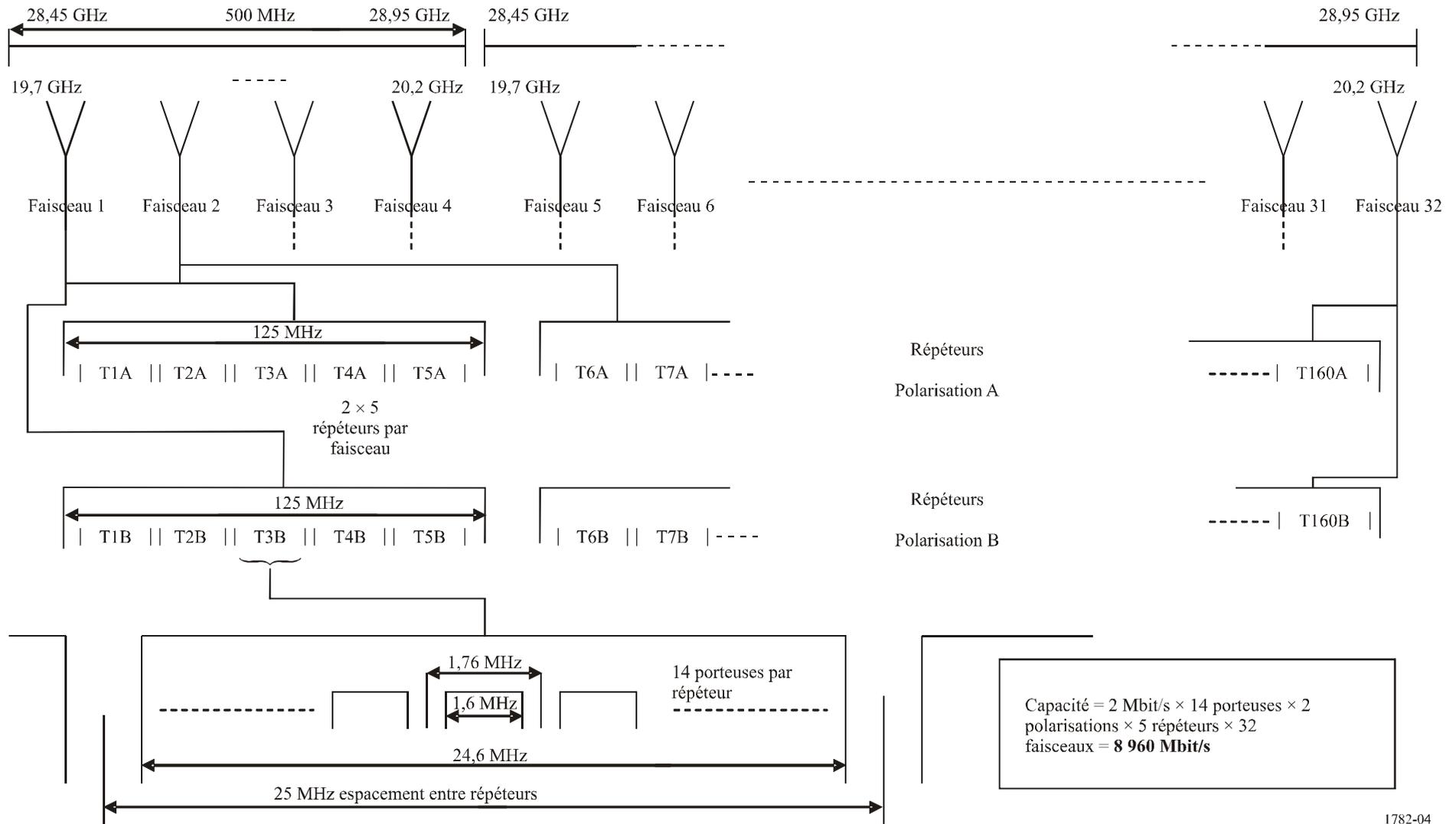
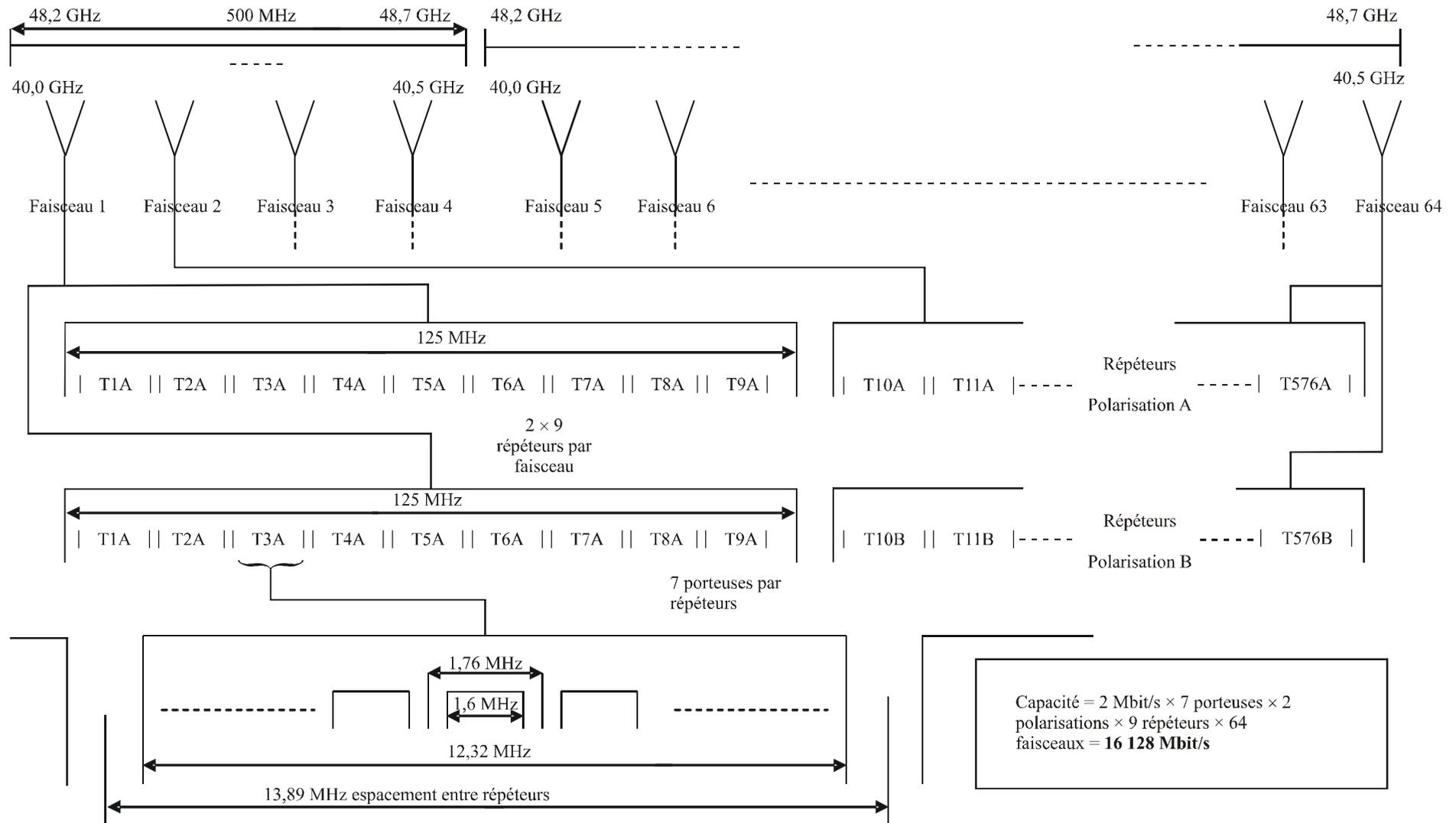


FIGURE 5

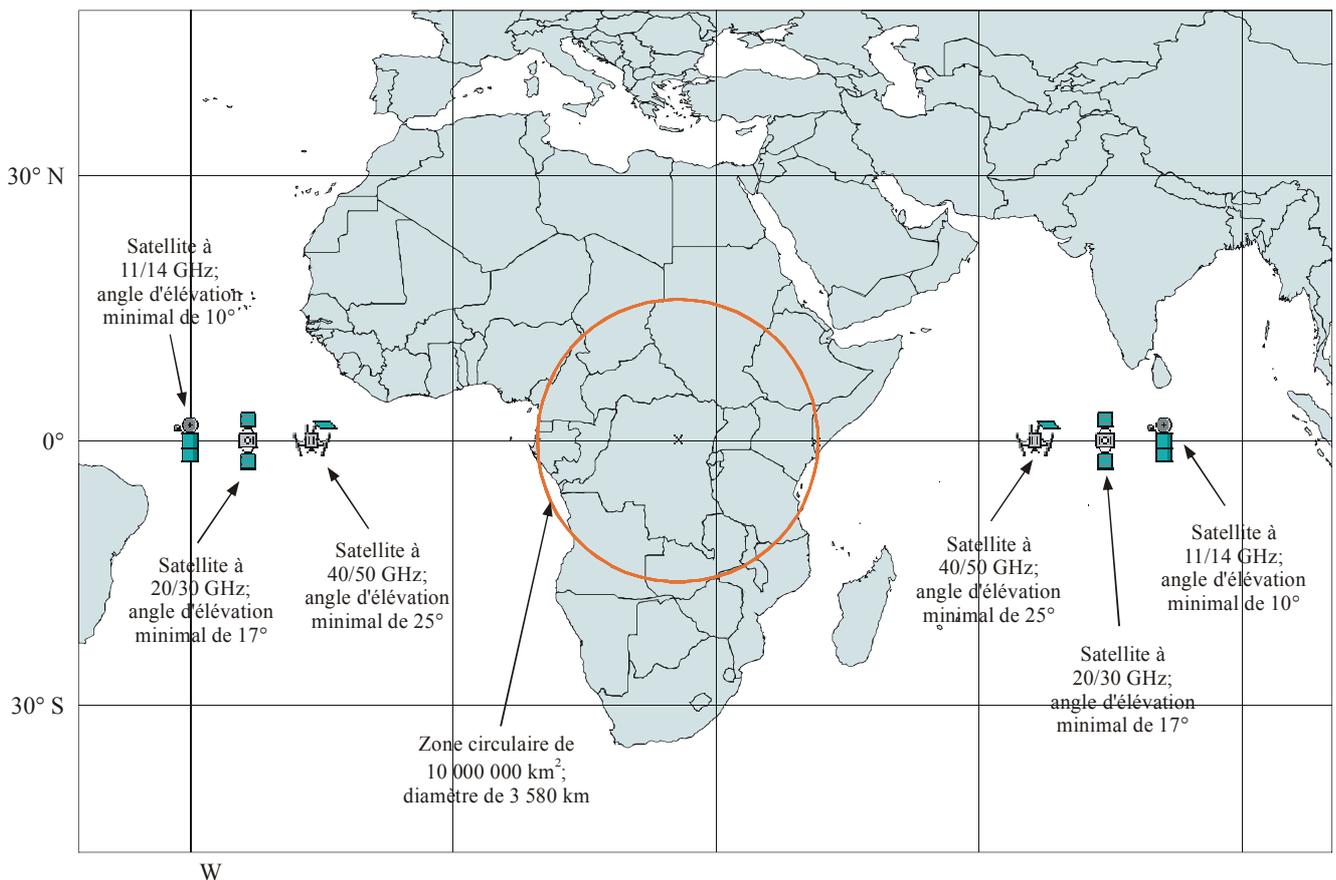
Configurations du répéteur et des faisceaux pour un satellite du SFS à 40/50 GHz conçu pour fournir un accès à l'Internet à haut débit



3 Capacité totale potentielle (C_T)

Pour pouvoir exprimer la capacité totale qu'ont les satellites du SFS dans une bande donnée de fournir un accès à l'Internet large bande, il faut définir la zone géographique concernée. Les différentes options possibles sont toute la surface de la Terre, la totalité de la zone terrestre de la surface de la Terre, la surface de la Terre entre des latitudes données (par exemple, entre 60° N et 60° S), la zone terrestre entre des latitudes données, la zone terrestre dans laquelle la densité de population est supérieure à un niveau minimal spécifié et différents exemples de zones ayant des tailles et des latitudes données. Pour déterminer l'option la plus significative, il est suggéré de mener des études et d'organiser des débats sur la question. Pour les besoins de la présente étude préliminaire, une zone circulaire de 10 000 000 de km^2 , centrée sur l'Equateur a été choisie. La Fig. 6 donne un exemple de cette zone située en Afrique centrale, mais les résultats seraient identiques pour toute autre position au niveau de l'Equateur.

FIGURE 6

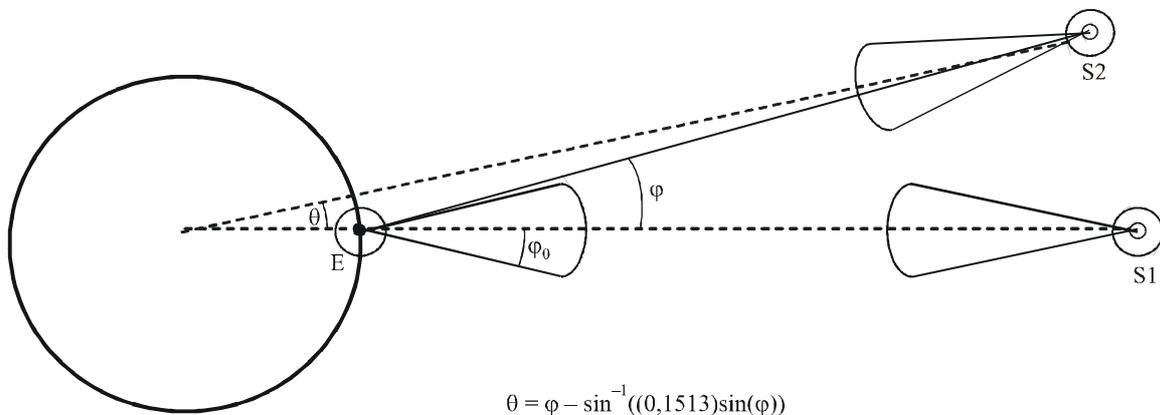
Exemple de zone équatoriale de 10 millions de km^2 

Etant donné que les angles d'élévation minimaux sont différents dans les trois bandes de fréquences, les intervalles de longitude dans lesquels un satellite géostationnaire pourrait desservir la zone de référence sont eux aussi différents. Ces intervalles sont indiqués sur la Fig. 6 et ont les valeurs numériques suivantes :

- pour 11/14 GHz, de 30,1° W à 81,0° E, un intervalle de longitude de 111,1°;
- pour 20/30 GHz, de 23,4° W à 74,3° E, un intervalle de longitude de 97,7°, et
- pour 40/50 GHz, de 15,8° W à 66,7° E, un intervalle de longitude de 82,5°.

Le nombre de satellites présents dans ces intervalles qui pourraient desservir la zone en utilisant les mêmes fréquences et configurations de faisceau dépend de l'espacement minimal entre les satellites adjacents, ce qui dépend à son tour du niveau acceptable de brouillage causé aux liaisons montantes et descendantes d'un seul satellite par ses satellites avoisinants. Afin de ne pas affecter sensiblement les rapports C/N totaux, calculés au § 3.2, le rapport porteuse/brouillage entre les deux satellites adjacents devrait avoir une valeur minimale d'environ 20 dB, si bien que le rapport porteuse/brouillage pour chacun de ces satellites ($(C/I)_{ADJ}$) devrait être d'au moins 23 dB. Comme indiqué à la Fig. 7, le niveau de brouillage est déterminé essentiellement par la discrimination fournie par les diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception du terminal d'utilisateur et leur taux de décroissance dans d'autres satellites que ceux des deux engins spatiaux adjacents a un effet négligeable (dans l'hypothèse d'un espacement toujours identique).

FIGURE 7

Brouillage entre satellites adjacents

1782-07

E représente une station terrienne d'utilisateur fonctionnant avec le satellite S1, et E-S2 le trajet de brouillage à destination et en provenance du satellite adjacent S2. Etant donné que les deux satellites S1 et S2 desservent la même zone, aucun diagramme de rayonnement de leur antenne ne fournit une discrimination significative dans la direction du trajet de brouillage. Le brouillage causé par E à S2 se produit au point φ° par rapport à l'axe de l'antenne au point E et le brouillage reçu par E en provenance de S2 se produit également au niveau de cet angle hors axe. Comme cette étude utilise un type unique de porteuse, les p.i.r.e. des stations terriennes «utile» et «brouilleuse» sont les mêmes, tout comme les p.i.r.e. des satellites «utile» et «brouilleur». Par conséquent, s'agissant aussi bien du cas de la liaison montante que de la liaison descendante, on obtient l'expression suivante:

$$(C/I)_{ADJ} = G_M - G(\varphi)$$

où:

G_M : gain sur l'axe de l'antenne au point E

$G(\varphi)$: gain dans la direction du brouillage.

Si l'on conserve l'hypothèse antérieure d'un diamètre d'antenne de 30 cm pour le terminal d'utilisateur, les ouvertures de faisceau (φ_0) correspondant à la fréquence la plus basse dans chacune des bandes sélectionnées sont calculées au Tableau 6.

TABLEAU 6

Nombre maximal de satellites de même couverture et fonctionnant à la même fréquence ($\varphi_0 = 70.\lambda/D$)

Fréquence (GHz)	10,95	14,0	19,7	28,45	40,0	48,2
Ouverture de faisceau (φ_0°)	6,39	5,0	3,55	2,46	1,75	1,45
φ_{min} (degrés)	8,84	6,92	4,91	3,40	2,42	2,01
θ_{min} (degrés)	7,51	5,88	4,17	2,89	2,05	1,71
N	14	18	23	33	40	48

Dans l'hypothèse d'une décroissance dans le faisceau principal exprimée par une loi quadratique, $G(\varphi) = G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2$ dBi, la discrimination minimale nécessaire se produit lorsque $G_M - (G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2) = 23$ dB, c'est-à-dire lorsque $12(\varphi/\varphi_0)^2 = 23$ dB. Si l'on pose $\varphi = 1,384\varphi_0$ pour l'espacement angulaire minimal entre les satellites, ces angles sont alors exprimés par φ_{min} dans la troisième rangée du Tableau 6. Les valeurs correspondantes de θ sont indiquées dans la quatrième rangée. Sachant qu'un espacement angulaire de 3° entre les satellites (ou 2° en Région 2) est généralement adopté pour les réseaux conventionnels du SFS fonctionnant dans les bandes 11/14 GHz, les valeurs de θ_{min} au Tableau 6 indiquent qu'il sera probablement difficile de réaliser un partage avec les systèmes existants dans ces bandes. Pour ce qui est des bandes 20/30 GHz, les valeurs de θ_{min} sont également incompatibles avec l'espacement visé de 3° ou 2° mais il convient de signaler au moins qu'il n'existe actuellement qu'un petit nombre de satellites, si bien que les problèmes de partage sont en grande partie hypothétiques. En général, les valeurs de θ_{min} indiquent que l'utilisation de petites antennes dans les terminaux d'utilisateur limite l'efficacité de la ressource orbite/spectre.

Si l'on divise les intervalles de longitude indiquées à la Fig. 6 par θ_{min} , on obtient le nombre de satellites fonctionnant à la même fréquence qui peuvent desservir la zone de référence dans chacune des bandes choisies de 500 MHz; le nombre de ces satellites est indiqué à la cinquième rangée du tableau en regard de « N ». Etant donné que la présente étude tient uniquement compte des connexions bidirectionnelles, les valeurs de N applicables au cas considéré sont déterminées par les fréquences de la liaison descendante et sont indiquées en caractères gras dans le Tableau 6.

La zone hexagonale, A , située à l'intérieur de l'empreinte d'un seul faisceau de satellite peut être déduite de la géométrie représentée sur les Fig. 1 et 2 et a pour expression $A = 211\,375\,383(1 - \cos(d/222,63))$ km², où d est le diamètre de l'empreinte (km) comme indiqué à la Fig. 2. Les valeurs de A à utiliser ici sont donc les suivantes:

$$A = 497\,683,88 \text{ km}^2 \text{ pour } 11/14 \text{ GHz, } 91\,238,83 \text{ km}^2 \text{ pour } 20/30 \text{ GHz et } 22\,810,94 \text{ km}^2 \text{ pour } 40/50 \text{ GHz}$$

En multipliant ces empreintes par le nombre, n , de faisceaux par satellite indiqué au Tableau 5, puis en rapportant les résultats à la zone de référence illustrée par la Fig. 6, on obtient le nombre de satellites des types décrits au § 3 qui peuvent desservir la zone de référence à partir d'un seul emplacement OSG. Il ne s'agira pas nécessairement de nombres entiers car il se peut qu'il existe des faisceaux dont les empreintes se situent en dehors de la zone de référence et ils représentent des fractions de la capacité par satellite qui ne sont pas disponibles aux utilisateurs dans la zone de référence. La capacité totale, C_T , pour la zone de référence s'exprime donc comme suit:

$$C_T = N.C_S.(10\ 000\ 000)/(A.n) \text{ Mbit/s}$$

où C_S est la capacité par satellite comme indiqué au § 3.

Par conséquent, les valeurs de C_T pour les connexions bidirectionnelles dans les bandes choisies de 500 MHz sont approximativement les suivantes:

10,95-11,2 GHz + 11,45-11,7 GHz sur la liaison descendante et 14,00-14,50 GHz sur la liaison montante – **71 {38} Gbit/s;**

19,7-20,2 GHz sur la liaison descendante et 28,45-28,95 GHz sur la liaison montante – **706 {380} Gbit/s;**

40,0-40,5 GHz sur la liaison descendante et 48,20-48,70 GHz sur la liaison montante – **4 400 {2 400} Gbit/s.**

NOTE 1 – Les chiffres indiqués entre crochets correspondent à l'hypothèse d'un codage avec correction d'erreur plus efficace.

Compte tenu des coûts qui caractérisent la construction et le lancement d'un grand satellite, il est évident qu'il serait très coûteux de proposer des capacités de cet ordre. Toutefois, le marché potentiel de l'accès à l'Internet au niveau mondial à haut débit est proportionnellement très important.

Ces capacités concernent une utilisation continue et, dans l'hypothèse d'un débit d'utilisateur de 2 Mbit/s, le nombre maximal de connexions bidirectionnelles simultanées correspond à la moitié de la capacité dans chaque paire de bandes. Si les différentes porteuses sont attribuées de manière dynamique en fonction de la «demande», le nombre d'utilisateurs dépassera le nombre de porteuses disponibles en proportion inverse du facteur d'activité moyenne de l'utilisateur.

Les capacités par satellite indiquées au § 2.3, et par conséquent les capacités totales indiquées dans le présent paragraphe ont été calculées dans le cas d'un accès à l'Internet assuré par des terminaux d'utilisateur avec antennes de 30 cm. Des résultats différents auraient été obtenus avec un diamètre plus large mais pour ces calculs il aurait fallu décider en premier lieu de la nécessité éventuelle de modifier d'autres hypothèses en plus du diamètre d'antenne du terminal d'utilisateur. Si toutes les autres hypothèses restent les mêmes et que l'on porte le diamètre d'antenne à 60 cm, par exemple, il serait possible de supprimer le codage de taux CED 3/4 et le débit binaire d'utilisateur atteindrait alors environ 2 560 kbit/s, ce qui permettrait d'augmenter de 28% la capacité par satellite et la capacité totale de la zone serait multipliée par un facteur d'environ 2,5. Toutefois, selon la taille d'antenne choisie, il pourrait sembler approprié de renoncer à une partie ou à la totalité de l'augmentation de la capacité afin de réduire la puissance d'émission du terminal d'utilisateur et/ou la puissance primaire du satellite. Autre possibilité serait d'utiliser une partie ou la totalité de l'augmentation du gain d'antenne du terminal d'utilisateur pour réduire proportionnellement le gain par faisceau de satellite, ce qui permettrait d'augmenter l'ouverture de faisceau de chaque satellite et de couvrir la même zone avec moins de faisceaux. Il est évident que pour évaluer la capacité dans le cas d'une antenne plus grande de terminal d'utilisateur, il convient d'appliquer une série d'hypothèses en rapport avec le cas considéré.

4 Conclusions

La présente Annexe, outre qu'elle décrit les caractéristiques fondamentales d'un type de système du SFS conçu pour fournir un accès à l'Internet large bande au niveau mondial, donne des estimations générales sur la capacité globale pouvant être offerte par ces systèmes. Etant donné qu'il est important de prévoir une certaine latitude pour affiner l'analyse et l'adapter aux différentes conditions géographiques et situations du marché, il ne serait semble-t-il pas indiqué d'inclure dans le RR les caractéristiques de systèmes conçus pour fournir un accès à l'Internet large bande par satellite; par ailleurs, la présente Recommandation devrait être révisée de temps à autre, compte tenu des progrès réalisés sur le sujet.

Annexe 2

Possibilités de fournir un accès à l'Internet large bande au niveau mondial à l'aide de systèmes du SFS conçus pour des stations terriennes équipées d'antennes plus grandes

1 Généralités

L'architecture du système décrite dans l'Annexe 1 a été en grande partie dictée par le choix d'antennes de 30 cm de diamètre pour les stations terriennes d'utilisateur, qui correspondent à la catégorie des «nanostations» ou USAT. En supposant que des antennes plus grandes soient utilisées, il est possible de répondre à la nécessité de fournir un accès à l'Internet large bande par satellite (sauf en ce qui concerne la portabilité des terminaux) à l'aide de diverses architectures de système. A noter qu'un seul exemple est présenté ici.

S'agissant de l'accès à l'Internet large bande, on trouvera au § 1 de l'Annexe 1 une analyse concernant les différentes bandes les plus appropriées qui sont attribuées au SFS jusqu'à 50 GHz, analyse qu'il n'y a pas lieu de répéter ici. A partir de cette analyse, les paramètres définis dans la présente Annexe s'appliquent uniquement aux bandes du SFS à 20/30 GHz et 11/14 GHz et la même architecture de système est utilisée dans les deux cas.

Bien que la taille de l'antenne du terminal d'utilisateur soit moins importante par rapport à la conception systématique pour des terminaux autres que les USAT, elle reste néanmoins déterminante de sorte qu'il convient, pour les besoins de la présente Annexe, de choisir une taille susceptible de s'adresser à un large public. Dans les réponses fournies au questionnaire envoyé par le Bureau des radiocommunications en 1998, qui s'appliquait à des stations terriennes fonctionnant à 20/30 GHz avec des antennes dont le diamètre était compris entre 0,3 et 7,6 m, le diamètre le plus souvent cité était de 1,2 m. Dans les réponses au même questionnaire concernant les stations terriennes à 11/14 GHz avec des antennes de diamètre compris entre 0,4 et 18,0 m, le diamètre le plus souvent cité était également de 1,2 m. Ce chiffre a donc été choisi pour le présent exemple, sachant que les stations terriennes utilisant des antennes de cette taille sont souvent désignées par le terme de «microstations» (VSAT).

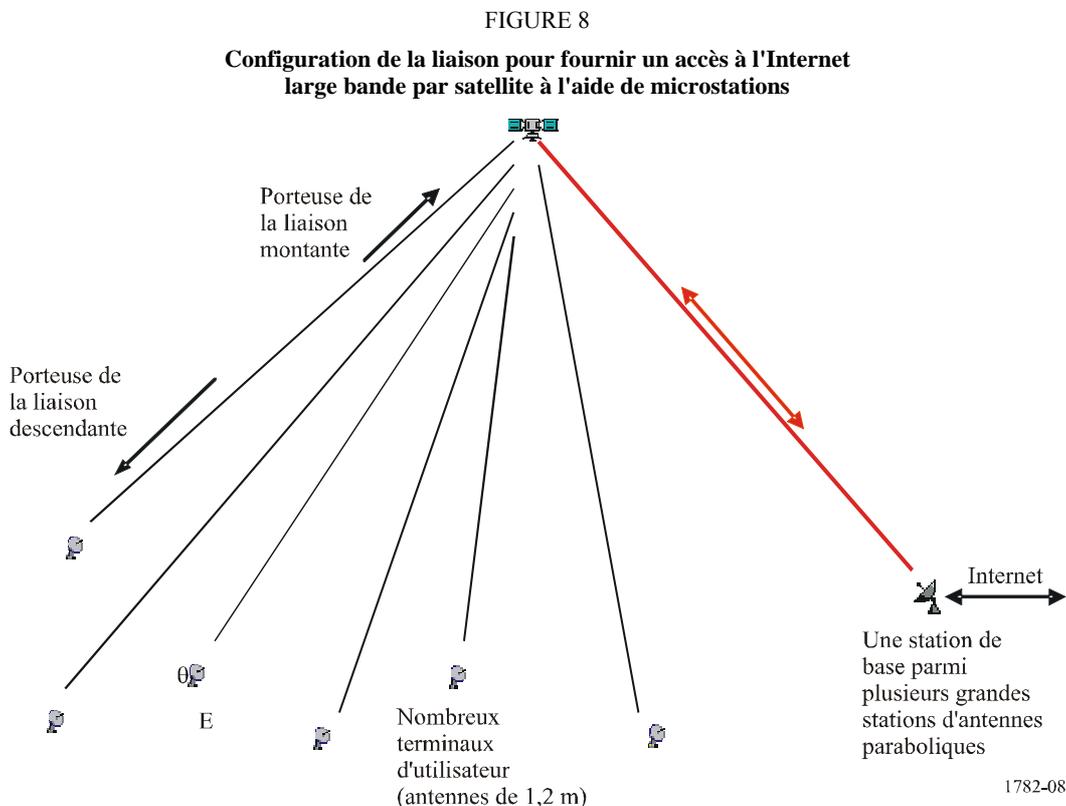
Tout comme dans l'Annexe 1, l'objectif visé est d'obtenir un débit binaire de 2 Mbit/s pour les communications en provenance et à destination des utilisateurs. La méthode d'accès choisie ici pour chaque répéteur de satellite est la technique AMRF et la méthode de modulation, la MDP-4. On suppose en outre l'utilisation d'un codage de taux CED 1/2 pour permettre une utilisation raisonnablement efficace de la puissance de sortie du répéteur.

2 Architecture du système

De nouveau, tout comme dans l'Annexe 1, le présent exemple est fondé sur une configuration en «étoile» dans laquelle l'accès à un certain nombre de stations terriennes d'utilisateur est assuré via des liaisons par satellite vers une seule station terrienne «centrale» reliée à l'Internet. Pour minimiser l'incidence de la liaison entre le satellite et la station centrale sur la qualité de fonctionnement du rapport C/N des porteuses sortantes et entrantes, on suppose que l'antenne de la station centrale est grande (diamètre de 7,6 m). La configuration de la liaison est représentée sur la Fig. 8.

Dans cet exemple, les satellites utilisent une portion de 500 MHz dans les deux sens de transmission et les bandes sont les mêmes qu'avant, à savoir:

- système à 20/30 GHz – 19,7-20,2 GHz espace vers Terre et 28,45-28,95 GHz Terre vers espace;
- système à 11/14 GHz – 10,95-11,2 GHz et 11,45-11,7 GHz espace vers Terre; et
- 14,0-14,5 GHz Terre vers espace.



3 Couverture

Dans le cas de la modulation MDP-4 avec un taux CED 1/2, il faut un rapport C/N d'environ 7,5 dB à l'entrée d'un démodulateur/décodeur type pour obtenir un TEB de 1×10^{-6} dans le flux binaire sortant, ce qui peut être considéré comme seuil de disponibilité pour la présente application. Tout comme dans l'Annexe 1, on suppose que cette valeur du TEB devrait être atteinte pendant au moins 99% du temps dans la plupart des climats, ce qui signifie que la liaison entre l'utilisateur et le satellite devrait être conçue de façon à tenir compte d'évanouissements dus à la pluie d'environ 11 dB à 30 GHz, de 7 dB à 20 GHz, de 4,5 dB à 14 GHz et de 3,5 dB à 11 GHz, à condition que l'angle d'élévation minimal soit de 17° pour le système fonctionnant à 20/30 GHz et à 10° pour le système fonctionnant à 11/14 GHz. Actuellement, de nombreux satellites disposent de répéteurs qui produisent chacun une puissance de sortie de 40 W au niveau de saturation d'une seule porteuse. Compte tenu de tous ces facteurs et d'un diamètre d'antenne d'utilisateur de 1,2 m, sans compter les marges appropriées à appliquer pour tenir compte du bruit et des brouillages de sources interne et externe, on a constaté d'après les calculs réalisés sur la liaison qu'il serait nécessaire d'avoir un faisceau d'antenne dont l'ouverture à mi-puissance est d'environ 2° . Comme on peut le voir d'après les Tableaux 3 et 4, cette valeur peut parfaitement être obtenue grâce aux capacités offertes par la technologie actuelle.

La Fig. 9 montre qu'une zone continue, dont la taille est presque égale à la zone de référence circulaire de 10 000 000 de km² dont il est question dans l'Annexe 1 (voir la Fig. 6) serait desservie par huit faisceaux circulaires (A à H), chacun ayant une ouverture de faisceau de 2° , disposés de telle façon que leurs limites de chevauchement forment une grille d'hexagones entrelacés. D'après le § 2.1 de l'Annexe 1, la réutilisation des fréquences à raison d'un faisceau sur quatre permet d'obtenir un rapport C/I minimal d'au moins 16,5 dB pour les brouillages multifaisceaux.

4 Configuration de la charge utile du satellite

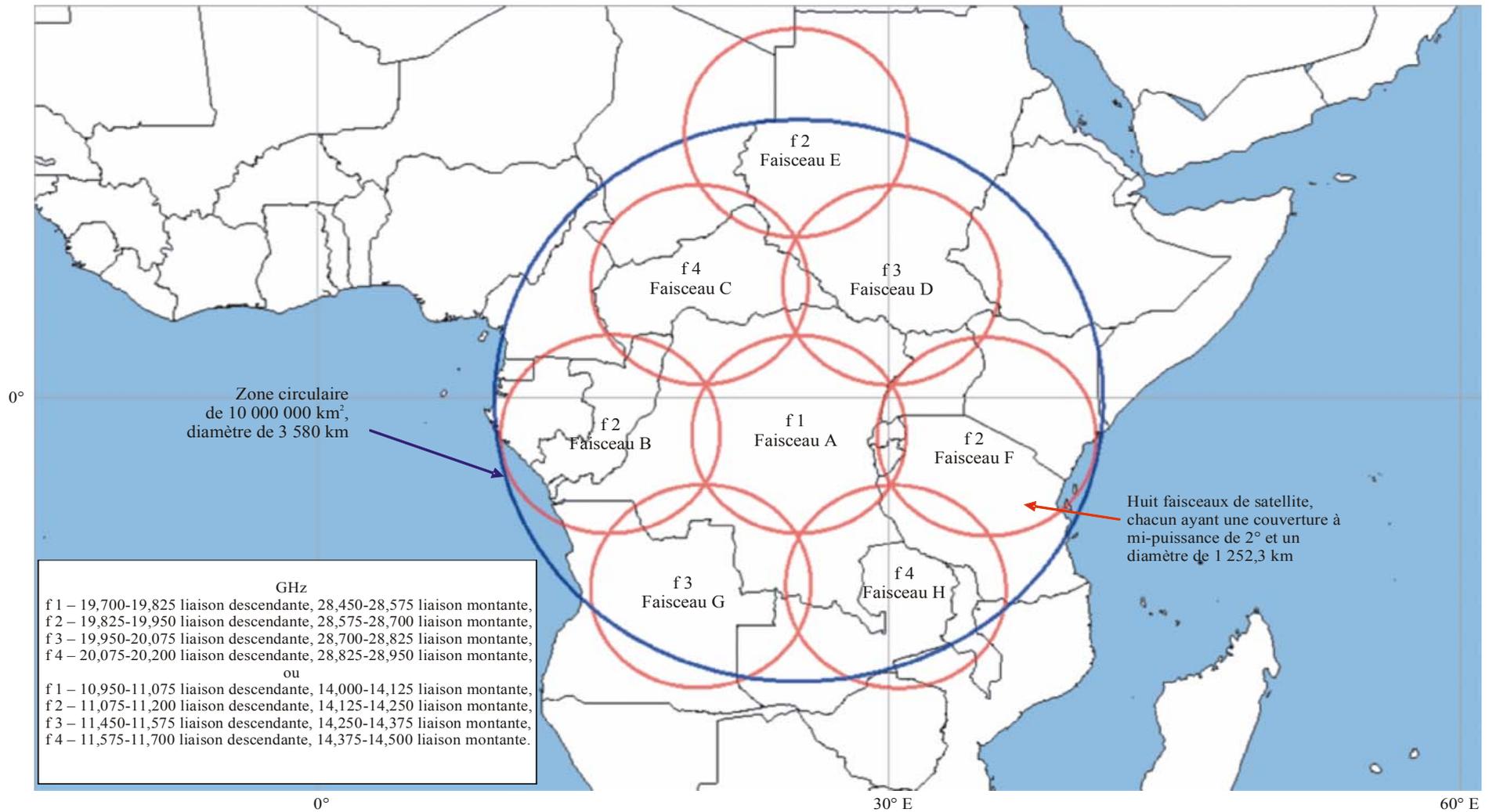
Sur la base des paramètres pris pour hypothèse dans les paragraphes précédents de la présente Annexe, on a élaboré une configuration appropriée du répéteur qui utilise au mieux la puissance et la largeur de bande (voir la Fig. 10). La largeur de bande de chaque porteuse est donnée par la formule suivante:

$$\{2 \text{ (Mbit/s débit binaire)}/2 \text{ (MDP-4)}\} \times 2/1 \text{ (taux de CED 1/2)} \\ \times 1,2 \text{ (mise en forme du spectre)} = 2,4 \text{ MHz}$$

Si l'on tient compte d'une largeur de bande de 18% du répéteur pour les bandes de garde entre les porteuses, cette valeur correspond à un espacement entre les porteuses de 2,84 MHz. Cette marge relativement généreuse est compatible avec le fonctionnement de 10 porteuses dans une largeur de bande de 28,4 MHz du répéteur et se traduit par une utilisation optimale de la puissance de sortie du répéteur comme cela est indiqué plus loin. Si l'on ajoute une marge supplémentaire de 10% pour les bandes de garde entre les répéteurs, on obtient un espacement entre eux de 31,25 MHz, ce qui permet à quatre répéteurs de fonctionner dans une portion de 125 MHz – soit le quart de la largeur de bande du satellite. Par conséquent, chacun des huit faisceaux dont les empreintes à mi-puissance sont représentées sur la Fig. 9 peut accueillir quatre répéteurs sur les deux polarisations (rectiligne double ou circulaire lévogyre ou dextrogyre). On obtient donc au total 64 répéteurs.

FIGURE 9

Exemple de configuration de faisceaux de satellite pour fournir un accès à l'Internet large bande par satellite à l'aide de stations d'utilisateur équipées d'antennes de 1,2 m de diamètre



5 Bilans de la liaison

Pour une liaison montante ou descendante entre une station terrienne et un satellite, la relation est la suivante:

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ dB} \quad (1)$$

où:

P_T : puissance fournie à l'antenne d'émission (dBW)

G_T : gain de l'antenne d'émission (dBi)

d : longueur du trajet entre la station terrienne et le satellite (m)

f : fréquence (Hz)

F : marge (dB) pour compenser les évanouissements pendant le pourcentage de temps spécifié

G_R : gain de l'antenne de réception (dBi)

B : largeur de bande de la porteuse (Hz)

T : température de bruit de la liaison (K)

C/N (dB): rapport obtenu au niveau du récepteur pour atteindre le seuil de disponibilité du TEB.

Pour tenir compte de la dégradation de la qualité de fonctionnement due au bruit thermique sur la liaison entre le satellite et la station centrale, à la réutilisation des fréquences multifaisceaux, au brouillage par polarisations croisées, à l'intermodulation dans le satellite et au brouillage causé par des sources externes, il faut que le rapport porteuse/bruit thermique sur la liaison montante et sur la liaison descendante entre le satellite et le terminal d'utilisateur soit d'au moins 8,5 dB. Il convient de noter que le rapport C/I correspond à ces dégradations combinées qui se traduirait par un rapport total $C/(N + I)$ de 7,5 dB (correspondant au seuil de disponibilité) est de 14,4 dB et que la somme de la réutilisation des fréquences et des brouillages par polarisations croisées ($C/I > 16,5$ dB), de l'intermodulation ($C/I > 23$ dB), du bruit de la liaison avec la station de base ($C/I > 24$ dB) et du brouillage externe ($C/I > 23$ dB) ne sera probablement pas plus grande que cette valeur (c'est-à-dire $> 14,39$ dB).

Par conséquent:

Liaison montante depuis la station terrienne d'utilisateur dans la bande des 30 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (1), où:

$P_T = 11,3$ dBW (13,5 W) (et environ 3 dBW par temps clair avec commande de puissance sur la liaison montante)

$G_T = 49,19$ dBi (antenne de 1,2 m à 28,45 GHz)

$d \leq 39\,853\,746$ m (angle d'élévation minimal de 17°)

$f = 28\,450\,000\,000$ Hz

$F = 11$ dB (évanouissement $< 1\%$ du temps)

$G_R = 37,7$ dBi (limite à mi-puissance du faisceau de satellite de 2°)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 1\,000$ K, et par conséquent

$C/N = 8,5$ dB.

Liaison montante depuis la station terrienne d'utilisateur dans la bande des 14 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (1), où:

$P_T = 3,95$ dBW (2,5 W) (et environ 2 dBW par temps clair avec commande de puissance sur la liaison montante)

$G_T = 43,19$ dBi (antenne de 1,2 m à 14,25 GHz)

$d \leq 40\,583\,982$ m (angle d'élévation minimal de 10°)

$f = 14\,250\,000\,000$ Hz

$F = 4,5$ dB (évanouissement $< 1\%$ du temps)

$G_R = 37,7$ dBi (limite à mi-puissance du faisceau de satellite de 2°)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 800$ K, et par conséquent

$C/N = 8,5$ dB.

Liaison descendante vers la station terrienne d'utilisateur dans la bande des 20 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (1), où:

$P_T = 2,1$ dBW (1,62 W)

$G_T = 37,7$ dBi (limite du faisceau de satellite de 2°)

$d = 39\,853\,746$ m (angle d'élévation minimal de 17°)

$f = 19\,700\,000\,000$ Hz

$F = 7$ dB (évanouissement $< 1\%$ du temps)

$G_R = 46,0$ (antenne de 1,2 m à 19,7 GHz)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 300$ K, et par conséquent

$C/N = 8,5$ dB.

Liaison descendante vers la station terrienne d'utilisateur dans la bande des 11 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (1), où:

$P_T = 2,1$ dBW (1,62 W)

$G_T = 37,7$ dBi (limite du faisceau de satellite de 2°)

$d = 40\,583\,982$ m (angle d'élévation minimal de 10°)

$f = 10\,950\,000\,000$ Hz

$F = 3,5$ dB (évanouissement $< 1\%$ du temps)

$G_R = 40,9$ (antenne de 1,2 m à 10,95 GHz)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 200$ K, et par conséquent

$C/N = 13,6$ dB.

Parmi ces liaisons, la plus critique est la liaison descendante à 19,7 GHz, pour laquelle la puissance de sortie du satellite par porteuse, P_T , doit être de 1,62 W. Etant donné que la puissance de sortie totale multiporteuse d'un répéteur de 40 W au niveau de saturation d'une seule porteuse est d'environ 16 W (c'est-à-dire avec une réduction de puissance à la sortie de 4 dB pour limiter l'intermodulation), le nombre de porteuses de 2 Mbit/s par répéteur est de **10** (c'est-à-dire $\cong 16/1,62$) – comme indiqué à la Fig. 10.

Dans le système fonctionnant à 11/14 GHz, la marge d'évanouissement plus faible produit un rapport C/N avantageux pour 10 porteuses par répéteur à 1,62 W par porteuse. Une configuration plus optimale consisterait à utiliser 11 porteuses par répéteur, les bandes de garde entre les porteuses étant réduites à environ 7,6% et la puissance du satellite par porteuse étant quant à elle réduite à $16/11 = 1,45$ W.

6 Capacité par satellite (C_S)

La capacité d'un satellite ayant la configuration de charge utile indiquée à la Fig. 10 serait la suivante:

$$(2 \text{ Mbit/s par porteuse}) \times (10 \text{ porteuses par répéteur}) \times (2 \text{ ensembles de 4 répéteurs par faisceau}) \times (8 \text{ faisceaux}) = \mathbf{1\ 280 \text{ Mbit/s}}$$

Dans l'hypothèse où chaque répéteur a un rendement de puissance de 35% et où la charge utile représente 75% de la demande de puissance du satellite, la puissance primaire totale nécessaire pour un tel satellite serait d'environ $(40 \text{ W} \times 2 \times 4 \times 8)/(0,35 \times 0,75) = 9\ 752 \text{ W}$, c'est-à-dire **10 kW**.

Dans le cas 11/14 GHz, si on utilise 11 porteuses par répéteur, la capacité serait de 1 408 Mbit/s.

7 Capacité totale potentielle (C_T)

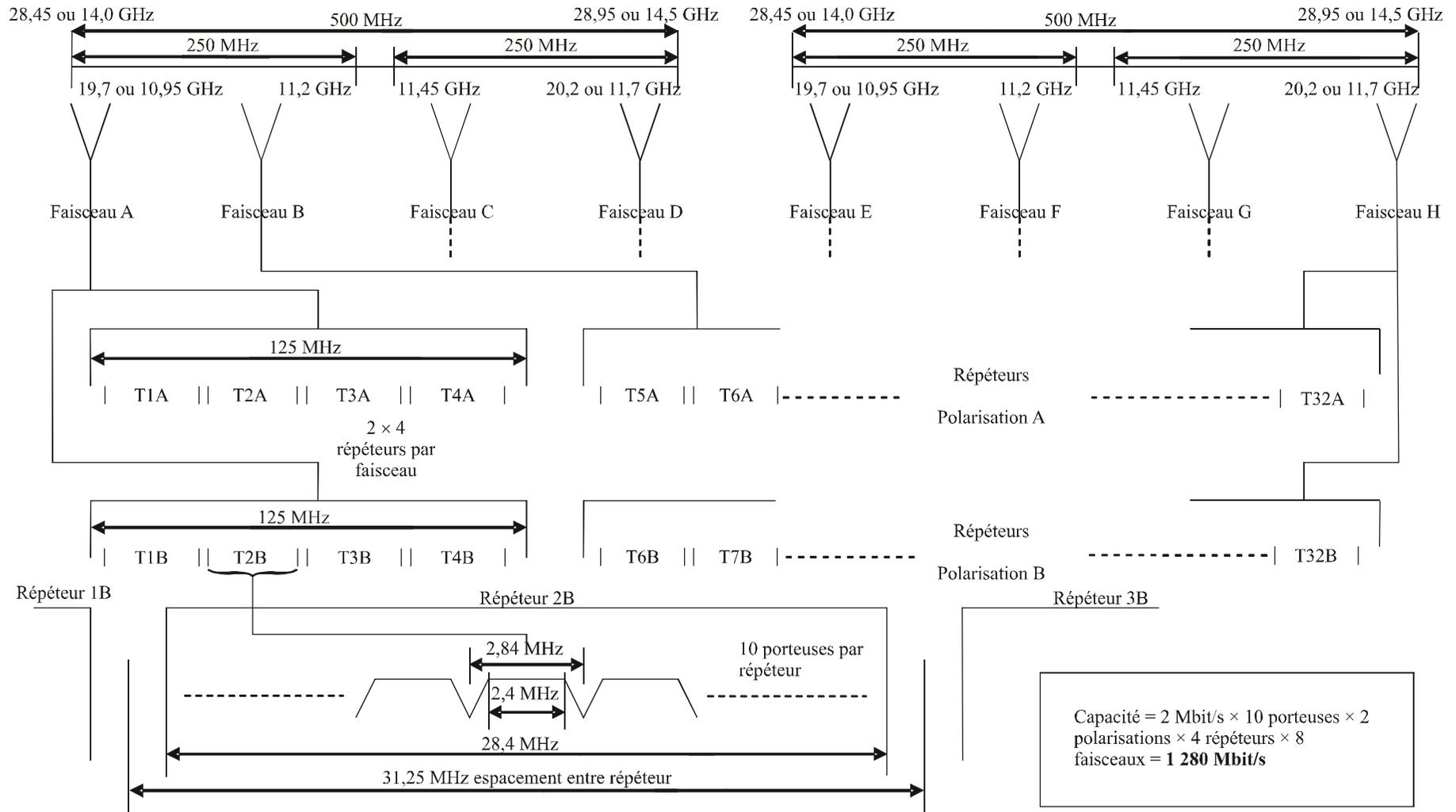
Au § 3 de l'Annexe 1 l'orbite géostationnaire peut être vue à un angle d'élévation de 17° ou plus, à partir de tout point de la zone de référence de 10 000 000 de km^2 , sur un intervalle de longitude de $97,7^\circ$. On s'aperçoit aussi que pour un angle d'élévation minimal de 10° , l'intervalle de longitude est de $111,1^\circ$. En utilisant la méthode décrite dans le présent paragraphe, on constate que si les stations terriennes d'utilisateur ont des antennes de 1,2 m de diamètre, l'espacement minimal entre les satellites pourrait théoriquement être inférieur à 2° aussi bien pour le cas des bandes 20/30 GHz que pour celui des bandes 11/14 GHz. Toutefois, pour minimiser le risque de brouillages dus à des facteurs tels qu'un contrôle imparfait de la position du satellite, un espacement minimal de 2° est généralement spécifié dans la réglementation et cette valeur a donc été choisie ici. Par conséquent, le nombre de satellites fonctionnant à la même fréquence, du type décrit dans la présente Annexe pour desservir simultanément la zone de référence est de 48 dans le cas des bandes 20/30 GHz et de 55 dans le cas des bandes 11/14 GHz. Il en résulte que la capacité totale pouvant être fournie par des satellites de ce type pour permettre un accès à l'Internet large bande par les utilisateurs dans la zone de référence est la suivante:

- pour l'exemple des bandes 20/30 GHz – $48 \times 1\ 280 = \mathbf{61,44 \text{ Gbit/s}}$,
- pour l'exemple des bandes 11/14 GHz – $55 \times 1\ 408 = \mathbf{77,44 \text{ Gbit/s}}$.

Toutefois, comme il faut partager des fréquences avec les systèmes existants du SFS, il est probable qu'une partie de cette capacité ne puisse pas être obtenue dans un avenir proche, en particulier dans les bandes de fréquences les plus basses.

FIGURE 10

**Configurations du répéteur et des faisceaux pour un satellite du SFS à 20/30 GHz ou 11/14 GHz
conçu pour fournir un accès à l'Internet haut débit**



Annexe 3

Exemple d'accès à l'Internet large bande fourni au niveau mondial à l'aide d'un système du SFS conçu pour des antennes de stations terriennes «communautaires» et pour la distribution locale de Terre

1 Généralités

L'objectif visé dans l'Annexe 1 était de fournir un accès direct à des stations terriennes d'utilisateur équipées d'antennes de 30 cm, ce qui a déterminé la nature du secteur spatial, c'est-à-dire des satellites avec des faisceaux ponctuels multiples aussi étroits que possible – et a donc caractérisé le type d'architecture de système nécessaire. Toutefois, pour les besoins de la présente Annexe où les utilisateurs accéderont par des réseaux radioélectriques locaux à des emplacements relativement peu nombreux dans lesquels les stations terriennes sont de type «communautaire», la taille de l'antenne utilisée par ces stations est moins déterminante et il devient possible d'adopter une série d'architectures de système. Il existe différentes possibilités (y compris une gamme de bandes de fréquences) pour la mise en œuvre des réseaux radioélectriques de Terre locaux servant à connecter les utilisateurs aux stations terriennes «communautaires». Par conséquent, la présente Annexe ne contient qu'un seul exemple d'architecture de système qui pourrait faciliter l'accès à l'Internet large bande par l'intermédiaire de réseaux radioélectriques locaux centrés sur des stations terriennes communautaires. Cet exemple est fondé sur l'utilisation de la technique AMRF pour les réseaux radioélectriques de Terre entre l'utilisateur et la station centrale locale, de pair avec la modulation MDP-4 et un taux CED 3/4, dans la bande des 4 GHz attribuée au service fixe. Ce choix influe dans une certaine mesure sur la conception des liaisons par satellite entre les stations terriennes locales et la station terrienne centrale connectée à l'Internet, bien que l'influence exercée ne soit pas forte au point de restreindre les possibilités à l'exemple indiqué ici.

Si, dans l'exemple de la présente Annexe, la bande des 4 GHz attribuée au SF est utilisée pour la distribution locale de Terre, il existe néanmoins un certain nombre d'autres possibilités de fournir à cette partie du réseau d'accès un type de service, par exemple le service fixe ou le service mobile ainsi qu'une bande de fréquences. Le choix de l'application dépendra d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels: le débit binaire et la puissance nécessaire; la gamme de service requise de la part de la station terrienne communautaire; le partage des fréquences et la coordination avec d'autres services et, enfin, les contraintes réglementaires. Etant donné que chaque réseau local de Terre lié à l'Internet par le même satellite serait autonome, il se pourrait que différentes zones utilisent différentes attributions de fréquences faites au service fixe et/ou au service mobile; il pourrait s'agir là d'une solution appropriée lorsque la zone de service du satellite s'étend à plusieurs pays, par exemple.

2 Considérations relatives aux bandes de fréquences

S'agissant de l'identification des bandes de fréquences du SFS qui se prêtent à cette application, les dispositions du premier alinéa du § 1.1 de l'Annexe 1 sont également valables ici mais dans ce cas, l'utilisation des bandes 4/6 GHz et 11/14 GHz attribuées au SFS n'est pas limitée par la nécessité d'utiliser des stations terriennes dotées de très petites antennes. En principe, les stations terriennes communautaires pourraient utiliser des antennes de n'importe quelle taille, mais il serait en l'espèce peu rentable de recourir à de très grandes antennes.

L'utilisation actuelle qui est faite des bandes pour systèmes à satellites mentionnées au § 1.2 de l'Annexe 1 est analysée. La conclusion est qu'à l'heure actuelle, les attributions faites au SFS à 20/30 GHz sont beaucoup moins fortement utilisées que les attributions existant à des fréquences

inférieures et on assiste pour l'instant à un développement limité du SFS dans les attributions à 40/50 GHz.

Compte tenu de ce qui précède, la présente Annexe contient un exemple de système fondé sur une station terrienne communautaire et indique les paramètres à utiliser en vue de sa mise en œuvre dans les bandes 20/30 GHz ainsi que dans les bandes 11/14 GHz. Toutefois, il convient de noter que pour une mise en œuvre à l'échelle mondiale dans un proche avenir, il est probable que la bande des fréquences supérieures occasionnera moins de problèmes de partage des fréquences qu'avec les bandes inférieures.

3 Caractéristiques techniques possibles

3.1 Architecture du système

L'architecture du système choisie pour cet exemple est reproduite à la Fig. 11. Dans ce système, quatre faisceaux bidirectionnels de satellite à polarisation double utiliseraient au total une largeur de bande de 500 MHz pour la liaison montante, plus 500 MHz pour la liaison descendante (c'est-à-dire 125 MHz pour la liaison montante et 125 MHz pour la liaison descendante par faisceau). Chaque faisceau desservirait quatre stations terriennes communautaires locales avec une seule polarisation plus quatre autres stations en polarisation orthogonale, reliant ainsi les huit stations terriennes par satellite à une station terrienne centrale, pour les besoins de la connexion à l'Internet. Par conséquent, le satellite fournirait un accès à l'Internet à 32 communautés locales.

3.2 Systèmes radioélectriques locaux de Terre

Chaque station terrienne locale fonctionnerait avec un système radioélectrique de Terre équipé pour desservir un certain nombre d'utilisateurs dans un rayon d'environ 3 km. Le nombre d'utilisateurs pouvant être desservis à tout moment dépendrait des débits binaires utilisés et des facteurs d'activité de leurs connexions. S'agissant des utilisateurs privés de l'Internet, le facteur typique d'activité est d'environ 30:1 alors qu'il est d'environ 10:1 pour les applications commerciales. La largeur de bande employée est extrêmement variable et s'étend à des applications qui vont des messages de texte courts jusqu'à la visioconférence. Le service «Internet large bande» a généralement des débits compris entre 256 kbit/s jusqu'à de nombreux Mbit/s mais la limite inférieure augmente quelques mois après que les besoins des clients arrivent à maturité. Par exemple, en supposant que 100 utilisateurs commerciaux connectés simultanément souhaitent obtenir un débit de 2 Mbit/s pendant 10% du temps, cela signifie qu'il faudrait fournir un débit de 20 Mbit/s pour assurer le service et une disponibilité de 6 Mbit/s supplémentaires à partager entre, par exemple, 30×23 (utilisateurs à 256 kbit/s dans 6 Mbit/s) $\cong 700$. Par conséquent, la capacité serait de 100 utilisateurs commerciaux plus 700 utilisateurs privés simultanés ou, si l'on tient compte de considérations commerciales, $150 + 1\ 000$. Toutefois, si l'un des utilisateurs souhaitait lancer des applications très gourmandes en largeur de bande comme la télévision en temps réel, cet utilisateur pourrait occuper une proportion importante de la capacité disponible à moins que l'opérateur de réseau n'impose une procédure de partage. Cette question, qui relève de la gestion du réseau, sort du cadre de la présente étude.

Pour les besoins de la présente Annexe, l'exemple choisi s'appuie sur 200 utilisateurs qui emploient chaque réseau local à raison d'un facteur d'activité moyen de 13%, sachant que 13 d'entre eux seraient en mesure d'émettre simultanément à un débit binaire de 2 Mbit/s et 13 autres de recevoir simultanément au même débit, dans la bande des 4 GHz attribuée au service fixe. Il serait possible, au besoin, de permettre à certains utilisateurs d'émettre et de recevoir simultanément à 2 Mbit/s, ou à des débits binaires plus élevés, mais dans ce cas le nombre admissible d'abonnés actifs simultanément serait sensiblement inférieur à 26. Inversement, si certains des utilisateurs

employaient des débits binaires inférieurs à 2 Mbit/s, le nombre admissible d'abonnés actifs simultanément serait sensiblement supérieur à 26.

Dans cet exemple, on part de l'hypothèse que les liaisons d'abonné dans les réseaux locaux de Terre (de type point à multipoint) seraient des liaisons AMRF et que leur modulation serait de type MDP-4 avec un taux CED 3/4. Dans chaque terminal communautaire (c'est-à-dire, la station de Terre centrale plus la station terrienne locale), les signaux sortants (par exemple, treize à 2 Mbit/s) seraient multiplexés numériquement en un seul signal de 26 Mbit/s pour une transmission vers l'avant au satellite et les signaux entrants (par exemple, treize à 2 Mbit/s) seraient démultiplexés à partir d'un signal de 26 Mbit/s reçu du satellite.

3.3 Liaisons par satellite

On a également supposé que les porteuses des liaisons montante et descendante entre chaque station terrienne communautaire et le satellite utilisent la modulation MDP-4 avec un taux CED 3/4 et on assisterait, dans le satellite, à une conversion des porteuses MAQ-16 et vice versa pour les liaisons entre le satellite et la station terrienne centrale. Etant donné qu'il n'existerait qu'une seule station terrienne centrale par faisceau (ou éventuellement une seule par satellite là où les quatre faisceaux se chevauchent), elle comporterait une antenne suffisamment grande pour produire les rapports C/N sur les liaisons montante et descendante que nécessitent les porteuses MAQ-16. Dans la station terrienne centrale, les flux binaires de 26 Mbit/s seraient traités dans les formats nécessaires pour assurer la connexion à destination et en provenance de l'Internet.

3.4 Couverture

D'après la Fig. 12, si les quatre faisceaux de satellite (bidirectionnels, polarisation double) étaient conçus de manière à avoir une ouverture à mi-puissance d'environ 3° et à être orientés de façon que leurs empreintes coïncident en un même point sur l'Equateur, ils couvriraient ensemble une zone totale semblable à celle de 10 000 000 de km^2 qui a été utilisée comme base des calculs de la capacité dans l'Annexe 1 (voir la Fig. 6 de ladite Annexe). Les gammes de fréquences devant être couvertes par chacun des quatre faisceaux sont indiquées à la Fig. 12, dans le cas d'un système à mettre en œuvre dans les bandes 20/30 GHz ou dans les bandes 11/14 GHz. Comme cela est indiqué dans l'Annexe 1, les antennes du satellite seraient conçues de façon que les empreintes du faisceau restent circulaires, avec le même diamètre (1 884,6 km à la surface de la Terre), quelle que soit l'orientation de pointage vers la surface de la Terre jusqu'à un angle d'élévation minimal de 17° pour les bandes 20/30 GHz ou de 10° pour 11/14 GHz.

3.5 Configuration de la charge utile du satellite

La configuration envisagée pour la charge utile du satellite est représentée à la Fig. 13. On peut voir que le nombre de répéteurs nécessaires pour utiliser pleinement la largeur de bande de 500 MHz sur les liaisons montante et descendante, avec les deux polarisations, est de 64. On peut voir aussi que grâce aux équipements utilisés pour convertir les flux sortants à 26 Mbit/s, depuis la modulation MDP-4 vers la modulation MAQ-16 et vice versa pour les flux entrants, l'utilisation de la largeur de bande était plus efficace que si l'on avait utilisé des répéteurs qui ne démodulent pas le signal. S'agissant de la modulation MDP-4 avec un taux CED 3/4, la largeur de bande de transmission d'une porteuse à 2 Mbit/s est d'environ $2 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2 = 1,6$ MHz et la largeur de bande d'une porteuse à 26 Mbit/s est d'environ $26 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2 = 20,8$ MHz. Si le seuil de disponibilité est défini comme le point où le TEB est égal à 1×10^{-6} , le rapport C/N total requis pour ces porteuses dans des conditions d'évanouissement se situe à environ 8,5 dB, de sorte que, si l'on tient compte du bruit dans d'autres parties de la liaison ainsi que du brouillage externe, il faut que chaque canal soit conçu de manière à obtenir un rapport C/N avec évanouissements d'au moins 9,5 dB. Cela s'applique à la liaison la plus critique dans une chaîne, c'est-à-dire dans le sens qui va du terminal

d'utilisateur au terminal communautaire, pour la liaison montante et dans le sens qui va du satellite à la station terrienne locale, pour la liaison descendante. Les autres liaisons devraient être conçues de façon à obtenir des seuils C/N plus élevés, afin de limiter leur incidence sur la qualité de fonctionnement de bout en bout.

Dans le cas de la modulation MAQ-16, la largeur de bande d'une porteuse à 26 Mbit/s est d'environ $26 \times 1/4 \times 1,2 = 7,8$ MHz. Ainsi, la largeur de bande de 125 MHz par faisceau permet de prendre en charge, pour chaque polarisation, quatre porteuses de 20,8 MHz plus quatre porteuses de 7,8 MHz avec des bandes de garde entre les porteuses d'environ 8,5%. Toutefois, puisque la modulation de chaque porteuse de 7,8 MHz est de type MAQ-16, elles doivent être conçues de façon que le seuil de disponibilité C/N soit d'environ 25 dB (pour un $TEB = 1 \times 10^{-6}$) dans des conditions d'évanouissement.

La conversion entre la modulation MDP-4 + CED et la modulation MAQ-16 dans chaque répéteur complique la charge utile du satellite mais pas autant que dans le cas d'un traitement complet à bord. Une charge utile analogue fondée sur des répéteurs «transparents» («guides d'onde coudés») permettrait uniquement d'assurer près des deux tiers de la capacité.

3.6 Bilans de la liaison

Compte tenu des paragraphes précédents, les paramètres essentiels applicables aux liaisons radioélectriques locales de Terre à 4 GHz ainsi qu'aux liaisons par satellite pour les options 20/30 GHz et 11/14 GHz sont indiqués dans les bilans ci-après de la liaison.

3.6.1 Liaisons locales de Terre

Liaison entre le terminal d'abonné et la station terrienne locale dans la bande des 4 GHz

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ dB} \quad (2)$$

où:

$$P_T = 3 \text{ dBW (2 W)}$$

$$G_T = 0 \text{ dBi (faible directivité)}$$

$$d \leq 3 \text{ 000 m}$$

$$f = 4 \text{ 000 000 000 Hz}$$

$$F = 20 \text{ dB (évanouissement et blocage)}$$

$$G_R = 10 \text{ dBi (tous les azimuts)}$$

$$B = 1 \text{ 600 000 Hz}$$

$$T = 4 \text{ 000 K, et par conséquent}$$

$$C/N = 9,5 \text{ dB.}$$

Liaison entre la station terrienne locale et le terminal d'abonné dans la bande des 4 GHz

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 5,4 \text{ dBW (3,5 W)}$$

$$G_T = 10 \text{ dBi (tous les azimuts)}$$

$$d \leq 3 \text{ 000 m}$$

$$f = 3 \text{ 750 000 000 Hz}$$

$$F = 20 \text{ dB (évanouissement et blocage)}$$

$$G_R = 0 \text{ dBi (faible directivité)}$$

$$B = 1\,600\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 4\,000 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 12,5 \text{ dB.}$$

3.6.2 Liaisons entre la station terrienne locale et le satellite

Liaison montante depuis la station terrienne locale dans la bande des 30 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 24 \text{ dBW (251 W)}$$

$$G_T = 53,63 \text{ dBi (antenne de 2 m à 28,45 GHz)}$$

$$d \leq 39\,853\,746 \text{ m (angle d'élévation minimal de } 17^\circ)$$

$$f = 28\,450\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 11 \text{ dB (évanouissement } < 1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 34 \text{ dBi (limite à mi-puissance du faisceau de satellite de } 3^\circ)$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 1\,000 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 12,5 \text{ dB.}$$

Liaison montante depuis la station terrienne locale dans la bande des 14 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 16,7 \text{ dBW (47 W)}$$

$$G_T = 47,63 \text{ dBi (antenne de 2 m à 14,25 GHz)}$$

$$d \leq 40\,583\,982 \text{ m (angle d'élévation minimal de } 10^\circ)$$

$$f = 14\,250\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 4,5 \text{ dB (évanouissement } < 1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 34 \text{ dBi (limite à mi-puissance du faisceau de satellite de } 3^\circ)$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 800 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 12,5 \text{ dB.}$$

Liaison descendante vers la station terrienne locale dans la bande des 20 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 13 \text{ dBW (20 W)}$$

$$G_T = 34 \text{ dBi (limite du faisceau de satellite de } 3^\circ)$$

$$d = 39\,853\,746 \text{ m (angle d'élévation minimal de } 17^\circ)$$

$$f = 19\,700\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 7 \text{ dB (évanouissement } < 1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 50,44 \text{ (antenne de 2 m à 19,7 GHz)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 300 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 10,7 \text{ dB.}$$

Liaison descendante vers la station terrienne locale dans la bande des 11 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 7,8 \text{ dBW (6 W)}$$

$$G_T = 34 \text{ dBi (limite du faisceau de satellite de } 3^\circ)$$

$$d = 40\,583\,982 \text{ m (angle d'élévation minimal de } 10^\circ)$$

$$f = 10\,950\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 3,5 \text{ dB (évanouissement } < 1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 45,34 \text{ (antenne de 2 m à 10,95 GHz)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 200 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 10,7 \text{ dB.}$$

3.6.3 Liaisons entre la station terrienne centrale et le satellite

Liaison montante entre la station terrienne centrale et le satellite dans la bande des 30 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 24,7 \text{ dBW (295 W)}$$

$$G_T = 63,88 \text{ dBi (antenne de 6,5 m à 28,45 GHz)}$$

$$d = 38\,377\,622 \text{ m (angle d'élévation de } 32,7^\circ)$$

$$f = 28\,450\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 16 \text{ dB (évanouissement } < 0,1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi (dans les limites de } 1^\circ \text{ de l'axe du faisceau de satellite)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 1\,000 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 25,0 \text{ dB.}$$

Liaison montante entre la station terrienne centrale et le satellite dans la bande des 14 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 14,3 \text{ dBW (26,9 W)}$$

$$G_T = 57,86 \text{ dBi (antenne de 6,5 m à 14,25 GHz)}$$

$$d = 38\,656\,773 \text{ m (angle d'élévation de } 29,5^\circ)$$

$$f = 14\,250\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 6,5 \text{ (évanouissement } < 0,1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi (dans les limites de } 1^\circ \text{ de l'axe du faisceau de satellite)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 800 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 25,0 \text{ dB.}$$

Liaison descendante vers la station terrienne centrale dans la bande des 20 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 15,4 \text{ dBW (35 W)}$$

$$G_T = 36 \text{ dBi (dans les limites de } 1^\circ \text{ de l'axe du faisceau de satellite)}$$

$$d = 38\,377\,622 \text{ m (angle d'élévation de } 32,7^\circ)$$

$$f = 19\,700\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 12 \text{ dB (évanouissement } < 0,1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 60,68 \text{ dBi (antenne de 6,5 m à 19,7 GHz)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 300 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 25,0 \text{ dB.}$$

Liaison montante vers la station terrienne centrale dans la bande des 11 GHz attribuée au SFS

Comme dans l'équation (2):

où:

$$P_T = 9,7 \text{ dBW (9,3 W)}$$

$$G_T = 36 \text{ dBi (dans les limites de } 1^\circ \text{ de l'axe du faisceau du satellite)}$$

$$d = 38\,656\,773 \text{ m (angle d'élévation de } 29,5^\circ)$$

$$f = 10\,950\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 8 \text{ dB (évanouissement } < 0,1\% \text{ du temps)}$$

$$G_R = 55,58 \text{ dBi (antenne de 6,5 m à 10,95 GHz)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 200 \text{ K, et par conséquent}$$

$$C/N = 25,0 \text{ dB.}$$

4 Capacité par satellite, C_S

Comme on peut le voir d'après les Fig. 11 et 13, chacun des 64 répéteurs de cet exemple fonctionnerait en mode de porteuse unique et transmettrait une porteuse de 26 Mbit/s. La capacité totale par satellite serait $C_S = 64 \times 26 = 1\,664$ Mbit/s.

Dans le mode à une seule porteuse par répéteur, aucune réduction n'est requise, de sorte que d'après les bilans de la liaison indiqués précédemment on voit que pour un système fonctionnant à 20/30 GHz il suffirait que les répéteurs soient capables de produire une puissance de 35 W au niveau de saturation et dans le cas d'un système fonctionnant à 11/14 GHz qu'ils puissent produire une puissance de 9,3 W au niveau de saturation. Ces besoins de puissance dans les étages avant l'étage de sortie sont relativement limités. Par conséquent, dans l'hypothèse d'un rendement de conversion de puissance de 33%, la puissance primaire totale nécessaire pour obtenir la charge utile serait d'environ $(64 \times 35)/0,33 = 6,8$ kW pour un satellite à 20/30 GHz ou $(64 \times 9,3)/0,33 = 1,8$ kW pour un satellite à 11/14 GHz.

FIGURE 11
Exemple d'architecture d'accès à l'Internet large bande assuré par des réseaux radioélectriques de Terre plus un satellite

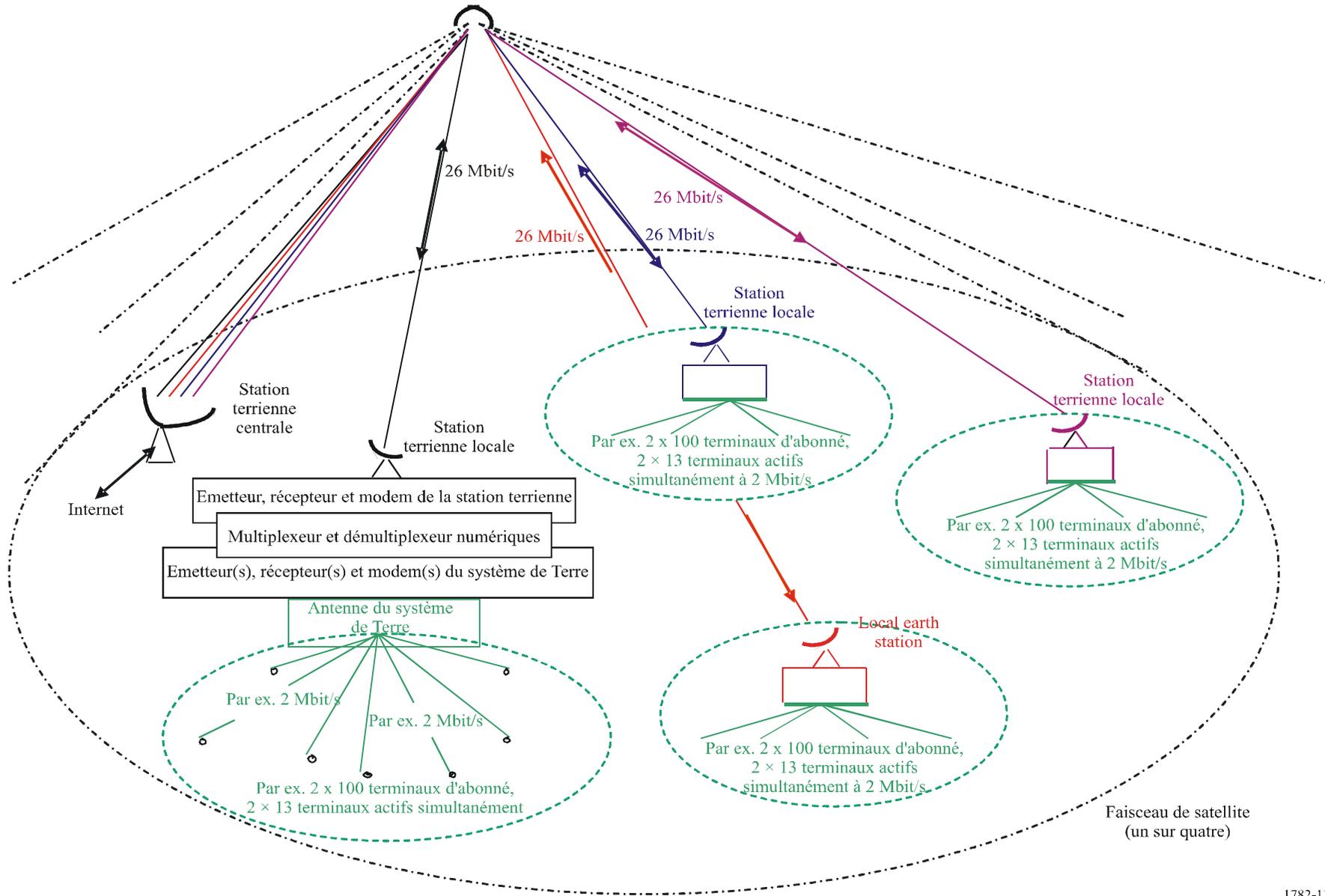


FIGURE 12

Exemple de configuration de faisceaux de satellite pour fournir un accès à l'Internet large bande par satellite ainsi qu'un réseau radioélectrique local de Terre

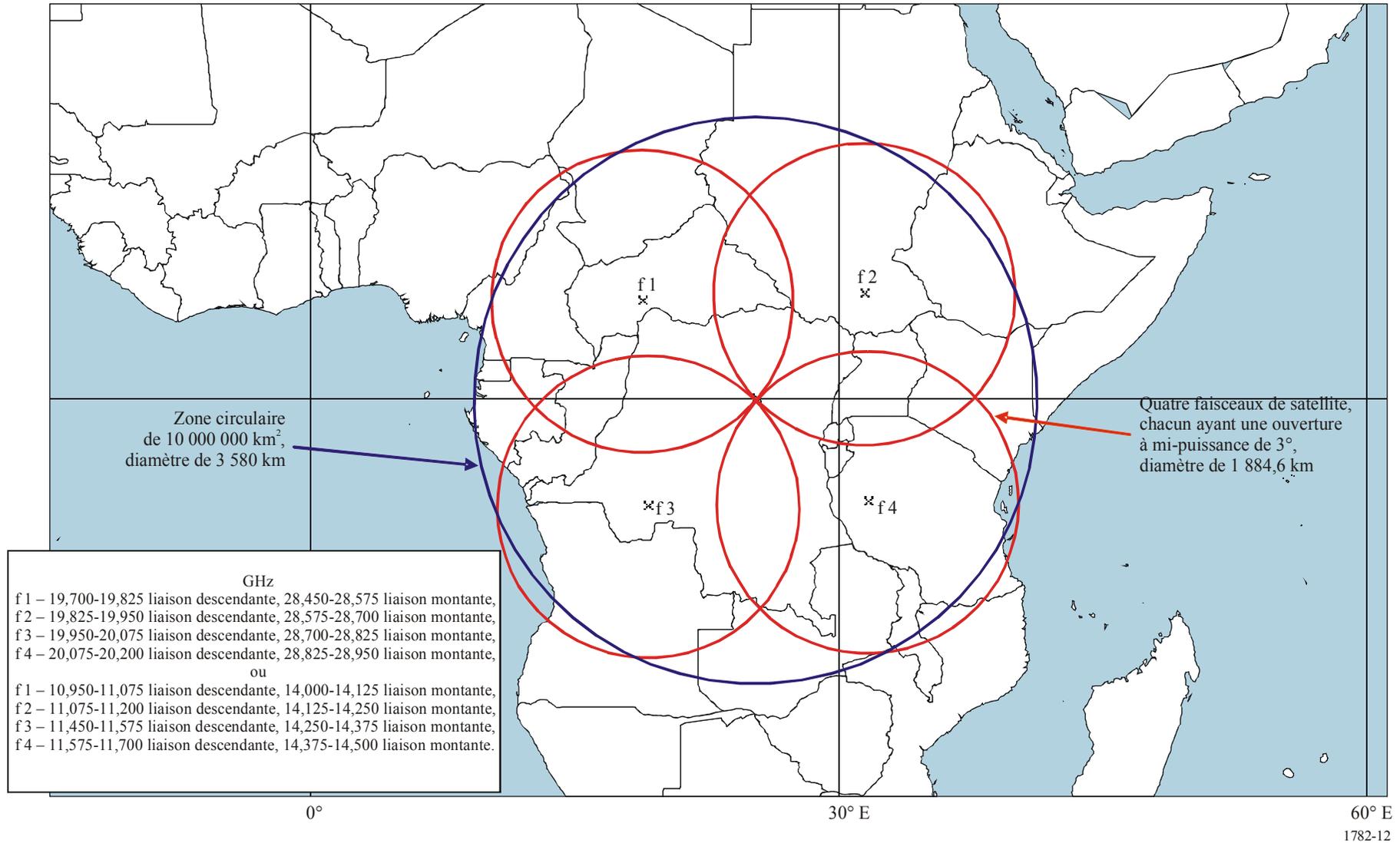
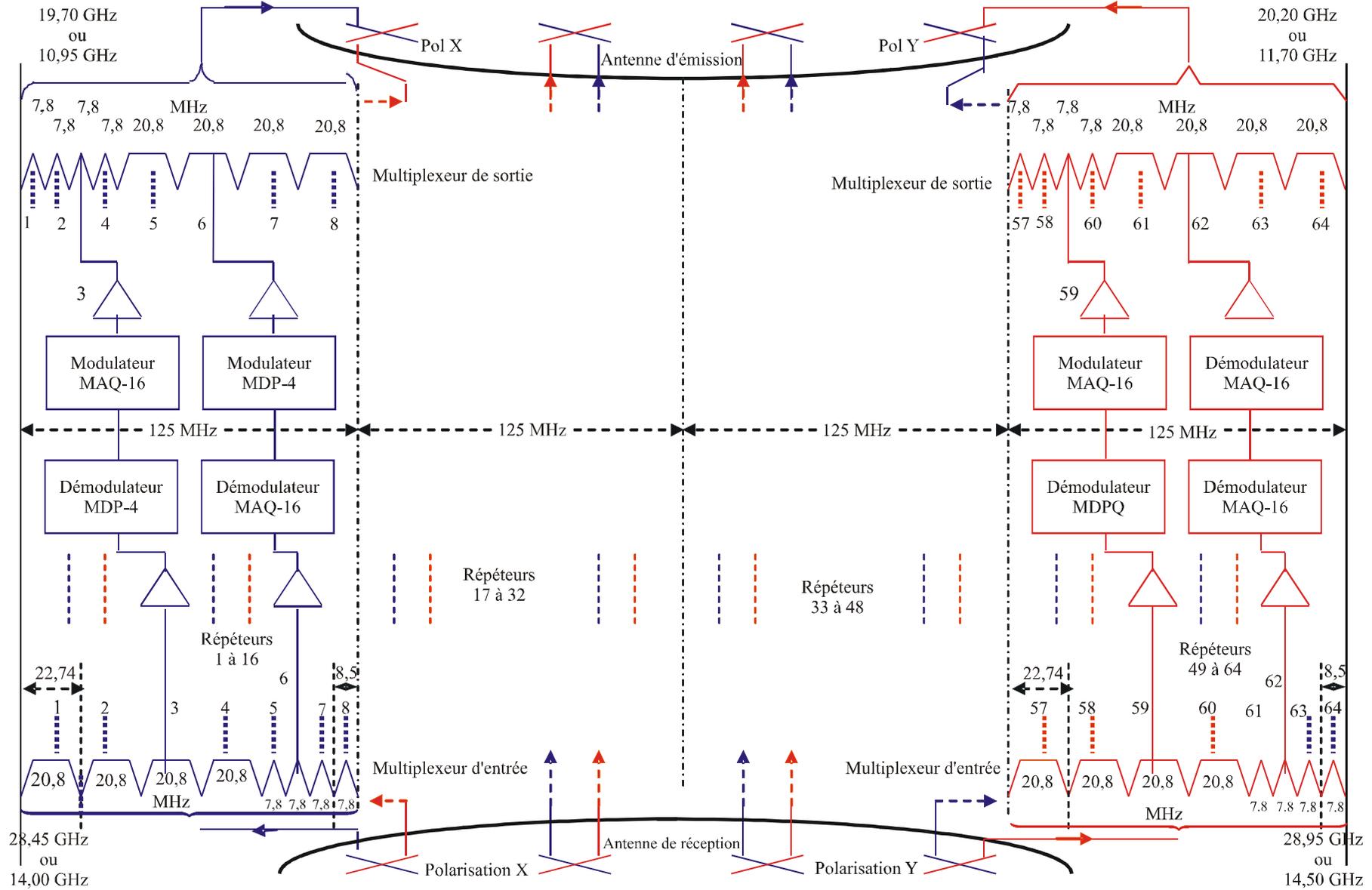


FIGURE 13

Exemple de configuration de charge utile de satellite pour fournir un accès à l'Internet large bande par satellite ainsi qu'un réseau radioélectrique local de Terre



L'introduction de grandes capacités de multiplexage et de stockage temporaire des données dans chaque emplacement de station terrienne communautaire permettrait de maximiser le nombre d'utilisateurs finals pouvant être pris en charge simultanément par un tel réseau.

5 Capacité totale potentielle (C_T)

Conformément aux calculs du § 3 de l'Annexe 1, avec les angles d'élévation minimaux pris pour hypothèse (17° pour un fonctionnement à 20/30 GHz et 10° pour un fonctionnement à 11/14 GHz), on obtient les intervalles de longitude ci-après pour des satellites desservant la zone de référence circulaire de 10 000 000 de km^2 représentée à la Fig. 12:

- pour 20/30 GHz, de $23,4^\circ$ W à $74,3^\circ$ E, un intervalle de longitude de $97,7^\circ$;
- pour 11/14 GHz, de $30,1^\circ$ W à $81,0^\circ$ E, un intervalle de longitude de $111,1^\circ$.

En appliquant la méthode décrite à la Fig. 7 et son texte associé, on voit que l'espacement minimal de longitude entre les satellites du type décrit dans la présente Annexe pour maintenir les brouillages entre satellites adjacents à un niveau suffisamment faible est, sur le plan technique, inférieur à un degré dans les deux cas. Toutefois, si l'on tient compte d'autres facteurs comme les éléments à caractère pratique concernant la commande des satellites, les autorités qui accordent des licences stipulent en général un espacement minimal de 2° entre des satellites adjacents utilisant la même fréquence et la même couverture, valeur qui est donc jugée appropriée ici. Par conséquent, le nombre total de systèmes fonctionnant à 20/30 GHz du type décrit dans la présente Annexe pour desservir simultanément la zone de référence est de 48 et de 55 pour la bande 11/14 GHz.

Par conséquent, la capacité totale qui pourrait être fournie par des systèmes du type décrit ici dans une zone équatoriale de 10 000 000 de km^2 , en utilisant une largeur de bande sur la liaison montante de 500 MHz et une largeur de bande sur la liaison descendante de 500 MHz, est calculée comme suit: $48 \times 1\,664 \text{ Mbit/s} = 79,872 \text{ Gbit/s}$ pour l'exemple 20/30 GHz et $55 \times 1\,664 \text{ Mbit/s} = 91,52 \text{ Gbit/s}$ pour l'exemple 11/14 GHz. Toutefois, comme il faut partager des fréquences avec les systèmes existants du SFS, il est probable qu'une partie de cette capacité ne puisse pas être obtenue dans un avenir proche, en particulier dans les bandes de fréquences les plus basses.
