

RECOMMANDATION UIT-R F.1102

**CARACTÉRISTIQUES DES FAISCEAUX HERTZIENS FONCTIONNANT
DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SUPÉRIEURES À 17 GHz ENVIRON**

(Question UIT-R 107/9)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ sont attribuées au service fixe et à d'autres services;
- b) que les caractéristiques de propagation dans les bandes supérieures à 17 GHz environ dépendent essentiellement des évanouissements et de l'absorption dus aux précipitations et ne conviennent que pour les applications à courte portée des faisceaux hertziens;
- c) que les applications différentes selon les administrations peuvent nécessiter l'emploi de dispositions différentes des canaux radioélectriques;
- d) que plusieurs services, dont les caractéristiques des signaux de transmission et la capacité diffèrent, peuvent être exploités simultanément dans la même bande de fréquences;
- e) que les diverses applications peuvent nécessiter des largeurs de bande différentes,

recommande

1. de tenir compte, dans la conception du système, des effets des interruptions de service dues aux précipitations, car celles-ci déterminent de manière décisive la longueur des bonds;
2. d'utiliser les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ pour les applications à courte portée, ce qui permettra de faire appel à des équipements peu encombrants dotés de petites antennes;
3. d'élaborer les dispositions des canaux radioélectriques sur la base des plans de fréquences homogènes définis dans la Recommandation UIT-R F.746, de façon à permettre l'emploi de systèmes hybrides et d'utiliser au mieux le spectre;
4. d'appliquer les techniques de modulation numérique et analogique à large bande;
5. d'utiliser l'Annexe 1 comme référence pour obtenir des indications sur la conception du système.

ANNEXE 1

**Caractéristiques des faisceaux hertziens fonctionnant
dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ****1. Introduction**

Quelques attributions ont été faites, à l'échelle mondiale, au profit des services fixes dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ. A ces fréquences, la principale source d'interruption est l'affaiblissement dû aux précipitations, qui dure plus de 10 s. En conséquence, la disponibilité et la longueur du trajet entre l'émetteur et le récepteur (longueur d'un bond) qui peuvent être obtenues sont des paramètres particulièrement importants pour la mise en œuvre de ces systèmes. Ces paramètres sont étudiés dans la présente Annexe pour les systèmes qui sont d'usage courant dans les réseaux locaux.

2. Applications

2.1 Accès local/réseaux locaux

Les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ sont surtout utilisées pour assurer des liaisons à courte portée. Les équipements radioélectriques, peu encombrants et très fiables, peuvent transmettre des signaux vocaux, des données, des signaux vidéo et des données à bande large.

Les principales applications sont les suivantes:

- interconnexion de réseaux locaux,
- interconnexion directe entre réseaux locaux (IEEE 802.3/Ethernet et IEEE 802.5/Anneau à jeton), avec une capacité de transmission de l'ordre de 10 Mbit/s,
- liaisons d'abonné,
- liaisons numériques de groupe primaire ou de données à grande vitesse du central d'extrémité aux bâtiments de l'utilisateur,
- téléphonie cellulaire,
- interconnexion entre centraux téléphoniques cellulaires et stations de base,
- opérations de secours,
- équipements de radiocommunication transportables utilisés en liaison de secours, en cas de défaillance des systèmes à fibres optiques ou des autres circuits de Terre,
- fermeture d'anneau ou connexion point à point dans le réseau d'accès SDH.

Ces applications sont classées par catégories dans le Tableau 1.

TABLEAU 1
Catégories d'applications

	Configuration de la liaison physique	Capacité de transmission	Contenu du signal	Longueur des bonds
Interconnexion de réseaux locaux	Usager-bâtiment de l'utilisateur	De l'ordre de 10 Mbit/s	Données	De plusieurs dizaines de mètres à 1 km
Liaisons d'abonné	Du central d'extrémité au bâtiment de l'utilisateur	Analogique ou groupe primaire numérique (1,5 ou 2 Mbit/s) $\times N$ – ou capacité PDH supérieure	Données ou vidéo	De plusieurs kilomètres à des dizaines de kilomètres
Téléphonie intercellulaire	Entre central téléphonique du système intercellulaire et station radioélectrique de base	1 à 10 Mbit/s	Signaux vocaux ou données	De plusieurs kilomètres à des dizaines de kilomètres
Équipements transportables destinés aux opérations de secours (Note 1)	Système de secours pour les liaisons par fibres optiques	Analogique ou groupe primaire numérique – ou capacité PDH supérieure ou SDH	Signaux vocaux, données ou vidéo	De plusieurs kilomètres à des dizaines de kilomètres
Réseau d'accès SDH	Fermeture de boucle MDA/interconnexion ou ramifications	SDH	Conteneurs virtuels (Vc)	De plusieurs kilomètres à des dizaines de kilomètres

MDA: multiplexeur d'insertion/extraction

PDH: hiérarchie numérique plésiochrone

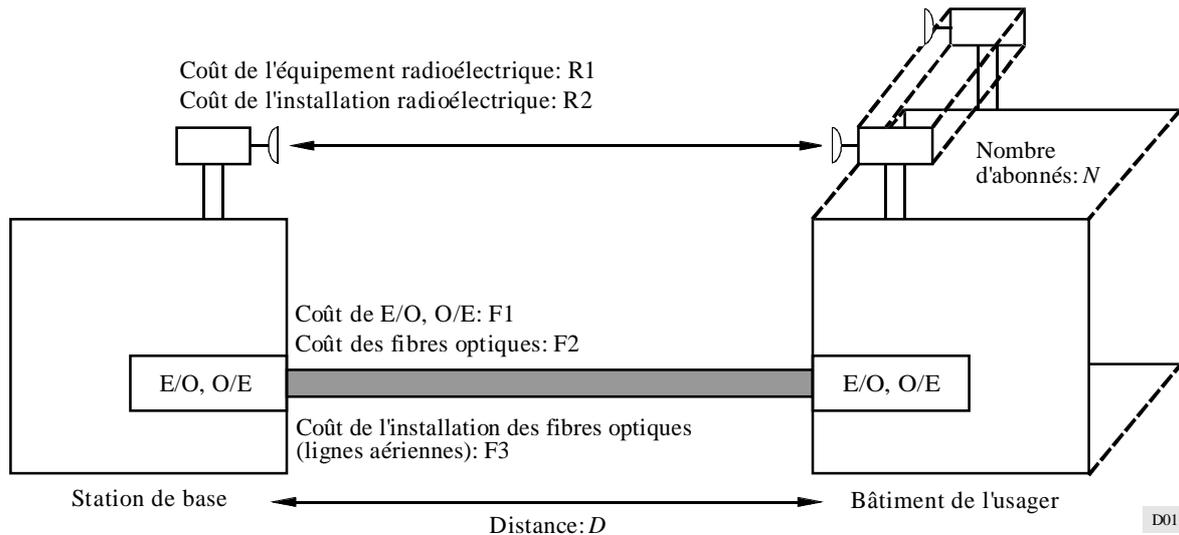
SDH: hiérarchie numérique synchrone

Note 1 – Voir la Recommandation UIT-R F.1105.

2.2 Système à fibres optiques et liaisons radioélectriques dans les circuits locaux: comparaison des coûts

Pour mettre en place un système à fibres optiques, il faut réaliser des travaux en permanence le long du trajet du câble, alors que pour les systèmes radioélectriques, ces travaux ne sont nécessaires qu'aux stations d'émission et de réception. En conséquence, plus les emplacements sont éloignés les uns des autres, plus le système à fibres optiques est onéreux. On trouvera une comparaison des coûts dans le modèle simple présenté sur la Fig. 1.

FIGURE 1
Modèle pris pour hypothèse



Le coût R de la mise en place d'un système radioélectrique est donné par la formule:

$$R = (R_1 + R_2) N$$

Le coût F de la mise en place d'un système à fibres optiques est donné par la formule:

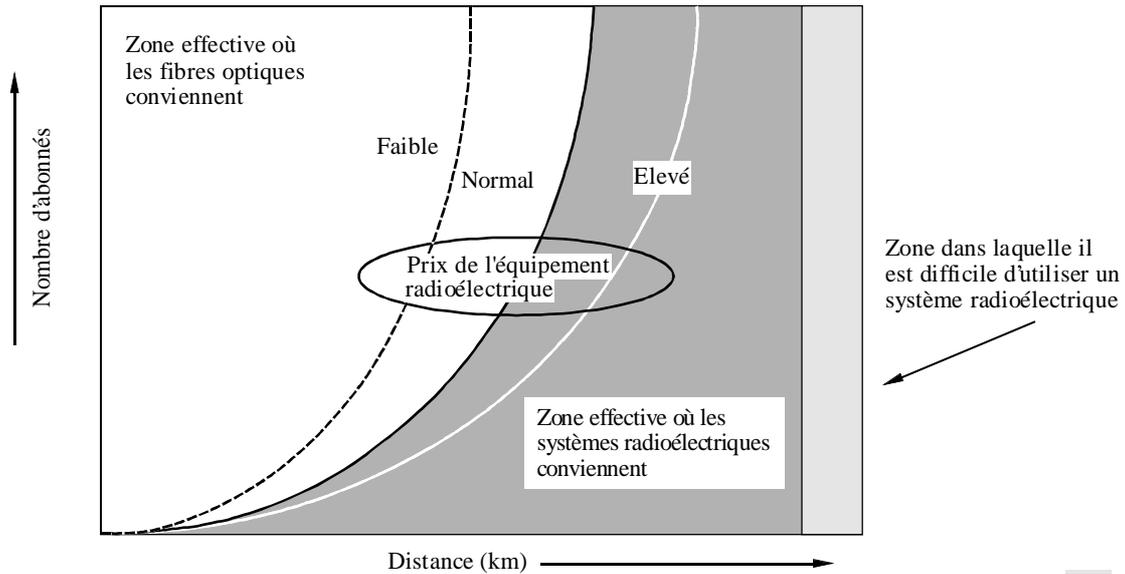
$$F = F_1 N + (F_2 + F_3) N D$$

La Fig. 2 donne le résultat de la comparaison des coûts: pour le même nombre d'abonnés, plus la distance augmente, plus le coût du système radioélectrique est faible par rapport à celui du système à fibres optiques. En outre, pour la même distance, les systèmes radioélectriques sont avantageux lorsqu'il y a peu d'abonnés. De plus, le domaine d'application des systèmes radioélectriques augmente nettement quand la distance augmente.

Si l'on ne tient compte que des coûts, le domaine d'application s'étend proportionnellement à la distance. Toutefois, il faut également tenir compte du fait que la distance de propagation des systèmes radioélectriques utilisant des bandes de fréquences au-dessus de 17 GHz environ est limitée par l'affaiblissement dû à la pluie. En conséquence, on aura tendance à privilégier les systèmes à fibres optiques pour assurer des liaisons à courte portée à plusieurs bonds, encore qu'en général, il y ait peu de systèmes à plusieurs bonds dans les circuits locaux. Dans la pratique, on optera pour les éléments des deux systèmes qui se prêtent le mieux, du point de vue des coûts et de la commodité, à la partie considérée de l'application.

FIGURE 2

Résultats de la comparaison des coûts entre systèmes à fibres optiques et systèmes radioélectriques



2.3 Rapidité d'installation

L'une des caractéristiques des systèmes radioélectriques est qu'ils peuvent être mis en service rapidement. Par contre, pour les systèmes à fibres optiques, il faut poser des fibres entre les emplacements où les communications seront assurées, ce qui prend beaucoup de temps jusqu'à la mise en service des lignes. En particulier, la période de mise en place est nettement plus longue pour les fibres optiques enterrées que pour celles qui sont montées sur des pylônes. Il arrive même que la pose des fibres soit impossible en raison de l'incapacité d'obtenir un droit de passage. Le recours aux liaisons radioélectriques pour faciliter l'installation de systèmes de télévision par câble dans de telles situations est une application connue de cette caractéristique. Toutefois, le délai de mise en service des systèmes radioélectriques est très court, car les travaux ne sont nécessaires qu'aux emplacements où les communications seront assurées, ce qui permet de mettre en service les circuits en quelques heures. Bien que l'application des procédures de planification, d'octroi de licences et de dégagement des emplacements concernant les liaisons se traduise par des délais de mise en service plus longs, il est probable que ces délais resteront beaucoup plus courts que pour les liaisons par fibres optiques.

Dans les systèmes radioélectriques, il est nécessaire de s'assurer des conditions de visibilité directe. On mène actuellement des travaux sur le calcul de la visibilité directe assisté par ordinateur, en créant des bases de données sur les caractéristiques géographiques et les bâtiments. A cet effet, il sera peut-être utile de prévoir une procédure de réglage rapide de l'antenne.

L'un des atouts des équipements radioélectriques est la facilité relative avec laquelle ils peuvent être reconfigurés. Les systèmes radioélectriques transportables se prêtent mieux aux communications de secours rapide, notamment en cas de catastrophes et de défaillances des liaisons et événements semblables.

3. Considération sur la longueur des bonds

Il n'est pas possible de définir une caractéristique universelle longueur des bonds/fréquence, mais on peut utiliser les paramètres suivants pour définir les objectifs de disponibilité sur la longueur des bonds:

- *Affaiblissement linéique en espace libre:* A_0 (dB/km)
 - dépend de la fréquence (voir la Recommandation UIT-R PN.525).
- *Affaiblissement linéique dû à l'absorption par les gaz (O_2 et H_2O):* A_α (dB/km)
 - dépend de la fréquence dans les gammes de fréquences pertinentes (voir la Recommandation UIT-R PN.676).

- *Gain isotrope de l'antenne:* G_i (dB)
 - constante dépendant du modèle d'antenne retenu; il n'existe pas de limite supérieure théorique, mais on fixe une limite pour des raisons pratiques de pointage en visibilité directe, en utilisant l'ouverture du faisceau (qui n'est en général pas inférieure à 1°).

La limite supérieure obtenue en pratique est donc: $G \cong 40$ dBi.
- *Puissance d'émission:* P_T (dBm)
 - dépend des techniques disponibles en matière de génération et d'amplification de la porteuse RF et des conditions de linéarité imposées au format de modulation.
- *Seuil du taux d'erreur binaire (TEB):* P_{Th} (dBm)
 - concerne le TEB auquel est défini l'objectif de disponibilité. Ce paramètre a trait au facteur de bruit du récepteur, au débit binaire à l'émission et à la valeur du rapport porteuse/bruit du format de modulation.
- *Affaiblissement dû à la pluie pendant le pourcentage de temps visé:* $R|_{\%}$ (dB)
 - estimé sur la base de l'intensité de précipitation pendant le pourcentage du temps d'indisponibilité, à l'aide de la méthode décrite dans les Recommandations UIT-R PN.530 et UIT-R PN.838 et des statistiques figurant dans la Recommandation UIT-R PN.837.

Les paramètres susmentionnés peuvent être subdivisés en deux groupes (voir la Note 1):

- Un «gain du bond», HG , fixe, dépendant de la mise en œuvre et constant:

$$HG = 2G_i + |P_{Th}| + P_T \quad \text{dB} \quad (1)$$

- Un «affaiblissement du bond» ($HA|_{\%}$), dépendant du taux de précipitation ou de la fréquence pendant un pourcentage de temps donné sur la longueur ℓ (km) du bond (voir la Recommandation UIT-R PN.530):

$$HA|_{\%} = R|_{\%} + (A_0 + A_{\alpha}) \ell \quad \text{dB} \quad (2)$$

Cette méthode permet d'établir des graphiques analogues à ceux des Fig. 3-5 (calculés à titre d'exemple pour les zones climatiques B, G et K en utilisant comme paramètres la fréquence et le pourcentage d'indisponibilité ($U\%$)) et d'obtenir la longueur maximale du bond pour la mise en œuvre, la fréquence et la zone climatique considérées et pendant le pourcentage de temps visé.

Note 1 – Etant donné que les systèmes radioélectriques fonctionnant au-dessus de 17 GHz utilisent généralement des antennes intégrées, on ne tient pas compte, dans ces hypothèses, des pertes en guides d'ondes. En cas de liaisons de connexion par guide d'ondes entre l'équipement et l'antenne, les pertes dans les guides se traduiront par une baisse du gain du bond.

4. Mise en œuvre des faisceaux hertziens numériques

Compte tenu des contraintes liées à ces applications, du spectre disponible, des conditions de propagation et des techniques disponibles au-dessus de 17 GHz environ, les équipements utilisés diffèrent beaucoup de ceux qu'on emploie au-dessous de 17 GHz environ. Toutefois, le passage aux bandes de fréquences 13, 15, 18 et 23 GHz se fait progressivement et sans heurt.

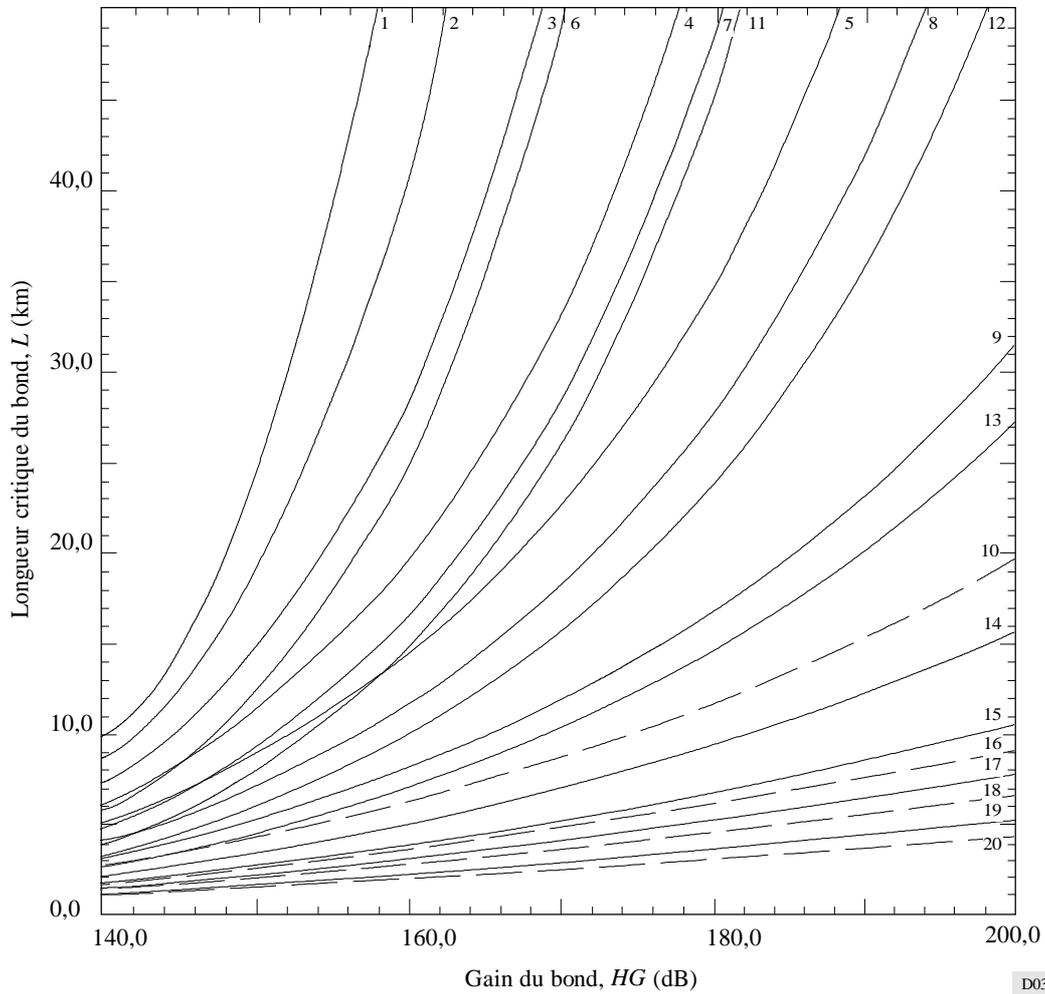
Les principales caractéristiques des applications numériques au-dessus de 17 GHz environ sont les suivantes:

- nombreuses possibilités de transmission,
- moindre efficacité d'utilisation du spectre,
- subdivision des équipements dans un ensemble extérieur, comprenant un équipement radioélectrique d'entrée raccordé à l'antenne, et un ensemble intérieur où se trouvent les sous-ensembles de la bande de base et, très souvent, les sous-ensembles de la fréquence intermédiaire. Ce dispositif permet d'éviter les pertes introduites par les lignes d'alimentation en guide d'ondes – qui pourraient être trop fortes – et offre une grande souplesse pour le montage des équipements, l'interconnexion en bande de base et/ou à la fréquence intermédiaire entraînant peu de pertes.

FIGURE 3

**Longueur critique du bond en fonction du gain du bond
pour la zone climatique B avec polarisation horizontale**

Angle de polarisation: 0°



Courbe	f (GHz)	U %
1	18	0,1
2	18	0,03
3	18	0,01
4	18	0,003
5	18	0,001
6	28	0,1
7	28	0,03
8	28	0,01
9	28	0,003
10	28	0,001
11	38	0,1
12	38	0,03
13	38	0,01
14	38	0,003
15	38	0,001
16	55	0,1
17	55	0,03
18	55	0,01
19	55	0,003
20	55	0,001

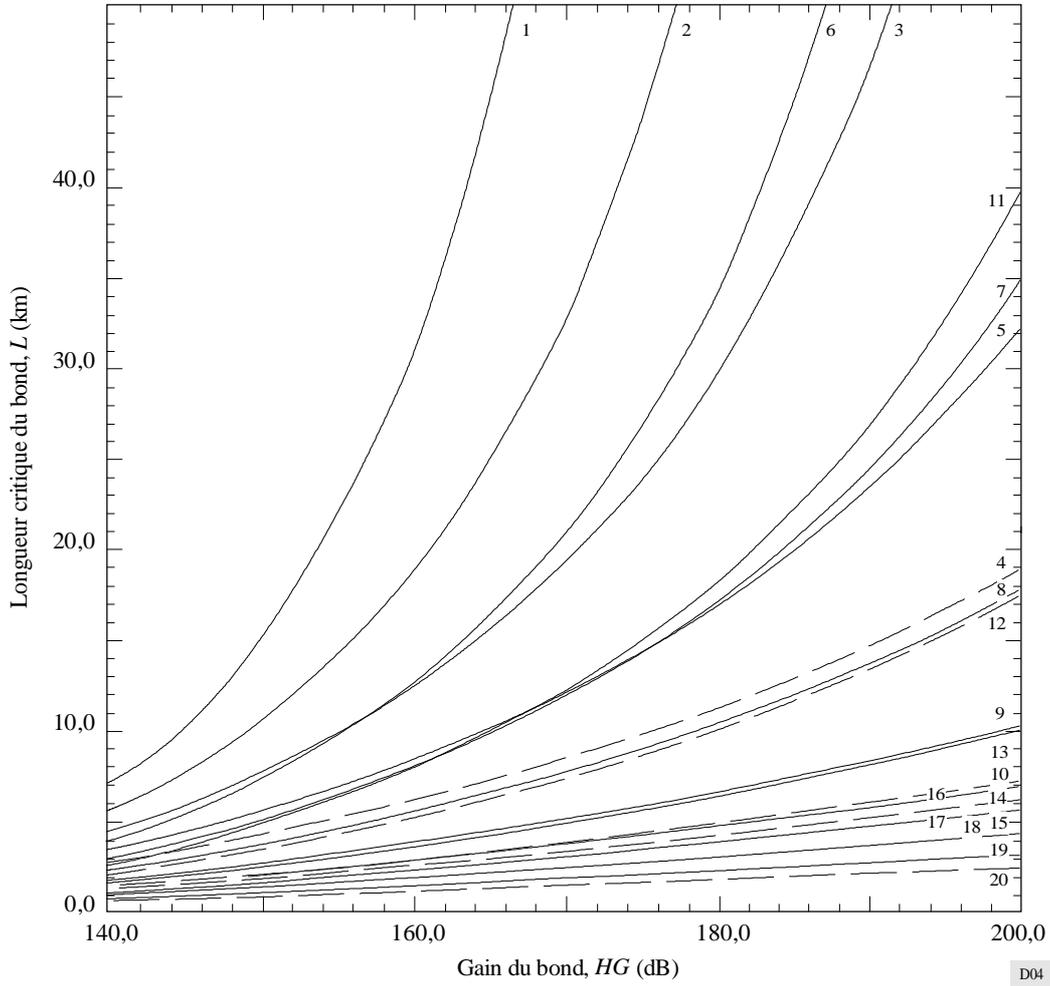
U : indisponibilité (%)

D03

FIGURE 4

Longueur critique du bond en fonction du gain du bond
pour la zone climatique G avec polarisation horizontale

Angle de polarisation: 0°



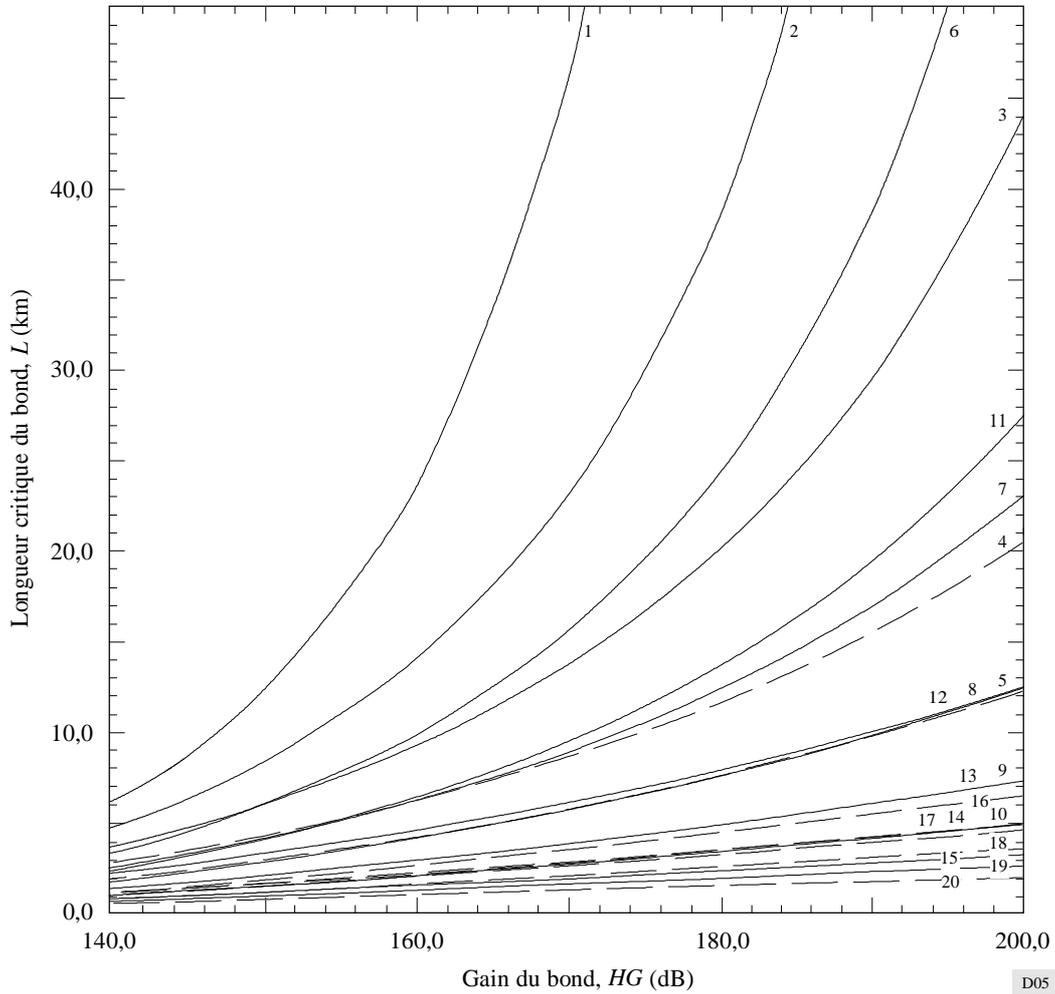
Courbe	f (GHz)	U %
1	18	0,1
2	18	0,03
3	18	0,01
4	18	0,001
5	18	0,003
6	28	0,1
7	28	0,03
8	28	0,01
9	28	0,001
10	28	0,003
11	38	0,1
12	38	0,03
13	38	0,01
14	38	0,001
15	38	0,003
16	55	0,1
17	55	0,03
18	55	0,01
19	55	0,001
20	55	0,003

U : indisponibilité (%)

FIGURE 5

Longueur critique du bond en fonction du gain du bond
pour la zone climatique K avec polarisation horizontale

Angle de polarisation: 0°



Courbe	f (GHz)	$U\%$
1	18	0,1
2	18	0,03
3	18	0,01
4	18	0,001
5	18	0,003
6	28	0,1
7	28	0,03
8	28	0,01
9	28	0,001
10	28	0,003
11	38	0,1
12	38	0,03
13	38	0,01
14	38	0,001
15	38	0,003
16	55	0,1
17	55	0,03
18	55	0,01
19	55	0,001
20	55	0,003

U : indisponibilité (%)

4.1 *Choix de conception*

Les choix de conception sont relativement complexes en raison des nombreuses interdépendances, mais dans un souci de simplification, on peut subdiviser de plusieurs manières les critères à retenir pour opérer ces choix, selon les objectifs d'optimisation fixés.

A titre d'exemple, il est utile d'établir une distinction entre les critères de qualité de service et les critères de convivialité, comme l'indique le Tableau 2.

TABLEAU 2

Qualité de service	Convivialité
Qualité de transmission Gain du système Efficacité d'utilisation du spectre Rendement de puissance	Souplesse d'emploi de l'application Facilité de maintenance Taille et poids Protection de l'environnement

Le cas échéant, on peut modifier ces critères: ainsi, pour une combinaison donnée de capacité et de qualité de transmission, il s'agit surtout de trouver un compromis en matière de qualité de service, entre le gain du système et l'efficacité d'utilisation du spectre. S'il existe des possibilités d'amélioration (correction d'erreur par exemple), le sous-ensemble de critères augmente et offre davantage de souplesse sur le plan de la conception.

D'autres critères de conception peuvent relever des deux catégories: ainsi, la durée moyenne entre interruptions concerne tant la qualité de service que la convivialité.

Le plus souvent, les utilisateurs bien informés seront à même de reconnaître les choix de conception fondamentaux de la fiche technique de l'équipement, mais dans certains cas, ils auront besoin de renseignements supplémentaires pour pouvoir évaluer parfaitement l'équipement considéré.

Le responsable de la conception de l'équipement doit s'acquitter d'une lourde tâche, à savoir adapter les objectifs de qualité de la transmission à l'ensemble correspondant des objectifs nominaux de l'équipement. La question est traitée dans la Recommandation UIT-T M.2100.

4.2 *Traitement des signaux en bande de base*

Les systèmes radioélectriques fonctionnant dans les bandes de fréquences au-dessus de 17 GHz environ sont généralement dotés, dans l'ensemble intérieur, des fonctions nécessaires de traitement des signaux en bande de base.

Au nombre de ces fonctions figurent le multiplexage de groupe, pour des capacités supérieures aux fonctions du groupe primaire PDH ou aux fonctions SDH, et, le plus souvent, les fonctions de commande (ligne d'ordre). Les applications spécifiques varient considérablement.

La correction d'erreur est utilisée pour améliorer la qualité de transmission et le gain du système.

4.3 *Génération et stabilisation de la porteuse*

En principe, et dans un souci de simplicité, on utilise de préférence la génération de la fréquence fondamentale. Toutefois, la disponibilité de composants hyperfréquences actifs pour la production directe de fréquence fondamentale est moins grande pour les fréquences les plus élevées, et le coût de ces composants augmente avec la fréquence. Il est parfois préférable (cette décision dépend des progrès techniques) de générer une sous-harmonique et de la multiplier à la fréquence porteuse.

Le choix de la méthode de stabilisation de la fréquence porteuse dépend de l'application. On peut réaliser des systèmes radioélectriques à moindre coût avec des tolérances de fréquence extrêmement grandes en utilisant des oscillateurs libres stabilisés par résonateur. L'adjonction d'une fonction de régulation thermique assure des tolérances de fréquence plus strictes – qui restent cependant modérées – pour des applications plus contraignantes. L'application la plus contraignante, du point de vue de la stabilité de fréquence, exige l'emploi d'oscillateurs à quartz. Les fabricants et les utilisateurs donnent la préférence aux réalisations qui prévoient l'utilisation de synthétiseurs de fréquence.

4.4 *Formats de modulation de la porteuse*

Pour assouplir les exigences en matière d'efficacité d'utilisation du spectre au-dessus de 17 GHz et utiliser ainsi des formats de modulation numérique plus simples qu'au-dessous de 17 GHz, on peut:

- procéder à des attributions de bandes de fréquences plus importantes,
- faire une plus large place aux systèmes radioélectriques de faible coût.

Le recours à des formats de modulation plus simples (2 ou 4 états) permet d'obtenir des gains de système plus élevés, ce qui est essentiel compte tenu de la persistance des évanouissements dus aux précipitations dans la gamme de fréquences au-dessus de 17 GHz. Toutefois, on peut utiliser, au besoin, des formats de modulation à nombre d'états plus élevés, pour des raisons techniques ou réglementaires.

On trouvera un aperçu des formats de modulation numérique dans l'Annexe 1 à la Recommandation UIT-R F.1101.

4.5 *Fonctions d'émission et de réception de base des systèmes radioélectriques*

La mise en œuvre des fonctions d'émission et de réception dépend des choix de conception qui ont été faits compte tenu des principes indiqués au § 4.1. Les différences observées dans les équipements pour une même application témoignent de la diversité des choix «marketing» des fabricants, de la gamme des produits, des moyens techniques internes, des fournisseurs de composants, sans parler des préférences subjectives en matière de conception.

Les principales différences de conception de systèmes radioélectriques pour une même application tiennent au choix de la modulation de la porteuse d'émission (directe ou indirecte) et au nombre de conversions de la fréquence intermédiaire dans le récepteur. En principe, plus le format de modulation est simple, plus la modulation directe de la porteuse est facile à mettre en œuvre. Le nombre de conversions FI dans le récepteur dépend essentiellement de la sélectivité nécessaire, de l'existence de composants de circuits intégrés et de l'agilité à prévoir pour les canaux RF (par exemple, avec un synthétiseur).

La plupart des applications radioélectriques numériques au-dessus de 17 GHz sont assurées dans des systèmes de distribution locale et exigent peu de répéteurs, voire aucun. La connexion de terminaux tête-bêche est directe, mais certains répéteurs RF passifs ou actifs représentent une solution d'un bon rapport coût-efficacité lorsqu'aucune fonction de dérivation/insertion n'est nécessaire. Les répéteurs RF actifs peuvent utiliser ou non la conversion de fréquence, selon ce qu'il conviendra.

4.6 *Fonctions de surveillance et dispositions de secours*

Les diverses générations de systèmes radioélectriques numériques qui se sont succédé ont été dotées de fonctions de surveillance et de moyens de gestion du réseau de plus en plus perfectionnés, comme la surveillance du TEB, le bouclage local et distant et l'affichage local de la télésurveillance. On peut utiliser des terminaux portatifs comme autre mise en œuvre spécialisée possible. Les ordinateurs personnels et les ordinateurs portatifs utilisant des logiciels propres à des constructeurs sont utilisés pour la gestion centralisée du réseau.

On peut prévoir, au besoin, des dispositions en matière de secours pour obtenir la fiabilité et/ou la disponibilité voulue. Parmi ces dispositions, citons:

- la diversité d'acheminement,
- une réserve active contrôlée,
- une réserve active contrôlée, avec diversité de fréquence, de polarisation ou d'espace.

4.7 *Conclusion*

La demande croissante de systèmes radioélectriques numériques au-dessus de 17 GHz encourage la mise au point en permanence de nouvelles générations d'équipements qui assurent une meilleure qualité de service et une plus grande convivialité à moindre coût. En outre, il devient possible d'utiliser des systèmes présentant un bon rapport coût-efficacité dans des bandes de fréquences de plus en plus élevées.

Cette évolution a été possible grâce aux progrès techniques continus qui ont été accomplis dans le domaine des dispositifs hyperfréquences actifs, en particulier les transitions à effet de champ, les circuits intégrés hyperfréquences monolithiques et les réalisations à circuits intégrés des fonctions de la fréquence intermédiaire et de la bande de base et des fonctions auxiliaires.