

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R F.1500
(05/2000)

**Caractéristiques préférées des systèmes du
service fixe utilisant des plates-formes à
haute altitude fonctionnant dans les bandes
47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz**

Série F
Service fixe



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2011

© UIT 2011

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R F.1500* **

**CARACTÉRISTIQUES PRÉFÉRÉES DES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE
UTILISANT DES PLATES-FORMES À HAUTE ALTITUDE
FONCTIONNANT DANS LES BANDES 47,2-47,5 GHz ET 47,9-48,2 GHz**

(2000)

Champ d'application

La présente Recommandation indique les caractéristiques préférées des systèmes du service fixe utilisant des stations placées sur des plates-formes à haute altitude (HAPS). L'Annexe 1 sera utilisée pour l'analyse de la réutilisation des fréquences et des possibilités de partage entre ces systèmes et d'autres systèmes dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les systèmes utilisant une ou plusieurs stations sur des plates-formes à haute altitude (HAPS, *high altitude platform stations*) situées en des points fixes de la stratosphère peuvent avoir des caractéristiques recherchées pour les communications numériques à large bande à haute vitesse, notamment la vidéo interactive et autres, tout en offrant de grandes possibilités de réutilisation des fréquences;
- b) que de tels systèmes permettent d'assurer la couverture de zones métropolitaines avec des angles d'élévation élevés et de zones rurales reculées ou des pays voisins avec des angles d'élévation faibles;
- c) que les services numériques large bande assurés par de tels systèmes du service fixe sont appelés à intervenir dans les vastes infrastructures d'infocommunication contribuant à l'infrastructure mondiale de l'information;
- d) que les liaisons radioélectriques entre HAPS peuvent former un réseau de télécommunication national ou régional;
- e) que le spectre radioélectrique au-dessus de 30 GHz est attribué à divers services radioélectriques et que de nombreux systèmes différents utilisent déjà ces attributions ou projettent de le faire;
- f) que le nombre de demandes d'accès à ces attributions augmente;
- g) que du fait que les systèmes du service fixe utilisant des HAPS peuvent utiliser l'éventail complet d'angles d'élévation, le partage avec d'autres systèmes du service fixe et systèmes d'autres services dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz peut présenter des difficultés;
- h) que l'attribution au service fixe dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz est destinée à être utilisée par les HAPS;

* La présente Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 1 des radiocommunications ainsi que de la Commission d'études 2 du Secteur du développement des télécommunications.

** La Commission d'études a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation (7 et 8 décembre 2009) conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

j) que les caractéristiques préférées des systèmes du SF utilisant des stations HAPS doivent être déterminées afin de faciliter la coordination entre les HAPS du service fixe exploitées dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz et les autres services ayant des attributions coprimaires sur leur territoire et sur les territoires adjacents,

recommande

1 d'utiliser, à titre provisoire, les caractéristiques des systèmes du service fixe utilisant des HAPS données en Annexe 1 pour analyser les possibilités de réutilisation et de partage des fréquences entre de tels systèmes et d'autres systèmes du service fixe fonctionnant dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz.

ANNEXE 1

Caractéristiques préférées des systèmes du service fixe utilisant des plates-formes à haute altitude fonctionnant dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz

1 Introduction

La Résolution 122 (CMR-97) a demandé que soient entreprises des études urgentes sur les critères techniques appropriés de partage entre des systèmes utilisant des HAPS du service fixe et des systèmes des services fixe, fixe par satellite et mobile dans les bandes 47,2-47,5 GHz et 47,9-48,2 GHz.

Dans le cadre de ces études, la présente Annexe définit un ensemble de paramètres techniques relatifs à des applications à haute densité dans le service fixe utilisant des plates-formes à haute altitude.

2 Le système de plate-forme à haute altitude

Ce système comprend une plate-forme à haute altitude située à un emplacement nominal fixe dans la stratosphère, à une altitude de 21 à 25 km. Les communications entre la plate-forme et les stations d'utilisateur au sol sont assurées par un système cellulaire permettant une importante réutilisation des fréquences. On considère que les stations d'utilisateur relèvent de trois zones, à couverture urbaine, suburbaine et rurale (respectivement UAC (*urban area coverage*), SAC (*suburban area coverage*) et RAC (*rural area coverage*)).

De plus, des communications sont établies dans les mêmes bandes de fréquences entre la plate-forme et un certain nombre de stations d'accès au sol situées dans les zones de couverture urbaine ou suburbaine et qui assurent l'interconnexion avec le réseau de télécommunication fixe.

2.1 Caractéristiques de fonctionnement

La plate-forme située à haute altitude est alimentée par des cellules solaires à haute efficacité et des piles à combustible (hydrogène-oxygène) à régénération. Les composants du sous-système formé de la pile à combustible et de l'électrolyseur transforment l'eau en combustible pendant la journée, combustible qui est utilisé pour produire l'énergie électrique nécessaire pendant la nuit. L'électrolyseur décompose l'eau en hydrogène et oxygène qui permettent à la pile de fonctionner pendant la nuit. Le sous-système de propulsion est constitué d'hélices, montées à l'arrière, entraînées

par moteur électrique à vitesse variable, mais d'autres types de propulsion ayant des performances analogues sont possibles. La HAPS utilise un capteur GPS différentiel pour maintenir, dans un système à boucle fermé, sa position dans l'espace dans un rayon de 400 m et à ± 700 m près en altitude.

La charge utile s'appuie sur un système à 3 axes à cardan et dispose de son propre système de stabilisation pour compenser les mouvements de la plate-forme et maintenir une zone de couverture stable au sol. La charge utile dispose de son propre système de régulation thermique et elle est refroidie par un flux forcé en circuit fermé.

L'ensemble de la zone de couverture d'une station HAPS est divisée en trois zones, qui sont nécessaires pour que les utilisateurs disposent en permanence d'un service à large bande sur toute l'étendue de l'empreinte de près de 1 000 km de diamètre. Ces zones sont:

- la zone UAC: qui s'étend de 36 à 43 km depuis le point situé à la verticale de la plate-forme. Dans ces zones, on peut utiliser des stations d'utilisateur portables ayant une ouverture de faisceau de 11° environ ou un gain d'antenne de 26 dBi, avec antenne de 10×10 cm. Les antennes de la plate-forme doivent avoir un gain de 30 dBi (1 W de puissance RF par canal). Dans ces zones, tous les utilisateurs ont un angle d'élévation de 30° à 90° entre le sol et la plate-forme HAPS. Les stations d'utilisateur nécessitent une puissance RF d'émission de 0,15 W environ;
- la zone SAC: qui s'étend de l'UAC jusqu'à 76,5/90,5 km selon l'altitude de plate-forme. Dans cette zone, il faudra utiliser des antennes directives à gain plus élevé (41 dBi) et une puissance d'émission de 0,2 W. Les mêmes antennes peuvent être utilisées en montage fixe sur toit dans la zone UAC. Les antennes d'émission de la station de la plate-forme sont les mêmes que celles utilisées dans la zone UAC. Les angles d'élévation sont compris entre 15° et 30° ;
- la zone RAC: dans celle-ci, les angles d'élévation sont compris entre 15° et 5° . Les applications sont limitées aux accès point à point spécialisés à grande vitesse et à grande couverture dans des bandes de fréquences inférieures, par exemple celles comprises entre 800 MHz et 5 GHz. Aux fréquences de 47/48 GHz, l'affaiblissement atmosphérique et l'affaiblissement dû à la pluie sont trop importants.

TABLEAU 1

Zones de couverture

Zone de couverture	Angle d'élévation (degrés)	Portée au sol (km)	
		Plate-forme à 21	Plate-forme à 25
UAC	90-30	0-36	0-43
SAC	30-15	36-76,5	43-90,5
RAC	15-5	76,5-203	90,5-234

Une charge utile type de plate-forme HAPS aura des antennes-réseaux à fente, stabilisées à 3 axes, associées à un polariseur rapporté pour assurer le découplage de polarisation approprié. Ces antennes-réseaux projettent un total de 700 faisceaux dans chacune des zones UAC et SAC et établissent une couverture sélective dans la zone RAC avec un maximum de 700 faisceaux. La configuration des cellules permet un facteur de réutilisation des fréquences de 7:1.

Pour atteindre une efficacité spectrale maximale, on utilise un système d'accès multiple avec assignation dynamique (AMAD) en fonction de la demande qui permet à l'utilisateur de partager

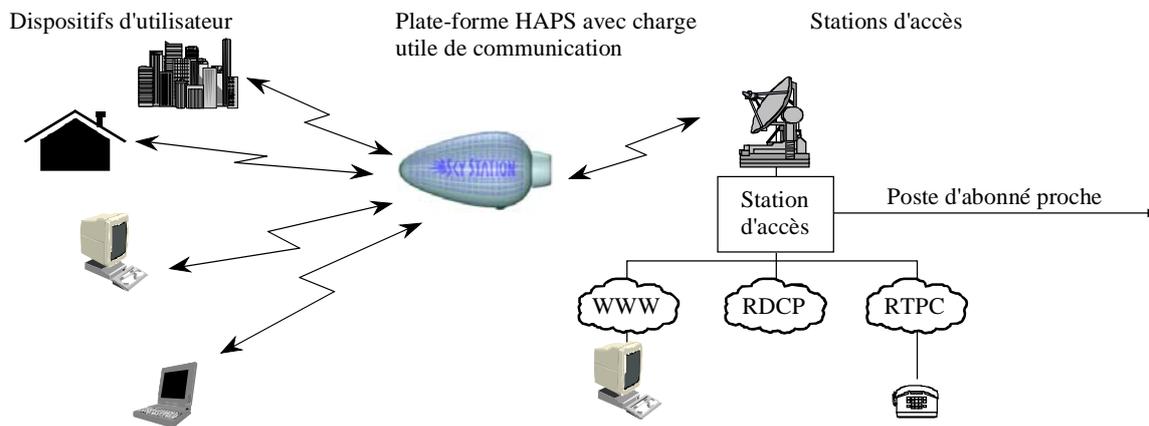
efficacement la largeur de bande; des commutateurs de mode de transfert asynchrone (ATM, *asynchronous transfer mode*) et des multiplexeurs ATM de bord servent au multiplexage statistique du trafic utilisateur. Les liaisons montante et descendante utilisent la modulation MDP-4 et le codage CED concaténé 0,6 (codage Reed-Solomon + codage convolutionnel 2/3 avec longueur de contrainte de 9). On utilise aussi le codage entrelacé pour éviter les erreurs en paquets. Etant donné la grande efficacité du partage de la largeur de bande et les faibles facteurs de charge de la plupart des types de trafic à large bande, les 110 560 utilisateurs peuvent tabler sur un débit maximal de chargement de 2048 Mbit/s et de déchargement de 11,24 Mbit/s avec une attribution de fréquences de 2×100 MHz seulement. Si l'on part de l'hypothèse que 10% des abonnés sont actifs à un moment donné, un seul réseau HAPS (HAPN) peut donc desservir une population d'un million d'utilisateurs avec une attribution de 2×100 MHz. Si celle-ci est portée à 2×300 MHz, un seul réseau HAPN peut desservir plus de cinq millions d'abonnés.

Le système de base comporte également plusieurs stations d'accès au sol utilisant le multiplexage temporel synchrone à grande vitesse pour le trafic de connexion interconnectant le réseau HAPN avec le RTPC et l'Internet. Le débit de la liaison de connexion atteint 0,72 Gbit/s pour une attribution de 300/300 MHz. La modulation MAQ-64 et le codage CED à 0,71 permettent d'optimiser la largeur de bande disponible. Des liaisons point à point à grande vitesse additionnelles peuvent être établies pour les entreprises et les fournisseurs de services.

2.2 Qualité de fonctionnement du système de communication

Un réseau HAPN a une configuration en étoile; la plate-forme HAPS, qui sert de station pivot principale. La charge utile projetée sur le sol de nombreux faisceaux ponctuels et assure une couverture intégrale sur une zone circulaire d'environ 150 km de diamètre.

FIGURE 1
Configuration du réseau



RDCP: réseau de données à commutation par paquets

1500-01

Une station d'utilisateur est un dispositif portable communiquant directement avec la charge utile de télécommunication de la plate-forme. Elle est constituée d'une antenne et d'une interface numérique. De nombreux types d'interface numérique sont envisagés, notamment des cartes PC et des boîtiers adaptateurs multifonctions. Les communications d'utilisateur à utilisateur sont commutées directement par la charge utile, qui comprend un grand commutateur ATM.

Les stations d'accès donnent aux utilisateurs l'accès aux réseaux publics existants, tels que le RTPC et l'Internet. Le système est conçu de telle manière que les stations d'accès peuvent être situées pratiquement partout, cela afin de permettre de réduire autant que possible les besoins

d'infrastructure au sol. Généralement, elles seront situées dans un centre de commutation de l'opérateur ou à un point de contact de fournisseur de service Internet. On peut ajouter des stations d'accès selon les besoins.

Dans les systèmes de la première génération, il n'y aura pas de liaison directe entre deux réseaux HAPN; les communications entre ceux-ci passeront par des stations d'accès. La capacité d'une telle station est de 4-12 Gbit/s, ce qui permet de traiter 60% de l'ensemble du trafic d'utilisateur. La capacité totale de la charge utile est donc de 11-33 Gbit/s.

Le système HAPS est conçu pour offrir des canaux numériques à débit variable, fonctionnant en duplex, aux abonnés privés ainsi qu'aux personnes exerçant des professions libérales et aux télétravailleurs. Les services visés sont les applications multimédias telles que la visioconférence et la visiophonie en plus de l'accès Internet à grande vitesse. Les débits élevés, une grande couverture urbaine et le fait que les stations d'utilisateur ne sont pas dépendantes d'une infrastructure au sol font des HAPS des plates-formes idéales pour le télétravail et le travail à domicile, pour le domicile privé et celui du client. Pour cette raison, le système est conçu de manière à prendre en charge un grand nombre de réseaux locaux virtuels permettant aux utilisateurs d'accéder à leur réseau d'entreprise comme s'ils étaient au bureau.

Sur la liaison descendante, chaque station d'utilisateur est prête à recevoir en permanence mais seulement dans les cellules qui lui sont allouées. Cela permet d'exploiter au maximum les possibilités de multiplexage statistique du commutateur ATM.

Une station d'accès utilise les mêmes fréquences sauf pour le segment utilisé par la cellule dans laquelle elle se trouve. Pour cette raison, chaque station d'accès utilise une part importante de la largeur de bande totale attribuée. Elle utilise également l'autre polarisation pour accroître le découplage.

Le système HAPS utilise une paire de bandes d'une largeur de 100 MHz à 300 MHz dans la bande 47,2-48,2 GHz. Avec un facteur de réutilisation des fréquences de 7, une attribution de 2×100 MHz sera donc réutilisée 100 fois dans chacune des zones de couverture. Chaque intervalle de temps AMRT de la liaison montante achemine une cellule ATM. La nature asynchrone de l'ATM assure une grande souplesse; par exemple, aucun schéma temporel pour les paquets n'est requis. Le système AMAD susmentionné est intégré dans la gestion des appels et du trafic ATM pour rendre aussi efficace que possible la gestion des ressources de communication.

Côté utilisateur, on utilise des multiplexeurs ATM intelligents pour réduire le nombre d'accès sur le commutateur principal. Chaque multiplexeur ATM multiplexe 16 faisceaux dans un accès OC3 (porteur optique, niveau 3 (155,52 Mbit/s)) du commutateur. Il faut au moins 44 accès pour traiter plus de 1400 faisceaux. L'AMRT dynamique transforme chaque faisceau en un bus partagé. Jusqu'à 1000 stations d'utilisateur peuvent être enregistrées au même moment. Cette conception nécessite essentiellement que le multiplexeur ATM traite la partie non standard des protocoles de signalisation, raison pour laquelle il est possible d'utiliser des commutateurs ATM normaux.

Les stations d'accès assurent l'interface avec les réseaux publics, par exemple le réseau dorsal à grande distance d'un opérateur ou l'Internet. La configuration effective dépend du scénario de mise en place. On peut concevoir qu'une station d'accès soit consacrée à un prestataire important de l'Internet tel qu'America Online. Le système est conçu de manière à pouvoir reconnaître les utilisateurs lorsqu'ils se connectent et leur permettre de se connecter à leur fournisseur de services seulement.

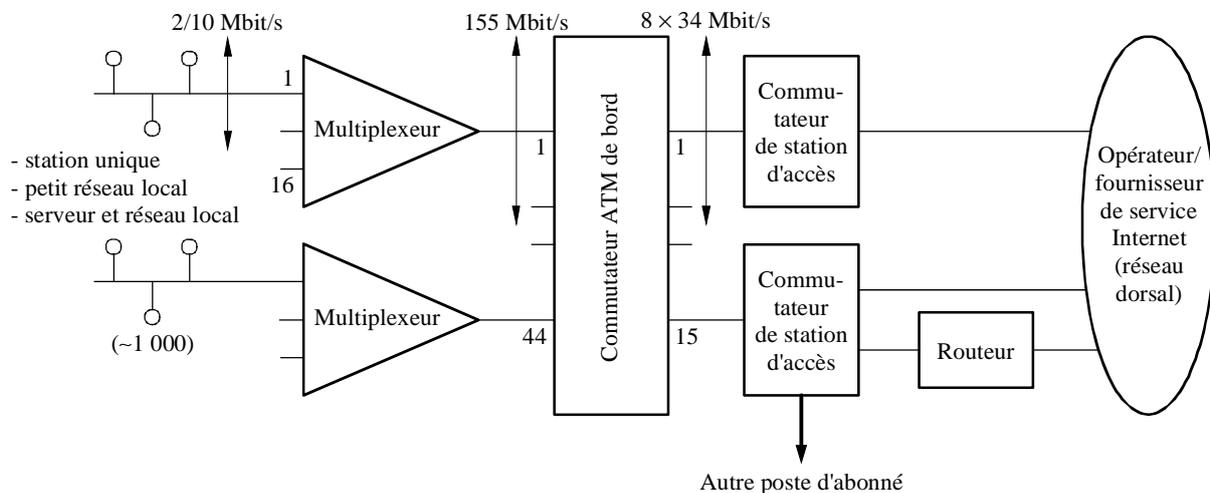
Le bilan en poids et en puissance inclut tout l'équipement en bande de base, à savoir le commutateur ATM et les multiplexeurs.

Le système au sol est constitué de stations d'accès et du centre de commande HAPS. Chaque station d'accès utilise des antennes orientables à gain élevé et à faisceau étroit. L'équipement RF est

analogue à celui de la charge utile. Le commutateur ATM nécessaire est réduit; il comporte quatre accès OC3 environ et tout ce qui est nécessaire à la gestion des serveurs locaux et/ou du réseau. Il faut éventuellement un grand nombre d'interfaces pour les connexions aux réseaux publics existants, dont la plupart sont déjà disponibles, ou qui le seront sous peu en tant qu'options standards de nombreux fournisseurs. Le système est conforme aux normes actuelles.

Pour l'interface avec le réseau ATM public, l'interface de nœud de réseau privé (P-NNI, *private network mode interface*) est préférable étant donné qu'elle permet l'équilibrage dynamique de la charge entre les multiples stations d'accès. Le système d'adressage interne permet d'équilibrer les charges même avec une interface pour porteuse intercentraux à large bande (B-ICI, *broadband interexchange carrier interface*) mais d'une manière moins dynamique.

FIGURE 2
Configuration de réseau de bout en bout (attribution 2×100 MHz, zone unique)



• Duplex à 11 Gbit/s, redondant

1500-02

La plupart des stations d'accès sont des unités autonomes, télécommandées depuis le centre de commande HAPS. Celui-ci est constitué d'une station d'accès permettant la communication avec la charge utile et les autres parties du système, et de quatre entités d'exploitation et de gestion. Le centre de commande de configuration du matériel est chargé de la poursuite, de la télémessure et la commande de la plate-forme et de la charge utile. Il présente beaucoup de similitudes avec un centre de commande de satellite et fonctionne 24h/24.

Le centre de commande des ressources de communication est chargé de la surveillance en temps réel des ressources du réseau. Il s'agit notamment de l'authentification de l'utilisateur, de la commande d'appel, de la gestion des ressources radioélectriques, de la gestion du trafic et de la collecte des données d'utilisation pour la facturation et la comptabilité.

Le centre de commande des stations au sol distantes est chargé de toutes les tâches de gestion en différé de l'ensemble du réseau, y compris de toutes les stations d'accès distantes. Il s'agit en fait du centre d'exploitation de réseau (NOC, *network operations centre*). Certaines de ses fonctions peuvent s'étendre à des stations HAPS proches.

Le centre commercial régional est chargé des affaires locales et de la gestion financière, notamment les facturations des clients, la comptabilité relative aux opérateurs, l'analyse des tendances, etc. Un centre commercial régional peut s'occuper d'un groupe de systèmes HAPS.

2.3 Exemple de plan de fréquences

Un exemple de plan de structuration en canaux pour système HAPS, avec une attribution de fréquences de 300 MHz + 300 MHz, consiste à diviser le spectre des fréquences de 300 MHz, dans chaque sens, en sept bandes de fréquences de 33 MHz chacune et deux bandes de garde de 33 MHz. Les sept bandes de fréquences sont disposées suivant un schéma de réutilisation des fréquences à 7 cellules permettant d'exploiter au mieux le spectre. Pour les liaisons aller d'abonné, cette bande de 33 MHz est ensuite subdivisée en trois canaux de 11 MHz. Pour les liaisons de retour d'abonné, chaque bande est subdivisée en quinze canaux de 2,2 MHz. Chaque canal de liaison de retour est ensuite segmenté en 32 intervalles de temps à 64 kbit/s et un intervalle de garde, un intervalle de commande d'accès et un intervalle pilote. De même, chaque canal de liaison aller est divisé en plusieurs intervalles à 64 kbit/s complétés de tous les intervalles de verrouillage. Chaque période de trame a une durée de 6 ms. Il y a 700 cellules par zone UAC, SAC et RAC, et jusqu'à 20 stations d'accès dans chacune des zones UAC et SAC. Chaque station d'accès est située au centre d'une cellule pour minimiser le brouillage cocanal avec les cellules adjacentes. Chaque liaison d'accès utilise toute la largeur de bande attribuée, sauf en ce qui concerne la bande utilisée par la cellule hôte, et les bandes de garde nécessaires pour réduire le brouillage du canal adjacent, et exploiter au mieux la capacité de la liaison. Un total de 22 canaux à 11 MHz sont utilisés par chaque station d'accès, soit un total de 242 MHz dans chaque sens, ce qui laisse quatre bandes de garde de 11,75 MHz.

2.4 Caractéristiques d'émission d'une station de plate-forme

Les caractéristiques types de l'émetteur et de l'antenne d'une station de plate-forme sont données dans le Tableau 2.

Les communications avec des stations d'utilisateur utiliseront la modulation MDP-4 avec multiplexage à répartition dans le temps, avec une largeur de bande de 11 MHz pour la liaison descendante et de 2,2 MHz pour la liaison montante. Les communications avec les stations d'accès utiliseront une modulation de haut niveau, MAQ-64, avec une largeur de bande de 88 MHz (11 MHz par porteuse). Dans les deux cas on se base sur l'hypothèse d'une utilisation des fréquences de 2×100 MHz. Avec 2×300 MHz, les stations d'utilisateur pourraient communiquer avec les stations HAPS sur une largeur de 33 MHz pour la liaison descendante.

TABLEAU 2

Caractéristiques de l'émetteur de station de plate-forme

Communication avec	Puissance d'émission (dBW)	Gain d'antenne (dBi) ⁽¹⁾
UAC	1,3	30
SAC	1,3	30
RAC	3,5	41
Station d'accès (UAC)	0	35
Station d'accès (SAC)	9,7	38

⁽¹⁾ Gain maximal d'antenne

2.5 Stations d'utilisateur et stations d'accès

Les paramètres correspondants des stations au sol sont donnés dans le Tableau 3. Dans le sens montant, les stations d'utilisateur utiliseront l'accès AMRT à plusieurs porteuses et affectation à la demande et modulation MDP-4, alors que les stations d'accès utiliseront des techniques analogues à celles de la plate-forme.

TABLEAU 3
Caractéristiques d'un émetteur de station au sol

Communication avec	Puissance d'émission (dBW)	Gain d'antenne (dBi)
UAC	-8,2	23
SAC	-7	38
RAC	-1,5	38
Station d'accès (UAC)	1,7	46
Station d'accès (SAC)	13,4	46

On peut évaluer les diagrammes de rayonnement d'antenne des stations d'accès des réseaux HAPN et des stations d'utilisateur décrites dans le Tableau 3 en extrapolant les informations de la Recommandation UIT-R F.699 à la bande de fréquences 47,2-48,2 GHz et en utilisant les gains d'antenne indiqués dans la colonne 3 du Tableau 3.

2.6 Diagrammes de rayonnement

Le diagramme de rayonnement des antennes de plate-forme sont conformes à la Recommandation UIT-R S.672. Le diagramme de référence est donné par:

$$G(\psi) = G_m - 3 (\psi/\psi_b)^\alpha \quad \text{dBi} \quad \text{pour } \psi_b \leq \psi \leq a \psi_b \quad (1)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N + 20 \log(z) \quad \text{dBi} \quad \text{pour } a \psi_b < \psi \leq 0,5b \psi_b \quad (2a)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N \quad \text{dBi} \quad \text{pour } 0,5b \psi_b < \psi \leq b \psi_b \quad (2b)$$

$$G(\psi) = X - 25 \log(\psi) \quad \text{dBi} \quad \text{pour } b \psi_b < \psi \leq Y \quad (3)$$

$$G(\psi) = L_F \quad \text{dBi} \quad \text{pour } Y < \psi \leq 90^\circ \quad (4a)$$

$$G(\psi) = L_B \quad \text{dBi} \quad \text{pour } 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (4b)$$

où:

$$X = G_m + L_N + 25 \log(b \psi_b) \quad \text{et} \quad Y = b \psi_b \times 10^{0,04(G_m + L_N - L_F)}$$

$G(\psi)$: gain à l'angle ψ par rapport à la direction du faisceau principal (dBi)

G_m : gain maximal dans le lobe principal (dBi)

ψ_b : demi-ouverture du faisceau à 3 dB dans le plan considéré (3 dB en dessous de G_m) (degrés)

L_N : niveau du lobe latéral proche par rapport au gain de crête (dB) requis en raison de la conception du système

L_F : 0 dBi niveau du lobe latéral éloigné (dBi) (voir la Note 2)

z : (grand axe/petit axe) du faisceau rayonné

L_B : $15 + L_N + 0,25 G_m + 5 \log z$ dBi ou 0 dBi (on retient la valeur la plus élevée).

NOTE 1 – Les diagrammes applicables aux faisceaux elliptiques doivent être vérifiés expérimentalement. Les valeurs de a dans le Tableau 4 sont provisoires.

NOTE 2 – On a pris pour hypothèse, dans le cas des antennes d'émission et de réception des stations HAPS à hautes performances, un niveau du lobe latéral éloigné de -10 dBi.

TABLEAU 4

L_N (dB)	a	b	α
-20	$2,58 \sqrt{(1 - \log z)}$	6,32	2
-25	$2,58 \sqrt{(1 - 0,8 \log z)}$	6,32	2
-30	–	6,32	–

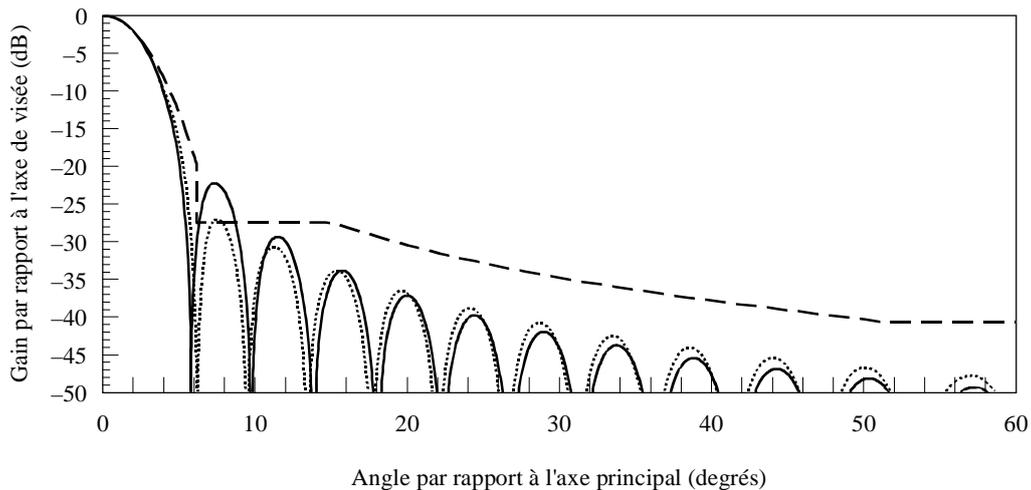
Pour une ouverture du faisceau à 3 dB ($2 \psi_b$) (degrés²):

$$(2 \psi_b)^2 = \frac{27\,000}{10^{0,1G_m}} \quad \text{degrés}^2$$

où G_m est le gain maximal dans le lobe latéral (dBi).

FIGURE 3

Comparaison des diagrammes de rayonnement de référence proposés dans la Recommandation UIT-R S.672 et les diagrammes théoriques pour une ouverture circulaire illuminée par une fonction parabolique surélevée sur un piedestal -10 dB



n : nombre d'éléments d'alimentation utilisés

— $n = 1$

..... $n = 2$

— — — — Recommandation UIT-R S.672

Gain = 30,6 dBi

Illumination du bord = -10 dB

Compte tenu de la Recommandation UIT-R S.672:

$$G_m = 30,62 \text{ dB}$$

$$D/\lambda = 14$$

$$\psi_b = 2,4^\circ$$

$$a\psi_b = 6,2^\circ$$

$$b\psi_b = 15,3^\circ$$

$$\text{Lobe latéral} = -27,5 \text{ dB}$$

$$X = 2,11$$

$$Y = 51,2^\circ$$

$$L_F = -10 \text{ dB}$$

Sur la base d'une géométrie à 700 cellules et d'une réutilisation des fréquences à 7 cellules, le calcul du rapport C/I de crête du modèle hexagonal illuminé par une antenne à faisceaux multiples donne ce qui suit:

TABLEAU 5

Recommandation UIT-R S.672						
Hors axe	Angle	Disque (dB)	Nombre de faisceaux	Brouillage (dB)	Rapport I/C cumulatif (dB)	Rapport C/I cumulatif (dB)
1D	11,12	-27,50	6	-19,72	-19,72	19,72
2D	22,25	-31,58	12	-20,78	-17,21	17,21
3D	33,37	-35,98	18	-23,43	-16,28	16,28
4D	44,50	-39,10	24	-25,30	-15,77	15,77
5D	55,62	-40,62	30	-25,85	-15,36	15,36
Nombre total de faisceaux			90			

On peut estimer que la valeur du rapport C/I la plus défavorable est de 15,36 dB, ce qui se traduit par une limite supérieure de -4,36 dB pour le (I/N) dans le même canal. Cela permettra d'abaisser de 1,36 dB la marge pour la liaison. Ceci est à comparer avec une réduction de 0,414 dB de la marge de liaison lorsque l'on applique le critère habituel selon lequel le brouillage doit être inférieur au bruit d'au moins 10 dB. Etant donné que le diagramme de rayonnement de référence de l'UIT-R correspond à la limite supérieure, le niveau de brouillage effectif dans le même canal peut être considérablement plus bas.

2.7 Réponse du filtre RF et émission hors bande

Pour les liaisons d'utilisateur, on utilise la modulation MDP-4 cohérente, qui produit une densité spectrale de puissance qui décroît quadratiquement par rapport à la fréquence d'émission.

$$S_{MDP-4} = C \cdot A^2 \cdot T_b \left| \frac{\sin(2\pi(f - f_c) \cdot T_b)}{2\pi(f - f_c) \cdot T_b} \right|^2$$

$C \cdot A^2$:	puissance totale du signal en largeur de bande infinie normalisé sur une résistance de 1Ω
f_b :	débit binaire
$T_b = 1/f_b$:	durée du bit
f_c :	fréquence porteuse.

Des techniques de modulation plus élaborées, telles que la modulation FQPSK-FK [Kato et Feher, 1983], permettent une atténuation plus nette et un espacement des fréquences plus grand.

Un filtrage additionnel est nécessaire pour réduire autant que possible le brouillage ISI (intersymbole) et pour réduire davantage les émissions hors bande. On peut le faire au moyen d'un filtre en cosinus surélevé, qui peut être appliqué soit avec des filtres à ondes acoustiques de surface (SAW, *surface acoustic wave*), soit en combinaison avec un filtrage numérique (en bande de base) et un filtrage analogique au moyen d'un ou de plusieurs filtres SAW. Les techniques de filtrage SAW sont extrêmement souples: tout filtre passe-bande linéaire peut être synthétisé, avec une amplitude et une phase arbitraires, limitées uniquement par la largeur du trait et la taille du quartz. Généralement, les filtres SAW de type à transducteur unidirectionnel à simple phase (SPUDT, *single-phase unidirectional transducer*) peuvent affaiblir l'émission hors bande d'une valeur atteignant 60 dB, avec la bande passante plate inférieure à 0,5 dB crête à crête et une ondulation de phase inférieure à 1° . Si l'on ajoute à cela l'affaiblissement de 16 dB ($10 \log 4\pi^2$) du premier lobe latéral de la courbe de densité spectrale de puissance MDP-4, on atteint facilement une réduction de 75 dB des émissions hors bande.

La seule solution pratique possible pour aboutir à une diminution du brouillage du canal adjacent supérieure à 80 dB consiste à utiliser deux filtres SAW en série avec un affaiblissement d'insertion de 6 dB à peine. Il s'agit précisément de la technique utilisée par les fabricants de combinés AMRC pour abaisser à -80 dB le brouillage dans le canal adjacent avec les stations de base du service de communication personnelle. Les filtres SPUDT modernes à faible perte d'insertion ont des caractéristiques de saturation en amplitude et en puissance relativement grandes, et comme il n'est pas nécessaire de pousser le filtre SPUDT jusqu'à saturation pour obtenir une efficacité maximale en puissance, toute projection non linéaire peut être négligée.

2.8 Caractéristiques des émissions radioélectriques des systèmes HAPS

L'organisation de l'utilisation des fréquences dans les systèmes HAPS dépendra des besoins spécifiques de chaque zone de service, ce qui influera sur la largeur de bande, attribuée à une plate-forme individuelle et son groupe de stations au sol associées.

Un système HAPS isolé situé dans une zone éloignée d'autres systèmes HAPS pourrait être équipé de manière à utiliser la largeur de bande totale 2×300 MHz selon le nombre d'utilisateurs abonnés au système.

Un autre scénario, qui se prête davantage aux services HAPS couvrant une zone importante, est celui de la répartition équilatérale d'un certain nombre de plates-formes HAPS fonctionnant dans une configuration réutilisant trois fois la fréquence; autrement dit, que chaque plate-forme utilise 2×100 MHz.

Il existe d'autres scénarios appropriés à d'autres environnements et types de demande.

Considérons, à titre d'exemple, une plate-forme unique fonctionnant à 2×100 MHz. Dans l'hypothèse où les stations d'utilisateur émettent des salves d'informations à 2 Mbit/s et compte tenu du codage, du trafic des services et d'une réutilisation de $7 \times$ la fréquence, la bande de 100 MHz est divisée en 7 intervalles de 11 MHz et une bande de garde de 23 MHz. Chaque intervalle de 11 MHz peut prendre en charge un utilisateur unique au plein débit des salves sur la liaison descendante et

à 1/5^{ème} du plein débit des salves sur la liaison montante, pour un facteur de découpage en canaux de 5 de la liaison montante. Ce découpage en canaux abaisse le rapport de la puissance des salves à la puissance moyenne des stations d'utilisateur, ce qui diminue le coût de ces appareils. Si toutes les plates-formes sont exploitées par le même opérateur, les bandes de garde sont superflues.

Selon le facteur d'activité supposé d'un utilisateur moyen, chaque bande de 11 MHz peut éventuellement desservir à grande vitesse jusqu'à 10 utilisateurs. Chacun bénéficie d'un débit binaire moyen supérieur à 1 Mbit/s, pouvant être poussé en salves à 10 Mbit/s sur la liaison descendante et à 2 Mbit/s sur la liaison montante. Un partage efficace du temps entre les utilisateurs est obtenu par un système d'accès multiple rapide avec assignation à la demande qui réattribue dynamiquement les canaux des utilisateurs au vol, toutes les 20 ms.

Dans chacune des zones urbaine, suburbaine et rurale il y a 700 cellules. En conséquence, dans une zone UAC, la densité de puissance des stations d'utilisateur est de $-8,2$ dB(W/2 MHz), multipliée par 100 fois la réutilisation des fréquences et modifiée par le diagramme de rayonnement du lobe latéral de la station d'utilisateur. Dans une zone SAC, la valeur maximale atteint $-7,0$ dB(W/2 MHz) fois 100, et dans une zone RAC elle atteint $-1,55$ dB(W/2 MHz) fois 100.

Pour acheminer ce trafic concentré, il faut 20 stations d'accès par zone UAC et SAC. Celles-ci fonctionnent en modulation MAQ-64 sur une largeur de bande de 88 MHz (100 MHz moins 12 MHz), chacune avec une densité de puissance d'environ -8 dB(W/2 MHz) pour les stations d'accès dans les zones urbaines et de 4 dB(W/2 MHz) dans les zones suburbaines et rurales. Si l'on exclut la correction d'erreur directe, le verrouillage et les autres préfixes, la modulation MAQ-64 peut offrir environ 4 bit/s/Hz d'efficacité spectrale, soit 352 Mbit/s par station d'accès. Les 20 stations d'accès par zone offriront donc 14,8 Gbit/s de débit d'accès ou 60% du trafic d'utilisateur maximum pouvant être pris en charge.

Les émissions depuis la plate-forme utilisent toute la largeur de bande disponible avec partage du temps et de la fréquence et une densité de puissance de $20,6$ dB(W/2 MHz). Cela est fondé sur une densité de puissance estimée, tant pour les liaisons d'utilisateur que pour les liaisons de stations d'accès. Dans le cas des liaisons d'utilisateur, la densité de puissance est de 0 dB(W/11 MHz) dans les zones UAC et SAC, et de $2,2$ dB(W/11 MHz) dans les zones RAC. Dans le cas des stations d'accès, la densité de puissance est de 0 dB(W/11 MHz) dans les zones UAC et de $9,7$ dB(W/11 MHz) dans les zones SAC. La puissance totale RF de la plate-forme est d'environ 10 kW.

2.9 Exemple de calcul de bilan de liaison

Un calcul de bilan de liaison représentatif est présenté ci-dessous. Les gains de l'antenne de la plate-forme pour les liaisons de station d'utilisateur sont les gains d'antenne au bord des cellules, inférieurs de 3 dB au gain maximal de l'antenne. Le rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ requis est fondé sur une modulation MPD-4 et un code de convolution 2/3 de $k = 7$ pour un TEB inférieur à 1×10^{-7} . Les débits d'utilisateur incluent les préfixes pour tenir compte des en-têtes ATM et les informations de verrouillage. L'affaiblissement dû à la pluie est fondé sur une disponibilité supérieure à 99,5% donnée par les statistiques de l'UIT-R pour la Région K. Le rapport G/T du récepteur est déterminé pour une température de bruit du récepteur de 900 K dans le cas des stations d'utilisateur et des stations d'accès et de 500 K dans le cas des plates-formes.

TABLEAU 6
Liaisons de station d'utilisateur

	UAC	UACF	SAC	SAC	RAC	RAC
	MRT descendant	AMRF montant	MRT descendant	AMRF montant	MRT descendant	AMRF montant
Fréquence (GHz)	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0
Largeur de bande (MHz)	11,0	2,0	11,0	2,0	11,0	2,0
Puissance d'émission (dBW)	1,3	-8,2	1,3	-7,0	3,5	-1,5
Gain d'antenne (dBi)	27,0	23,0	27,0	38,0	38,0	38,0
Atténuation hybride (H)/guide d'onde (W) (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
p.i.r.e. (dBW)	27,8	14,3	27,8	30,6	41,0	36,1
Distance oblique (km)	42,0	42,0	81,1	81,1	240,9	240,9
Affaiblissement en espace libre (dB)	158,3	158,5	164,1	164,3	173,5	173,7
Affaiblissement atmosphérique (dB)	2,3	2,8	5,2	5,8	6,3	7,7
Affaiblissement dû à la pluie (dB)	11,2	11,2	14,8	14,9	20,2	22,4
Puissance surfacique au sol (dB(W/m ² · MHz))	-99,6	-	-111,8	-	-114,5	-
Rapport G/T du récepteur (dB(K ⁻¹))	-6,5	0,0	8,5	0,0	8,5	11,1
Affaiblissement de polarisation (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Constante de Boltzmann (dB(W/K))	-228,6	-228,6	-228,6	-228,6	-228,6	-228,6
Débit (dB(Hz))	70,0	63,1	70,0	63,1	70,0	63,1
Rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ ($I = 0$) (dB)	7,5	6,8	10,3	10,6	7,6	8,3
Rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ requis (dB)	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
Marge (dB)	1,4	0,7	4,2	4,5	1,5	2,2

Dans le cas des stations d'accès, on utilise la commande de puissance adaptative pour combattre l'affaiblissement dû à la pluie. Chaque amplificateur de puissance de station d'accès peut augmenter sa puissance d'un maximum de 4 dB pour les liaisons qui sont les plus fortement touchées par la pluie. Cela produit un gain de commande de puissance de 4 dB. Les liaisons des stations d'accès sont à 44 Mbit/s par porteuse. Le rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ requis pour la station d'accès est fondé sur une modulation MAQ-64 avec codage convolutionnel de taux 4/5 ($k = 9$) concaténé avec un code extérieur Reed-Solomon à débit élevé avec codage à entrelacement long pour aboutir à un TEB plus favorable que 1×10^{-10} (voir la Note 1).

NOTE 1 – Il convient de noter que la profondeur de l'entrelaceur sera plusieurs centaines de fois la longueur de contrainte du code de convolution et qu'il a pour objet de mettre sous forme aléatoire les salves d'erreur produites par le décodeur de Viterbi.

TABLEAU 7
Liaisons des stations d'accès

	UAC	UAC	SAC	SAC
	MRT descendant (par porteuse)	MRT montant (par porteuse)	MRT descendant (par porteuse)	AMRF montant (par porteuse)
Fréquence (GHz)	47,0	48,0	47,0	48,0
Largeur de bande (MHz)	11,0	11,0	11,0	11,0
Puissance d'émission (dBW)	0,0	1,7	9,7	13,4
Gain d'antenne (dBi)	35,0	46,0	38,0	46,0
Atténuation H/W (dB)	8,5	8,5	8,5	8,5
p.i.r.e. (dBW)	26,5	39,3	39,2	50,9
Distance oblique (km)	42,0	42,0	81,1	81,1
Affaiblissement en espace libre (dB)	158,3	158,5	164,1	164,3
Affaiblissement atmosphérique (dB)	2,3	2,8	5,2	5,8
Affaiblissement dû à la pluie (dB)	11,2	11,2	14,8	14,9
Gain de régulation de puissance (dB)	4,0	4,0	4,0	4,0
Puissance surfacique au sol (dB(W/(m ² · MHz))	-96,8	-	-96,4	-
Rapport G/T du récepteur (dB (K ⁻¹))	16,5	5,5	16,5	8,5
Affaiblissement de polarisation (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5
Constante de Boltzmann (dB(W/K))	-228,6	-228,6	-228,6	-228,6
Débit (dB(Hz))	76,4	76,4	76,4	76,4
Rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ ($I = 0$) (dB)	26,8	27,9	27,3	30,1
Rapport $E_b/(N_0 + I_0)$ requis (dB)	20,3	20,3	20,3	20,3
Marge (dB)	6,5	7,6	7,0	9,8