

RECOMMANDATION UIT-R S.1061*

Utilisation de stratégies et de techniques de protection contre les évanouissements dans le service fixe par satellite

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'étant donné la pression qu'exerce sur un spectre des fréquences radioélectriques limité une demande croissante de services par satellite, on a de plus en plus recours à des bandes de fréquences plus élevées;
- b) que l'emploi des bandes de fréquences plus élevées pour les systèmes à satellites a notamment pour grave inconvénient le fort affaiblissement du signal dû à la pluie;
- c) qu'il peut être difficile de parvenir pour les voies de transmission par satellite, à la qualité spécifiée dans les Recommandations UIT-R S.353, UIT-R S.522, UIT-R S.614 et UIT-R S.579 dans des conditions économiques en recourant uniquement à la marge de puissance;
- d) qu'on a mis au point pour faire face à l'affaiblissement par la pluie plusieurs systèmes d'une qualité et d'une complexité telles que leur applicabilité dépend du type de réseau en cause,

recommande

1 que le texte de l'Annexe 1 ci-après fournisse des indications pour planifier l'utilisation de techniques de protection contre les évanouissements dans le service fixe par satellite.

NOTE 1 – Il convient de noter que ces techniques peuvent même être combinées pour autant qu'il n'existe pas d'incompatibilités entre elles.

ANNEXE 1

Protection contre les évanouissements dans les systèmes de télécommunication par satellite**1 Fonctionnement en diversité d'emplacement****1.1 Considérations générales en matière de conception**

La qualité de fonctionnement requise pour les stations terriennes en diversité dépend non seulement des zones hydrométéorologiques mais aussi de la configuration des stations terriennes fonctionnant en diversité d'emplacement. Le premier type de configuration est la diversité symétrique, c'est-à-dire la diversité par deux stations terriennes ayant la même qualité de fonctionnement. L'autre configuration est la diversité dissymétrique dans laquelle la qualité de fonctionnement d'une station

* La Commission d'études 4 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2001 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44 (AR-2000).

terrienne (station principale) est suffisamment élevée pour permettre de réduire considérablement la qualité de fonctionnement spécifiée pour l'autre station (sous-station). Ce type de configuration en diversité est prévu lorsque l'antenne principale de la station est dotée d'un système d'alimentation à bandes de fréquences multiples, telles que les bandes des 6/4 GHz et des 14/11 GHz et/ou lorsque la sous-station doit être simplifiée pour des raisons techniques ou opérationnelles.

Le Tableau 1 récapitule, à titre d'exemple, les résultats des calculs du diamètre de l'antenne et de la puissance maximale d'émission requise pour des liaisons en diversité symétrique avec de faibles angles d'élévation. On y trouve les estimations correspondant aux deux liaisons en diversité supposées: (A) Yamaguchi-Hofu (distance de diversité = 20 km) et (B) Yamaguchi-Hamada (100 km), toutes deux au Japon.

Ce Tableau montre que les diamètres d'antenne requis pour la liaison MF à 14/11 GHz (14 GHz pour la liaison montante et 11 GHz pour la liaison descendante) sont de l'ordre de 28 m et 19 m pour (A) et (B) respectivement. Lorsqu'on peut augmenter le diamètre de la station principale par rapport à ces valeurs, le diamètre requis pour la sous-station diminue. Les valeurs indiquées dans ce Tableau ont été obtenues à l'aide de nombreuses caractéristiques de liaison établies pour les satellites Intelsat-V, en conséquence ces valeurs peuvent varier lorsque les paramètres de la liaison diffèrent de ceux utilisés dans la présente Annexe.

TABLEAU 1

Exemple de calculs des qualités de fonctionnement requises pour des liaisons en diversité symétrique et de faibles angles d'élévation (14/11 GHz)

| Emplacement | (A) Yamaguchi-Hofu | | (B) Yamaguchi-Hamada | |
|--|--------------------|-----|----------------------|-----|
| Angle d'élévation (degrés) | 9,1 | 9,1 | 9,1 | 8,4 |
| Distance de diversité (km) | 20 | | 100 | |
| MF | | | | |
| Diamètre de l'antenne requis (m) | 28/32 | | 19/22 | |
| Puissance d'émission ⁽¹⁾ requise (W) (valeur maximale) | 730 | | 510 | |
| AMRT ⁽²⁾ | | | | |
| Diamètre de l'antenne requis (m) | 17/19 | | 11/12 | |
| Puissance d'émission requise (W) (valeur maximale) | 530 | | 400 | |

(1) Valeurs pour une porteuse MRF-MF de 792 voies (25 MHz).

(2) Valeurs pour une modulation MDP cohérente quadrivalente à 120 Mbit/s avec correction d'erreur directe.

Hypothèses:

Fréquence: 14,5 (liaison montante)/11,7 GHz (liaison descendante)

Position orbitale du satellite: 63° E, 0° N

p.i.r.e. du satellite: 41,1 dBW

Les diamètres d'antenne sont estimés pour:

$$T_s = 50 \text{ K et } T_s = 150 \text{ K}$$

T_s : température de bruit du système de l'antenne de la station terrienne

Efficacité de l'antenne de la station terrienne: 65%

Ces estimations sont fondées sur les statistiques du taux de précipitation obtenues pour ces emplacements.

Les méthodes de calcul des qualités de fonctionnement requises (diamètre de l'antenne et p.i.r.e.) pour les stations terriennes en diversité varient en fonction des configurations. Pour une liaison en diversité symétrique, les calculs doivent être fondés sur la distribution de probabilité combinée de l'affaiblissement dû à la pluie aux deux emplacements, alors que dans le cas d'une configuration en diversité dissymétrique, il est nécessaire de connaître la distribution cumulative dans le temps de l'affaiblissement dû à la pluie et la probabilité conditionnelle de l'affaiblissement.

La probabilité conditionnelle $P(L''/L')$ est la probabilité pour que l'affaiblissement dû à la pluie à l'emplacement de la sous-station dépasse L'' lorsque l'affaiblissement dû à la pluie observé à l'emplacement principal dépasse L' .

Pour établir des estimations fiables des conditions requises pour les stations terriennes, il faut disposer de statistiques fiables fondées sur des mesures de propagation à long terme.

1.2 Exploitation avec commutation en diversité d'emplacement

Pour la mise en œuvre de stations terriennes exploitées en diversité, il faut que la commutation soit effectuée avec le plus grand soin car il peut se produire à ce moment une perte de signal de courte durée ou au contraire un chevauchement, en raison de la différence de longueur des trajets en diversité ou d'une discontinuité de phase de la porteuse.

Dans des transmissions analogiques, telles que les transmissions MF-AMRF, la commutation en cours d'émission causera inévitablement une discontinuité de phase de la porteuse, ce dont il résultera des à-coups du signal à la sortie du démodulateur dans les stations terriennes de réception. On peut éviter ces à-coups dans la station terrienne de réception en ajustant soigneusement la longueur du trajet électrique de chaque liaison en diversité, mesurée de l'équipement de commutation au satellite.

Dans les transmissions numériques, on peut éviter les à-coups de signaux, même lorsque la commutation s'effectue dans la station terrienne d'émission, en insérant des intervalles fantômes dans la séquence de signaux émis et en effectuant la commutation pendant l'intervalle fantôme. Dans les stations terriennes de réception, il faut éliminer les intervalles fantômes, que la commutation ait eu lieu ou non.

C'est avec les transmissions AMRT que l'on peut obtenir le plus facilement une commutation sans à-coups dans les parties émission et réception des systèmes en diversité. Des intervalles fantômes sont incorporés aux transmissions AMRT, qui n'occupent qu'une partie de la trame AMRT. De plus, les démodulateurs AMRT sont conçus de manière à recevoir des porteuses en mode paquet de phase non cohérente. En conséquence, la non-cohérence de phase des porteuses AMRT ne crée aucune difficulté. Le seul problème que peut poser l'exploitation en diversité d'emplacement pour les transmissions AMRT tient à la nécessité d'un contrôle très précis du rythme à l'émission, même pour l'émission initiale à partir de la station en attente. Pour ce faire, on peut soit émettre continûment un paquet fantôme à partir de la station en attente, soit obtenir du satellite des données de distance assez précises, ce qui est possible lorsque le système AMRT comporte une synchronisation à boucle ouverte. En transmission AMRT, il est possible d'égaliser les longueurs de trajet des branches de diversité en agissant sur les instants de réception des signaux de synchronisation de trame. Ces instants de réception, sur les deux branches de diversité, peuvent être égalisés automatiquement par commande d'une ligne à retard variable placée dans l'une des branches. On a effectué des essais avec un système expérimental faisant appel aux paquets fantômes.

Dans le cas d'une exploitation en diversité, pour choisir le trajet utilisé il faut mesurer la qualité de transmission sur les branches de diversité. L'effet de diversité peut se dégrader selon la méthode choisie pour mesurer cette qualité; il faut donc procéder avec soin pour choisir la durée de la mesure et la précision possible.

1.3 Liaisons d'interconnexion pour la réception en diversité (LID)

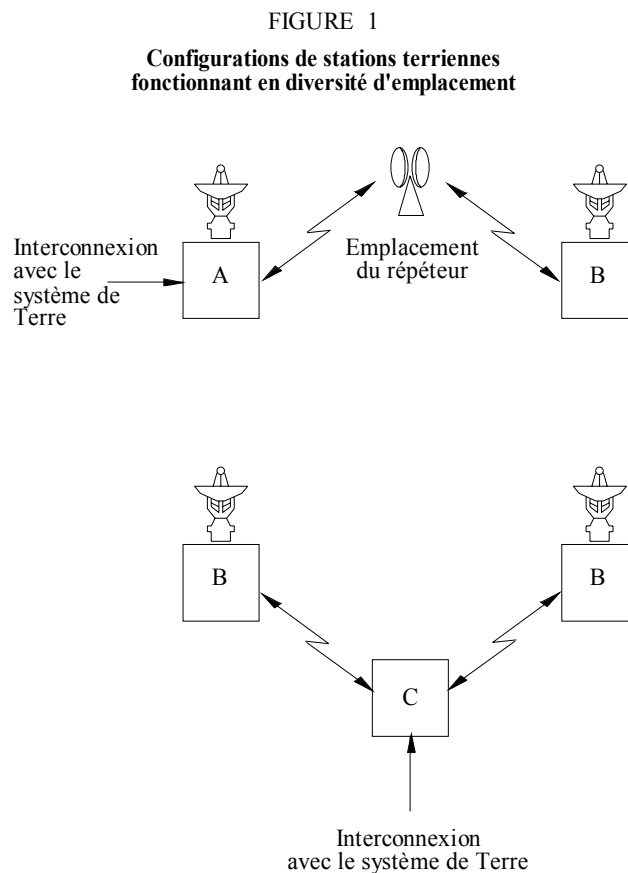
Le fait que le circuit fictif de référence de l'UIT-R, défini dans la Recommandation UIT-R S.352, et que le conduit numérique fictif de référence défini dans la Recommandation UIT-R S.521 comprennent les liaisons d'interconnexion avec le point de commutation pour la réception en diversité et tous les dispositifs de modulation et de démodulation nécessaires, est un facteur qui doit être pris en considération. Cela signifie que les bilans de bruit du système doivent tenir compte de tous les effets des LID.

1.3.1 Configuration fondamentale

1.3.1.1 Aspects physiques

On peut envisager plusieurs configurations de spécificités différentes ainsi que les raisons pour préférer l'une d'entre elles. Deux de ces configurations sont définies dans la présente Annexe et décrites ci-après (voir la Fig. 1):

- un emplacement principal où sont installés les appareils de commutation de diversité et d'interface avec la liaison de Terre. L'emplacement de diversité est relié par une LID en faisceau hertzien à deux bonds, avec un répéteur actif ou un répéteur passif. (On suppose qu'il existe un emplacement de répéteur car il est peu probable que les emplacements de diversité soient en visibilité directe l'un de l'autre.);
- deux emplacements de diversité et un emplacement de commande distinct où sont installées l'interface et la commutation de diversité; l'emplacement de commande est relié à chaque emplacement de diversité par un faisceau hertzien à un seul bond.



A: emplacement principal
B: emplacement de diversité
C: emplacement de commande

On peut aussi réaliser la LID en recourant à des liaisons en câble ou à guide d'ondes. Quand une station terrienne utilise la technique MRF-MF et la technique MRT (AMRF ou AMRT), deux liaisons parallèles sont habituellement nécessaires.

1.3.1.2 Conditions requises pour la modulation

Quand on utilise la technique MRF-MF, étant donné que les schémas de la modulation et de la bande de base ne sont pas habituellement les mêmes sur une liaison par satellite que les schémas classiques utilisés dans les systèmes de Terre, il sera nécessaire de procéder à une remodulation. La différence des schémas réside dans la disposition des voies. Dans le système de Terre, les voies seront habituellement combinées dans une ou plusieurs bandes de base dans chaque direction et l'indice de modulation sera relativement bas. A la station terrienne, les bandes de base du système de Terre seront réparties en un certain nombre de bandes de base de transmission à destinations multiples, dont la composition sera différente de celle des bandes de base du système de Terre; de même, l'indice de modulation sera modifié à la station terrienne. Les bandes de base de réception sont encore plus nombreuses et peuvent ne comporter que quelques voies dont la disposition devra être modifiée dans le système de Terre pour constituer des bandes de base de faisceau hertzien. Ce procédé exige des circuits de modulation et de démodulation à l'emplacement de la station terrienne principale et à l'emplacement de diversité où est utilisé le schéma classique de la LID. Toutes les configurations peuvent être utilisées avec remodulation en doublant l'équipement à l'emplacement de diversité.

Une autre méthode consiste à utiliser dans le système de Terre les mêmes schémas de modulation que dans le système à satellites. Il semblerait que cette technique soit réalisable, bien qu'elle ne soit pas classique. Elle permettrait d'économiser le montant que coûterait un équipement de remodulation, même en consentant un éventuel débours supplémentaire pour le système de Terre; mais il se pourrait aussi qu'il puisse en résulter des économies en ce qui concerne ce dernier. La technique qui vient d'être décrite n'est applicable qu'à la deuxième des configurations représentées dans la Fig. 1. Quand on utilise la technique MRT (AMRF ou AMRT), l'une ou l'autre des deux méthodes peut être employée. Dans le cas de la technique AMRT, la commutation en diversité s'effectue entre les paquets (voir le § 1.2). La même modulation peut être utilisée sur la LID, comme elle est utilisée sur le système à satellites, mais les débits binaires ne seront pas normalement ceux d'un système radioélectrique numérique de Terre conventionnel.

1.3.2 Facteurs techniques

1.3.2.1 Choix des bandes de fréquences

S'agissant de choisir les bandes de fréquences d'une LID en faisceau hertzien, il faut s'assurer par une étude attentive qu'on obtient bien la qualité de fonctionnement globale requise. Des renseignements sur la propagation des hyperfréquences dans un système de Terre se trouvent dans les textes concernés de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

1.3.2.2 Largeur de bande nécessaire

Le rapport de la largeur de bande nécessaire pour la LID à la largeur de bande de la station terrienne peut être inférieur ou égal à 1 selon que l'on utilise ou non la remodulation. S'il ne s'agit que d'une transposition de fréquences, les largeurs de bande doivent alors être égales, MHz pour MHz. Si, au contraire, on procède à une remodulation, on peut obtenir une plus grande capacité en voies en utilisant des indices de modulation de fréquence plus petits, mais au prix d'une interface multiplex assez coûteuse.

1.3.2.3 Affaiblissement dû aux précipitations

D'autres facteurs à considérer sont l'affaiblissement dû aux précipitations et les caractéristiques des emplacements de diversité par rapport aux effets des précipitations. Un climat sec est préférable. L'effet de la diversité dépend de la distance entre sites. On prévoit que l'espacement nominal devrait être de 16 km environ. On peut estimer que la meilleure orientation de la ligne joignant deux emplacements doit coïncider avec la perpendiculaire à la direction des contours des conditions météorologiques dominantes, car on ne saurait s'attendre que les affaiblissements les plus notables affectent simultanément les deux emplacements; on obtiendrait ainsi les meilleures conditions pour la réception en diversité. Il y a lieu de tenir compte, mais à titre secondaire, des effets des conditions météorologiques sur les LID en faisceau hertzien, si ces liaisons fonctionnent dans les bandes de fréquences supérieures.

1.3.2.4 Variations du temps de transmission dues à la commutation de diversité

Un autre élément déterminant est lié à la différence des temps de propagation des signaux reçus en diversité lorsqu'ils arrivent au point de commutation.

1.3.3 Considérations générales

Deux particularités de la liaison d'interconnexion pour la réception en diversité (LID) jouent un rôle important:

- sa contribution au bilan de bruit global de l'ensemble du système, et
- sa contribution aux interruptions du système.

Les apports de bruit sont étudiés dans ce qui suit en vue de déterminer leurs effets et leurs interactions avec les circuits du système comprenant les liaisons avec le satellite.

On peut concevoir de deux façons différentes une liaison d'interconnexion entre un système de Terre et des stations terriennes assurant la réception en diversité. Si l'on choisit la méthode de remodulation, on peut utiliser les schémas classiques des systèmes de faisceaux hertziens. Si l'on choisit la méthode de translation des fréquences, le schéma sera différent et très similaire à celui des systèmes à satellites. Les conditions de fonctionnement globales devront tenir compte des marges contre les évanouissements et des apports de bruit. Dans le cas particulier où les mêmes fréquences sont utilisées pour la LID et le système à satellites, il faudra aussi tenir compte du bruit de brouillage.

1.3.3.1 Bilans de bruit pour la technique MRF-MF

Pour que la qualité de fonctionnement du système soit conforme aux normes recommandées dans la Recommandation UIT-R S.353, il convient que les apports de la LID au bruit global dans le circuit fictif de référence soient raisonnablement faibles.

On peut raisonnablement admettre que l'apport de bruit fourni par la LID soit considéré comme faisant partie du bilan de la station terrienne (environ 1 500 pW0p) puisque la LID contribue, en fait, au fonctionnement normal de la station terrienne. Il suffit seulement de s'assurer que cet apport soit maintenu à un niveau assez bas pour que le total de 1 500 pW0p ne soit pas dépassé. Les évanouissements dans la LID contribueront au bilan du bruit global dans la liaison pendant une courte période de temps.

Le nombre des composantes du bruit apporté par la LID dépend de la configuration de l'installation et des bandes de fréquences utilisées. Ces composantes sont les suivantes:

a) *Bruit thermique*

Dans les systèmes de faisceaux hertziens établis selon les normes classiques de l'UIT-R, la puissance de bruit est de 1 à 3 pW0p/km, ou même moins, et peut être maintenue à 10 pW0p au plus sur un seul bond. Ces valeurs peuvent également être faibles dans le cas de systèmes spéciaux.

Les composantes variables dans le temps, dues aux évanouissements causés par les trajets multiples et à l'affaiblissement dû aux précipitations, sont relativement grandes; elles peuvent cependant être ramenées à des valeurs raisonnables dans le cas de bonds de peu de longueur. Le bruit thermique est en relation directe, dB pour dB, avec la profondeur des évanouissements quel que soit leur mécanisme.

b) *Bruit de fond intrinsèque*

Il s'agit là du bruit dans la bande de base; il n'intervient que dans le cas de systèmes où la méthode de remodulation est utilisée. Des puissances de bruit de 50 à 100 pW0p sont courantes lorsque les bandes de base sont «dos à dos». Le bilan de bruit d'une station terrienne normale tient compte d'un apport de ce genre, mais un système comportant une remodulation en ajouterait un deuxième.

c) *Brouillage*

Dans quelques cas, des systèmes de faisceaux hertziens fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences pourraient introduire une très petite quantité de bruit de brouillage. Cet apport peut être considéré comme négligeable. Dans le cas particulier de la réutilisation de la même bande de fréquences, on peut s'attendre que les liaisons Terre-espace et espace-Terre produiront quelque brouillage dans la station terrienne. On estime que, dans des conditions de fonctionnement normales, le niveau du bruit de brouillage serait de 10 à 100 pW0p. De plus, dans certaines situations, les évanouissements peuvent être accompagnés d'augmentations du bruit de brouillage pendant de très courtes périodes ainsi que de bruit thermique. Cette configuration n'exige pas de remodulation, de sorte que le bruit supplémentaire que cette méthode apporterait (bruit de fond intrinsèque) n'intervient pas.

d) *Intermodulation*

Un système comportant la remodulation devra être pourvu d'un circuit modulateur-démodulateur supplémentaire et d'amplificateurs à fréquence intermédiaire, tandis qu'un système comportant une transposition de fréquence serait entièrement constitué par un équipement classique de station terrienne et, de ce fait, ne produirait que très peu de bruit d'intermodulation.

Le Tableau 2 est un exemple de bilan de bruit possible.

TABLEAU 2

| Echantillons de bilans de bruit – Conditions d'espace libre | | | | |
|---|---------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | Remodulation (2 bonds) | | Transposition de fréquence (1 bond) | |
| | Faible (pW0p) | Elevé (pW0p) | Faible (pW0p) | Elevé (pW0p) |
| Bruit thermique | 2 | 20 | 1 | 10 |
| Bruit d'intermodulation dans la bande de base | 50 | 100 | – | – |
| Bruit de brouillage | – | – | 10 | 100 |
| Bruit d'intermodulation (en fréquence radioélectrique) | 100 | 200 | 20 | 50 |
| Total (pW0p) | 152 | 320 | 31 | 160 |

1.3.3.2 Bilan d'erreur pour la technique AMRT

La contribution de la LID au taux global d'erreur du conduit numérique fictif de référence doit être assez faible pour que la qualité de fonctionnement du système demeure conforme aux clauses de cette Recommandation.

Il est à noter que dans le cas de la LID de remodulation, les erreurs seront additives tandis que, dans le cas de la transposition de fréquence, ce sont les effets du bruit qui le seront.

1.3.3.3 Fréquences

Les caractéristiques des évanouissements en fonction de la fréquence, du climat et de la longueur du trajet, en présence de précipitations, peuvent être déterminées d'après celles des systèmes classiques de faisceaux hertziens. L'affaiblissement dû aux précipitations et les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples sont des phénomènes indépendants – en fait ils sont presque mutuellement exclusifs.

Etant donné que l'espacement prévu entre deux stations terriennes assurant la réception en diversité est de 16 à 24 km et qu'un répéteur, ou un emplacement commun, sera nécessaire, la longueur des LID ne dépassera vraisemblablement pas 16 km. Normalement, on peut prévoir des marges suffisamment grandes pour un trajet de cette longueur, de façon que la proportion du temps pendant laquelle se produisent des interruptions brèves s'abaisse à 0,001%.

2 Régulation de puissance sur la liaison montante

2.1 Introduction

On peut utiliser la régulation de puissance sur la liaison montante (RPLM) pour réduire l'effet de l'affaiblissement de trajet dans les bandes de fréquences élevées (par exemple, 14/11 et 30/20 GHz). Cette technique peut être utile pour exploiter efficacement un tel système et pour réduire les brouillages causés aux autres liaisons, par satellite ou de Terre, si l'on diminue la p.i.r.e. par temps clair.

2.2 Mise en œuvre de la régulation de puissance sur la liaison montante

Cette régulation peut s'effectuer selon différentes méthodes, les plus couramment utilisées étant les suivantes:

2.2.1 Régulation de puissance sur la liaison montante en boucle ouverte

La RPLM en boucle ouverte est une méthode dans laquelle un signal de balise du satellite sert à mesurer l'affaiblissement par la pluie sur la liaison descendante. En raison de la corrélation entre les valeurs de l'affaiblissement par la pluie qui sont respectivement observées sur la liaison montante et sur la liaison descendante, cette mesure permet d'évaluer l'affaiblissement par la pluie sur la liaison montante et de déterminer la régulation à appliquer. La plupart des valeurs d'affaiblissement prévues coïncident avec les valeurs réelles, mais certaines valeurs divergent en raison de l'influence du milieu ambiant (vitesse du vent, distribution des dimensions des gouttes de pluie, etc.). Le Tableau 3 donne un exemple d'erreurs potentielles sur l'estimation de l'affaiblissement sur la liaison montante (14 GHz) à partir d'une mesure sur la liaison descendante (11 GHz).

Certaines sources d'erreurs potentielles n'ont pas été prises en considération car elles sont trop petites pour qu'on puisse les estimer (par exemple: erreurs de poursuite d'antenne, erreurs de pointage de satellite, erreurs de préaccentuation, erreurs dues aux dégradations de gain d'antenne, effets de réfraction sous de faibles angles d'élévation, fluctuations rapides de l'intensité de précipitation) ou résultant d'événements rares (par exemple: accumulation de neige mouillée sur le

réflecteur, panne des circuits de commande ou de mesure). Diverses combinaisons de ces sources d'erreurs additionnelles pourraient, le cas échéant, accroître l'erreur cumulative sur le niveau de puissance de la liaison montante.

TABLEAU 3

Exemple d'erreurs potentielles sur l'estimation de l'affaiblissement sur la liaison montante (14 GHz) à partir d'une mesure de l'affaiblissement sur la liaison descendante (11 GHz)

| a) <i>Affaiblissement de moins de 1,0 dB sur la liaison montante</i> | | | |
|--|-------------------|--------|--------|
| | Angle d'élévation | | |
| | 5° | 15° | 25° |
| Erreur d'équipement ⁽¹⁾ | 0,725 | 0,725 | 0,725 |
| Affaiblissement par les nuages de glace | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Vapeur d'eau/effets de diffusion | 0,20 | 0,10 | 0,05 |
| Niveau par temps clair | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Erreur maximale sur la liaison montante (dB) | ±1,075 | ±0,975 | ±0,925 |
| b) <i>Affaiblissement entre 1 et 6 dB sur la liaison montante</i> | | | |
| | Angle d'élévation | | |
| | 5° | 15° | 25° |
| Erreur d'équipement ⁽¹⁾ | 0,725 | 0,725 | 0,725 |
| Affaiblissement par les nuages de glace | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Distribution de la dimension des gouttes de pluie | 0,10 | 0,075 | 0,05 |
| Vapeur d'eau/effets de diffusion | 0,20 | 0,10 | 0,05 |
| Niveau par temps clair | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Erreur de polarisation | 0,10 | 0,075 | 0,05 |
| Erreur de longueur de trajet | 0,20 | 0,10 | 0,05 |
| Couche de fusion | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Erreur maximale sur la liaison montante (dB) | ±1,525 | ±1,275 | ±1,125 |
| c) <i>Affaiblissement de plus de 6 dB sur la liaison montante</i> | | | |
| | Angle d'élévation | | |
| | 5° | 15° | 25° |
| Erreur d'équipement ⁽¹⁾ | 0,725 | 0,725 | 0,725 |
| Affaiblissement par les nuages de glace | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Distribution de la dimension des gouttes de pluie | 0,20 | 0,15 | 0,10 |
| Vapeur d'eau/effets de diffusion | 0,10 | 0,075 | 0,05 |
| Niveau par temps clair | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Erreur de polarisation | 0,20 | 0,15 | 0,10 |
| Erreur de longueur de trajet | 0,40 | 0,25 | 0,15 |
| Couche de fusion | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Erreur maximale sur la liaison montante (dB) | ±1,825 | ±1,550 | ±1,325 |

⁽¹⁾ L'erreur d'équipement de ±0,725 dB prise en hypothèse ci-dessus est estimée sur la base d'une erreur de ±0,5 dB constatée à 11,7 GHz (sur la liaison descendante) et d'un facteur de proportionnalité présumé de 1,45 entre 11,7 GHz et 14 GHz. L'erreur de ±0,5 dB a été relevée à partir des données disponibles. Il est nécessaire d'en poursuivre la vérification en faisant des mesures supplémentaires.

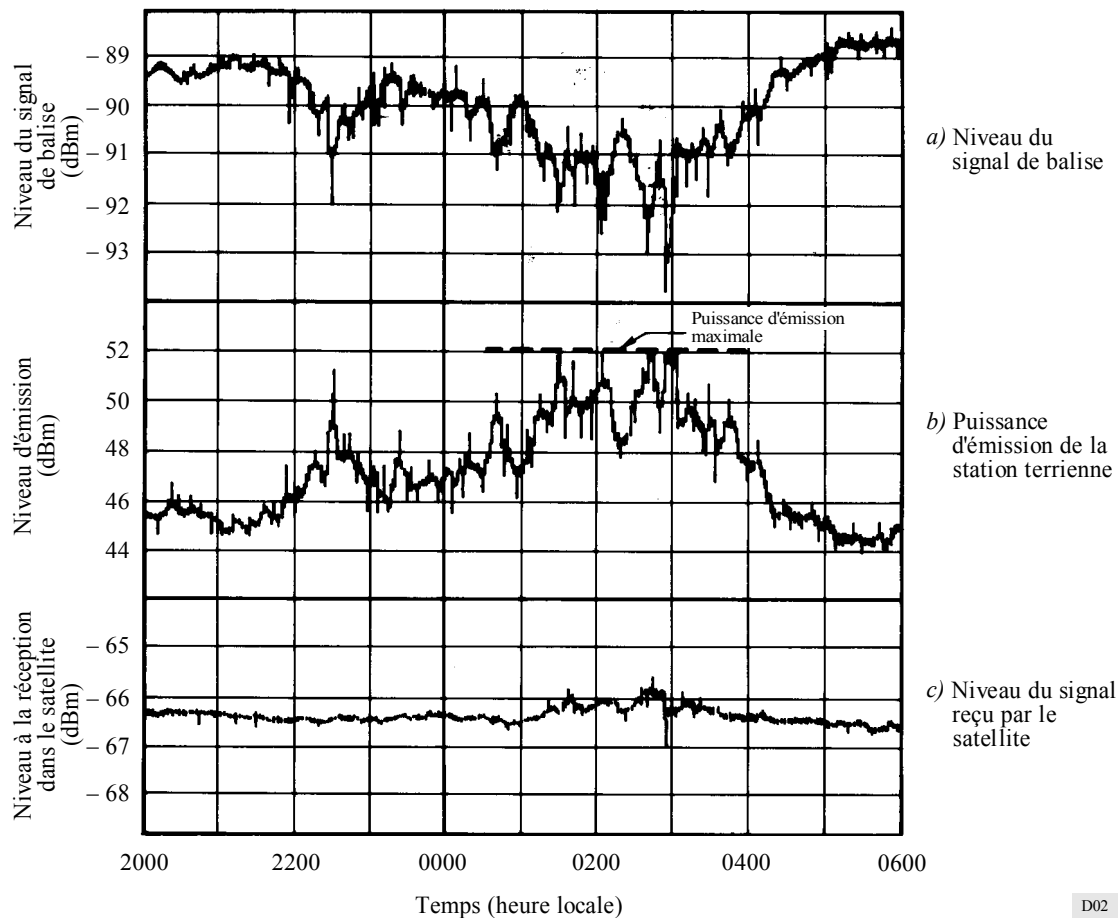
2.2.2 Régulation de puissance sur la liaison montante (RPLM) en boucle fermée

La RPLM en boucle fermée est une méthode dans laquelle le signal de balise du satellite est comparé avec les rapports C/N ou S/N en contre-réaction d'un signal pilote ou d'un signal de voie spéciale. Il est ainsi possible d'établir avec une grande précision l'affaiblissement par la pluie sur la liaison montante et la RPLM à appliquer. Cette méthode présente cependant l'inconvénient de nécessiter des voies de régulation distinctes en plus de la voie de communication.

2.3 Expérience de régulation de la puissance sur la liaison montante

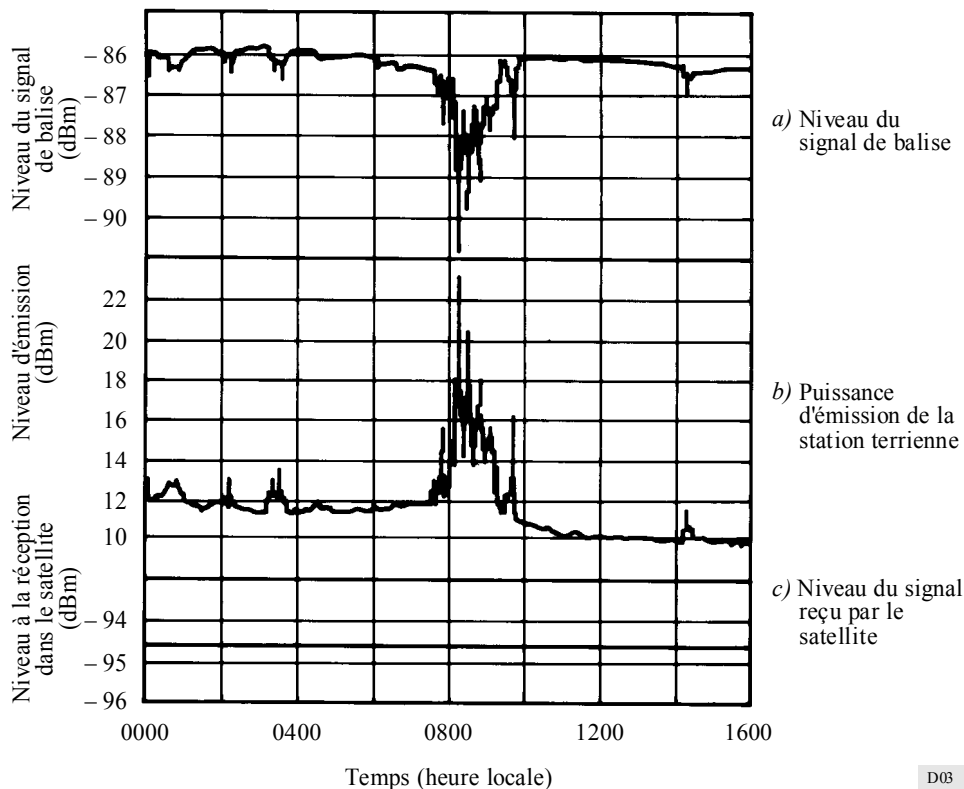
La Fig. 2 donne les résultats d'une expérience de RPLM en boucle ouverte effectuée dans la bande 30/20 GHz. Cette expérience a consisté à déterminer les valeurs de RPLM à partir de l'affaiblissement sur la liaison descendante. La Fig. 2a) donne le niveau du signal de balise, la Fig. 2b) le niveau d'émission de l'amplificateur de puissance et la Fig. 2c) le niveau à la réception dans le satellite. On voit que la variation du rapport C/N total peut être maintenue dans la limite de 1 dB (crête-à-crête), sauf quand la puissance d'émission nécessaire dépasse sa valeur maximale.

FIGURE 2
Résultats expérimentaux de RPLM en boucle ouverte



On a aussi effectué une expérience de RPLM en boucle fermée dans la bande 30/20 GHz; les résultats sont représentés sur la Fig. 3. L'erreur de régulation a pu être maintenue dans la limite de 0,3 dB (crête-à-crête).

FIGURE 3
Résultats expérimentaux de RPLM en boucle fermée



2.4 RPLM en boucle ouverte utilisant un radiomètre

On peut assurer la RPLM en utilisant un radiomètre pour mesurer l'énergie émise par la pluie le long du trajet de propagation vers le satellite. Un signal de balise ou un signal pilote n'est pas nécessaire. Les erreurs causées par les récepteurs de balise, comme la variation du gain en fonction de la température des amplificateurs à faible bruit (AFB), sont éliminées.

La relation entre l'affaiblissement par les précipitations sur trajet oblique et la température d'antenne a été étudiée par plusieurs chercheurs. Les affaiblissements sur le trajet calculés à partir de mesures de la température d'antenne ont en général une précision meilleure que 0,5 dB pour des affaiblissements inférieurs à 6 dB (sur 12 GHz au Canada). Dans un système pratique, la puissance de la liaison montante n'est guère susceptible d'être augmentée de beaucoup plus de 6 dB. Ainsi, le radiomètre peut servir à calculer l'affaiblissement sur le trajet sur toute la gamme présentant un intérêt dans la pratique.

Les passages du Soleil dans le lobe principal de l'antenne se produisent pendant quelques jours au voisinage des équinoxes quand la déclinaison du Soleil est à peu près celle du satellite. Pour faire une distinction entre ces augmentations de la température d'antenne et celles qui sont dues à l'affaiblissement par la pluie à d'autres moments, on calcule fréquemment l'angle sous lequel on voit le satellite et le Soleil. Quand l'espacement angulaire entre l'axe de l'antenne du radiomètre et le Soleil est inférieur à une valeur choisie, l'augmentation de la température d'antenne est supposée être due au Soleil et la RPLM est neutralisée.

Un système de RPLM a été mis au point pour les bandes 14/12 GHz, dans lequel un radiomètre mesure la température d'antenne dans une bande de fréquences au-dessous de la bande de la liaison montante, calcule l'affaiblissement du trajet à la fréquence désirée sur la liaison montante et assure la régulation du niveau du signal appliqué en fréquence intermédiaire au changeur élévateur de fréquence. La température d'antenne est mesurée par un radiomètre d'un type nouveau. Le principe de fonctionnement présente, par rapport au radiomètre classique de Dicke, des différences fondamentales et assure une mesure très stable de la température d'antenne. Le radiomètre est contenu en totalité dans un cylindre monté au foyer principal d'un réflecteur parabolique. Etant donné que la fréquence du radiomètre doit différer de celle de la liaison montante, de manière que l'énergie transmise qui est rétrodiffusée par la pluie sur le trajet ne soit pas décelée par le radiomètre, on utilise une fréquence de radiomètre de 13,3 GHz.

Dans une expérience pour laquelle on a utilisé le système décrit ci-dessus, le niveau du signal en boucle a été comparé avec celui du signal reçu de la balise de satellite. Les niveaux de ces signaux présentaient une bonne corrélation, ce qui indique que le niveau du signal sur la liaison montante tel qu'il est reçu au satellite est presque constant, sans dépendre de l'affaiblissement par la pluie. Une expérience d'exploitation complémentaire sera acquise grâce aux deux systèmes de RPLM en cours d'installation au Canada.

2.5 Conclusion

La régulation de puissance sur la liaison montante est l'une des techniques les plus importantes pour la mise en service de systèmes de communication par satellite dans les bandes de fréquences élevées. Elle permet, dans ces conditions, de réduire les brouillages entre systèmes à satellites voisins et réseaux de Terre. Il en résulte une utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires et une exploitation efficace des systèmes.

Des études détaillées devront être entreprises pour déterminer des méthodes plus précises de RPLM.

3 Système de transmission de l'information à débit variable

3.1 Introduction

On peut améliorer la qualité du fonctionnement des systèmes de transmission numérique par satellite en réduisant, par adaptation, le débit de transmission de l'information quand les conditions de propagation sont mauvaises. Les paramètres variables (rythme de l'horloge et nombre d'états de phase) de la modulation MDP ainsi que le débit de codage variable de la correction d'erreur directe (CED) peuvent être utilisés pour une transmission de l'information à débit variable. Par ailleurs, une méthode de synchronisation globale pour un signal MDP démodulé a également été appliquée à un système AMRT de transmission à débit variable.

Il faut noter que les services publics peuvent ne pas être en mesure d'être soumis à une réduction du débit de transmission de l'information et que, dans ce cas, il peut s'avérer nécessaire d'appliquer d'autres mesures contre l'évanouissement.

3.2 Système à paramètres variables de modulation MDP

Plusieurs types de modems MDP à usage général ont été mis au point à l'aide des dispositifs de traitement des signaux numériques du type intégration à grande échelle. Ces modems ont deux modes de fonctionnement, MDP-2 et MDP-4 et leurs rythmes d'horloge de transmission sont variables en permanence. Ils conviennent à un système de transmission à débit variable, bien que des débits de transmission élevés ne soient pas possibles en raison de la limitation que le dispositif de traitement des signaux numériques impose à la vitesse de fonctionnement. Par exemple, un

modem ayant un débit de transmission maximal de 400 kBd a été mis au point. Il peut être utilisé pour des signaux en mode salve. Dans un autre exemple, un modem pouvant fonctionner avec un débit de transmission maximal de 6 MBd a été mis au point. Ce débit est variable, mais il faut un temps considérable pour parvenir à un état stable quand les paramètres ont retrouvé leurs valeurs normales.

Lorsque le rapport de réduction du débit de transmission est γ , l'amélioration du rapport C/N est donnée par la formule:

$$\Delta(C/N) = -10 \log \gamma \quad \text{dB}$$

3.3 Système à débit de codage variable

Les codeurs convolutionnels ainsi que les décodeurs Viterbi conviennent à un système à débit de codage variable parce qu'ils devraient être économiques à fabriquer, compte tenu de leur intégration à grande échelle et que leurs gains de codage sont élevés. Des codecs du type intégration à grande échelle, par exemple ayant une longueur imposée de 4 ou 7, un débit de codage de 1/2 ou 2/3 ou 3/4 ou 7/8 et des débits de transmission maximaux de 20 à 25 MHz ont été mis au point. L'un de ces codecs est polyvalent, avec sélection du débit de codage.

L'amélioration du rapport C/N , lorsqu'un codec est utilisé avec un système de transmission de l'information à débit variable, est donnée par la formule:

$$\Delta(C/N) = 10 \log (R_o/R_a) + G_a - G_o \quad \text{dB}$$

où:

R_o : taux de codage

G_o : gain de codage pour un fonctionnement par temps clair

R_a, G_a : comme indiqué ci-dessus pour un fonctionnement par temps de pluie.

3.4 Système de transmission à débit variable faisant appel à des techniques d'étalement du spectre et de synchronisation globale

Il existe une autre méthode dans la catégorie de transmission à débit variable. Un train de bits de données dans la bande de base (bits d'information ou bits de correction d'erreur) est embrouillé par un code de bruit pseudo-aléatoire à rythme d'horloge constant, puis fait l'objet d'une modulation MDP. On peut faire varier le débit de transmission en changeant le rapport du débit binaire de données et le rythme d'horloge du code pseudo-aléatoire. Le rapport choisi doit être $1/n$, n étant un nombre entier positif. Dans le récepteur, le signal embrouillé est démodulé par MDP au rythme de l'horloge du code de pseudo-bruit, puis désembrouillé par le code pseudo-aléatoire. Les bits de données dans la bande de base sont détectés après synchronisation du code de bruit pseudo-aléatoire.

Cette technique a été utilisée avec un système AMRT à débit de transmission variable adapté à chaque salve AMRT. Des expériences ont permis de confirmer que la dégradation du taux d'erreur binaire par rapport au taux théorique dans une voie gaussienne, est inférieure à 2 dB lorsque le système AMRT fonctionne à un débit de $8/n$ Mbit/s ($n = 1, 2, 4, 8, 16, 32$).

Cette technique peut être assimilée à une modulation et à une démodulation permettant de faire varier les débits de transmission à l'aide d'une horloge constante ou d'un débit de codage variable avec un gain de codage de 0 dB.

3.5 Conclusion

Pour maintenir la qualité des signaux d'un système de communication numérique par satellite lorsque les conditions de propagation sont mauvaises, on a envisagé trois types de techniques de transmission de l'information à débit variable.

La technique à débit de codage variable faisant appel à un codeur convolutionnel et à un décodeur Viterbi se prête à un système de communication simple avec un équipement de stations terriennes relativement économique et/ou simple.

Les autres techniques doivent être utilisées en liaison avec une technique de correction d'erreur directe. Toutefois, dans le cas du système à paramètres variables, il n'a pas été possible de développer un modem adaptatif à débit de transmission variable ayant un débit maximal de plus de 400 k Bd. La technique de débit de transmission variable faisant appel à la synchronisation globale convient à un système AMRT plutôt qu'à un système SCPC.

4 Mesures antiévanouissement grâce à l'accès multiple par répartition dans le temps (MAE-AMRT)

4.1 Introduction

Le MAE-AMRT est une méthode destinée à contrecarrer les graves effets des précipitations aux fréquences supérieures; il s'agit d'un système adaptable qui consiste à attribuer une ressource en temps supplémentaire aux porteuses sujettes à des évanouissements dans un réseau AMRT, de manière à présenter un taux d'erreur acceptable compte tenu de la dégradation du rapport porteuse/bruit (C/N) inhérente à l'évanouissement.

Dans tout système MAE-AMRT, une partie de la trame est désignée comme étant une «ressource partagée», mise à la disposition des porteuses sujettes à des évanouissements. Il s'ensuit que par temps clair le rendement de trame, et donc la capacité d'un système MAE-AMRT sont inférieurs à ceux d'un système AMRT classique équivalent. La période de trame ne constitue généralement pas une variable, mais toute salve sujette à des évanouissements est prolongée dans le temps à l'intérieur de la trame. Cela signifie qu'elle conserve le même nombre de bits d'information (d'utilisateur) lorsqu'elle est prolongée, de sorte que le débit d'information reste inchangé. Cette technique se prête donc particulièrement bien aux réseaux et aux services publics avec commutation, là où des méthodes de transmission de l'information à débit variable (voir le § 3) pourraient ne pas être appropriées.

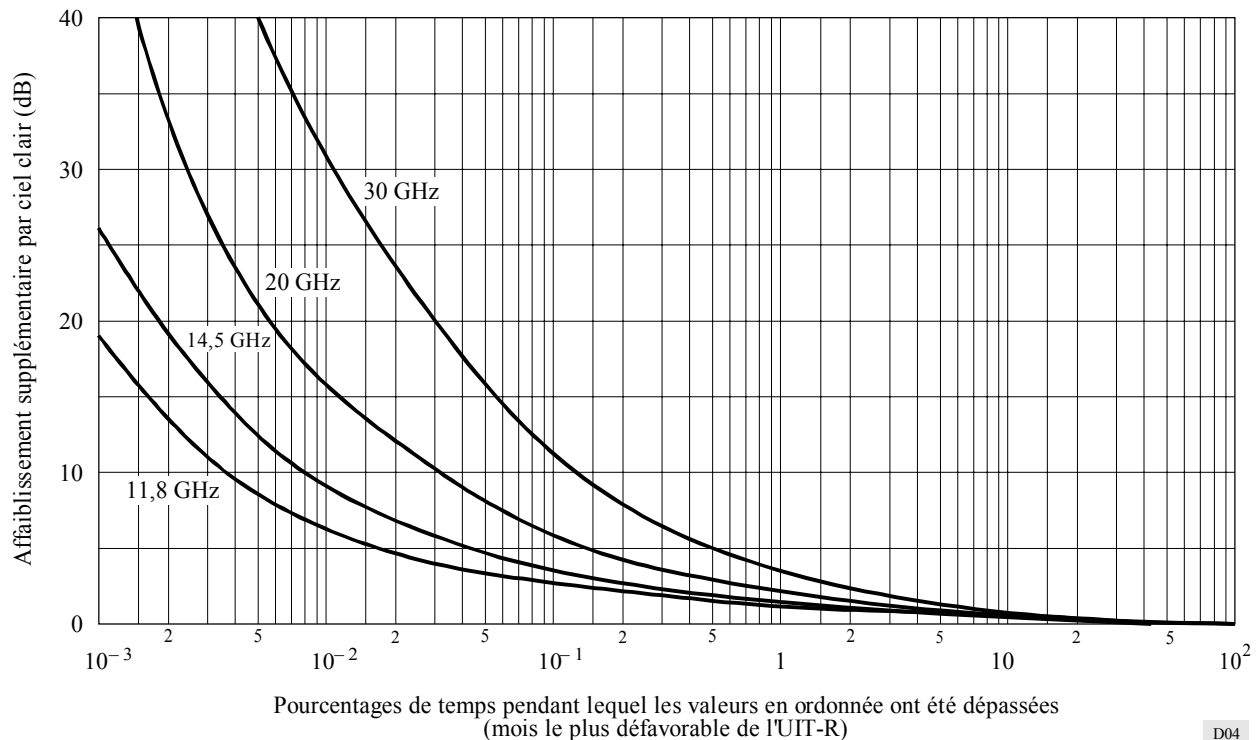
Il suffit que chaque salve soit élargie au point de contrecarrer l'évanouissement survenant lors d'un acheminement particulier sur la liaison montante, sur la liaison descendante ou sur les deux à la fois pour assurer au système une efficacité maximale.

4.2 Statistiques temporelles et spatiales de l'évanouissement atmosphérique à 30/20 GHz

Une série de mesures ont été faites au cours de 43 mois à Martlesham Heath, East Coast (Royaume-Uni) (région climatique E de l'UIT-R) à 14/12 GHz sur un trajet selon un angle d'élévation de 30° vers le satellite OTS2. Les résultats de ces mesures pour le seul emplacement, extrapolées pour 30/20 GHz au moyen des facteurs d'échelle de l'UIT-R, sont résumés sur la Fig. 4, qui présente les statistiques d'évanouissement pour le mois le plus défavorable. Avec les données mesurées, un modèle d'ordinateur a ensuite été conçu pour prévoir les statistiques d'évanouissement simultané sur deux ou plus des liaisons dans toute la zone de couverture d'un satellite, dans l'hypothèse où toutes les liaisons ont accès aux ressources de réserve, afin d'évaluer l'amélioration de la disponibilité des liaisons qu'un système AMRT adaptatif assurerait.

Un évanouissement simultané dans n stations d'une zone circulaire de diamètre d a été simulé; pour cela, on a pris n points dans le temps provenant de la base de données mesurée (mentionnée ci-dessus) pendant une période t , la relation entre t et d étant un facteur de 30 km/h, qui correspond à la vitesse «effective» du vent qui prévaut au Royaume-Uni pendant les périodes de précipitation. Pour établir des statistiques à long terme, on fait glisser cette fenêtre de largeur t le long de la totalité de la base de données de 43 mois et on convertit ces statistiques en statistiques UIT-R pour le mois le plus défavorable.

FIGURE 4
Courbes d'affaiblissement-type en fonction de la disponibilité d'un seul emplacement
(mois le plus défavorable de l'UIT-R)



D'importants travaux ont été consacrés à comparer ce modèle avec des mesures directes sur des distances connues et à vérifier la validité du facteur de conversion de 30 km/h. Ces comparaisons ont été faites avec:

- le modèle Hodge de diversité d'emplacement (jusqu'à 10 km),
- des corrélations des taux de précipitation (jusqu'à 400 km),
- des données de l'office météorologique (jusqu'à 1 200 km).

Les données/modèles susmentionnés ont assez bien concordé avec le modèle utilisé et le facteur de conversion de 30 km/h pour les distances supérieures à 10 km.

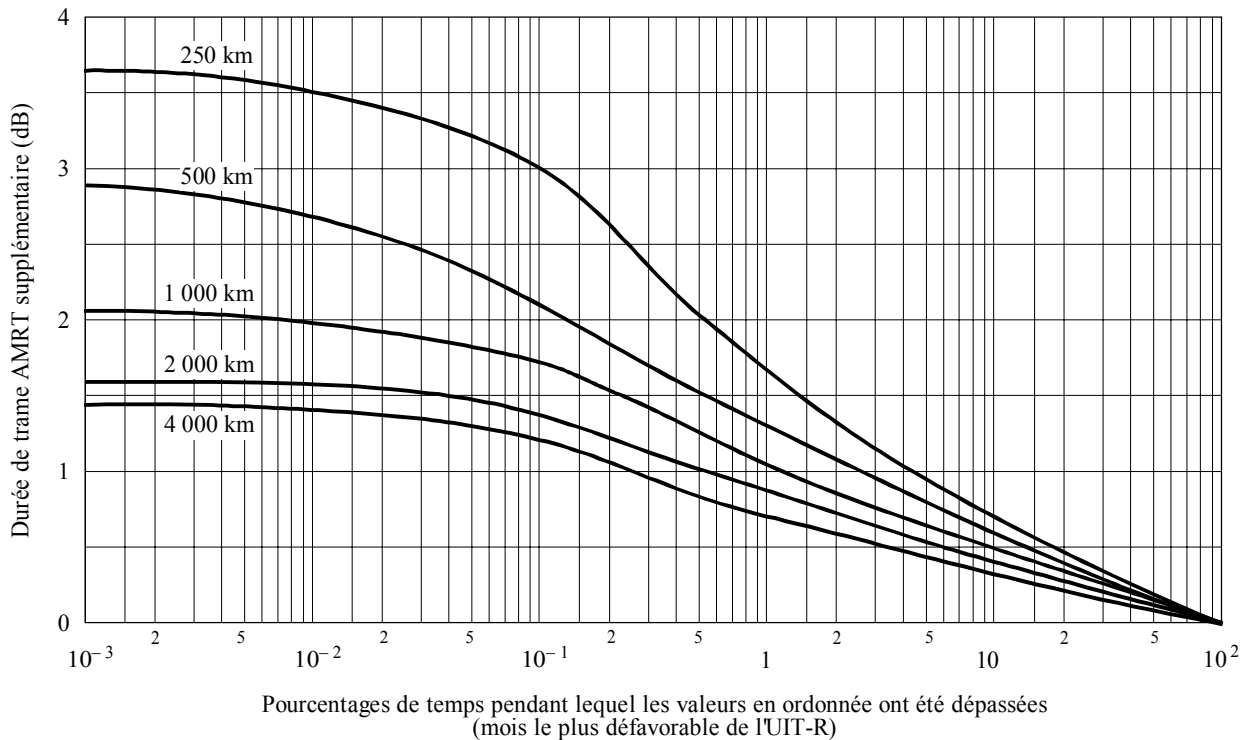
Le modèle a été utilisé pour établir des statistiques de la durée d'une trame AMRT de réserve nécessaire au satellite pour conserver un rapport E_b/N_0 suffisant sur les trajets descendants à 20 GHz vers des réseaux fictifs comprenant différents nombres de stations terriennes.

Il a été constaté que si la durée de trame est suffisante dans les faisceaux de réserve pour maintenir les interruptions de la Fig. 5 nettement au-dessous de 0,01%, le total des interruptions sera dominé par celles d'un seul emplacement, représentées sur la Fig. 4.

Différentes techniques de compensation de l'évanouissement sur les trajets montants (comme la variation de débit) peuvent mériter d'être prises en considération, selon la topologie du réseau.

FIGURE 5

Courbes types de la puissance de satellite supplémentaire en fonction de la disponibilité du système



100 stations, différents diamètres de zone, fréquence: 20 GHz, niveau de coupure pour une station: 15 dB D05

4.3 Modes d'utilisation d'une salve élargie afin d'obtenir un certain niveau d'immunité au bruit

Il existe plusieurs manières d'utiliser le temps supplémentaire procuré par un intervalle prolongé pour obtenir un degré plus élevé d'immunité au bruit. En voici quelques exemples:

a) *CED*

Différents débits de CED d'en-tête peuvent être introduits par étapes en fonction de la profondeur de l'évanouissement, l'intervalle de temps étant augmenté au besoin.

b) *Réduction du débit de transmission de données*

Il est possible de réduire le débit de transmission de données tout en maintenant le même débit d'information, grâce à une augmentation de la longueur des salves. Si le débit de transmission de données est réduit, la largeur de bande du bruit au récepteur peut également être réduite, d'où une immunité au bruit accrue.

c) *Reproduction des données d'utilisateur à l'intérieur de la salve*

Une salve sujette à des évanouissements peut être répétée ou reproduite un certain nombre de fois. Un démodulateur perfectionné permettra alors d'interpréter le signal reçu en prenant la valeur moyenne pour chaque symbole.

Les techniques exposées ci-dessus ont toutes des incidences sur la configuration du modem et il faut veiller à ce que la synchronisation des horloges et des porteuses soit maintenue pendant un évanouissement. De plus, une modification du débit de symboles peut aussi avoir des répercussions en termes de brouillage (qui se traduiraient par une variation des spectres et de la puissance surfacique entre les salves).

La profondeur de l'évanouissement que l'on peut contrecarrer varie selon la méthode employée et le niveau d'élaboration dont le modem peut être doté. Il serait préférable, en réalité, de disposer d'un système MAE-AMRT composite: on pourrait, par exemple, utiliser un code CED adaptable en association avec l'une des autres méthodes ébauchées plus haut; il y aurait même lieu d'utiliser un code CED permanent en combinaison avec la méthode c).

4.4 Commande du système

Les systèmes MAE-AMRT nécessiteront des protocoles et des mécanismes de commande robustes pour repérer le début d'un évanouissement lors de tout acheminement, évaluer le niveau de cet évanouissement, déterminer quelles salves doivent être élargies et de combien, et enfin exécuter ces élargissements en même temps qu'une éventuelle révision de la chronologie des opérations.

4.5 Conclusions

Tout système MAE-AMRT doit être conçu à la demande. Il nécessite la détermination de nombreux paramètres, dont l'élargissement maximal à conférer à telle ou telle salve, le pas de progression de l'élargissement, le temps d'exécution et de réaction par rapport au déclenchement de l'évanouissement, le pourcentage de la trame à réserver à titre de ressource partagée, etc. Quant à l'importance à donner à ces paramètres, elle dépendra de la nature du réseau, de la région climatique en cause, de la profondeur maximale des évanouissements à surmonter et du dosage nombre/débit binaire des porteuses.

Combiné à d'autres systèmes de mesures antiévanouissement, il peut permettre, par exemple, de mettre au point des protocoles de MAE-AMRT de manière à incorporer un système de commande de puissance sur les liaisons montantes; le MAE-AMRT pourrait également être associé à un système à diversité en fréquence, dans lequel les salves sujettes à des évanouissements profonds seraient émises dans une autre trame AMRT, à fréquence plus basse.

De nombreuses études ont été consacrées au Royaume-Uni à décrire les statistiques «espace-temps» et à démontrer la faisabilité de l'AMRT adaptatif par le recours aux méthodes de copie des données. Bien que cela exige que le démodulateur fonctionne selon des rapports E_b/N_0 très faibles au cours des évanouissements, un laboratoire a procédé avec succès à des expériences selon des rapports E_b/N_0 aussi faibles que -8 dB. Néanmoins, des études complémentaires sont nécessaires à la fois en matière de modélisation et d'équipement pour mettre au point un système d'utilisation pratique.

5 Techniques de diversité de fréquence

5.1 Introduction

La diversité de fréquence avec deux bandes est une mesure de protection contre les évanouissements adaptée à l'affaiblissement dû à la pluie et qui s'applique dans le cas d'un satellite fonctionnant dans deux bandes de fréquences, généralement une bande de fréquences élevées, par exemple la bande des 30/20 GHz et une bande de fréquences moins élevées, par exemple les bandes 14/11 ou 6/4 GHz.

Normalement, le trafic est acheminé par la bande de fréquences 30/20 GHz, dans laquelle une grande largeur de bande est disponible. Quand la marge de puissance sur une liaison fonctionnant dans la bande 30/20 GHz n'est pas suffisante pour compenser l'affaiblissement dû à la pluie, le trafic sur cette liaison est commuté sur la bande de fréquences inférieures qui est moins affectée par la pluie.

La capacité de réserve disponible dans la bande de fréquences inférieures qui est utilisée en partage par les stations qui ont besoin, à un moment donné, d'une protection contre les évanouissements, est appelée ici ressource partagée ou bande de secours.

La diversité de fréquence en deux bandes assure un important gain de puissance équivalente; en effet, pour une durée d'interruption totale requise, la durée d'interruption acceptable pour la liaison utilisant la bande de fréquences élevées (30/20 GHz) est fortement allongée, de sorte qu'un affaiblissement beaucoup plus important sur la liaison est admissible.

D'une manière générale, l'emploi d'un faisceau de voies de secours constitue une solution efficace, étant donné qu'en moyenne le nombre de liaisons nécessitant simultanément une capacité de secours est peu important.

L'étude théorique d'un système de diversité de fréquence fait l'objet du § 5.2; elle vise à évaluer le nombre de voies de secours nécessaires pour contrecarrer les évanouissements dans un réseau à satellite.

Le § 5.3 évoque certains problèmes que pose la conception du système de commande des mesures de protection adaptatives.

Enfin, le § 5.4 mentionne les conséquences pour la qualité de fonctionnement de différentes procédures de commutation, obtenues en simulant le système sur la base des séries de temps d'affaiblissement à 11,6 GHz, mesurées au cours d'une période de quatre ans.

5.2 Analyse du système

Envisageons un réseau de communication par satellite comportant N stations, par exemple, un système AMRT fonctionnant normalement dans la bande de fréquences 30/20 GHz mais disposant d'une capacité de réserve dans la bande des fréquences inférieures (14/11 ou 6/4 GHz). Des interruptions de la liaison entre deux stations A et B se produisent quand un évanouissement supérieur à une valeur seuil spécifiée intervient en A ou en B, aucune capacité de secours n'étant à ce moment-là disponible. Cela arrive lorsque les voies de secours ont déjà été assignées pour protéger d'autres liaisons subissant des évanouissements, de sorte qu'aucune autre demande ne peut être satisfaite.

Pour évaluer la probabilité d'interruption due à l'affaiblissement par la pluie, des statistiques des évanouissements aux emplacements des N stations sont nécessaires. Ces statistiques dépendent de la configuration géographique du réseau. Pour réaliser une analyse générale, nous avons recours à un modèle simple.

Désignons par p la probabilité annuelle moyenne d'interruption pour une station donnée (même si ce n'est pas nécessaire, on suppose pour simplifier, que p a la même valeur pour les N stations). Il faut tenir compte du fait qu'aux différents emplacements, les évanouissements ne sont en général pas indépendants, en raison de la corrélation de temps (saisonnière) et d'espace (géographique). On suppose que la probabilité conditionnelle d'évanouissement à la station B (événement F_B), étant donné que la station A subit un évanouissement (événement F_A) n'est pas simplement p comme dans le cas de l'indépendance statistique et qu'elle est augmentée par un facteur:

$$P(F_B/F_A) = \alpha \beta p \quad (1)$$

Le facteur de corrélation saisonnière désigné par α et β est le facteur de corrélation géographique. On peut supposer que le facteur β est égal à l'unité si les stations A et B sont très éloignées l'une de l'autre, mais si ce n'est pas le cas, il sera plus grand puisqu'une corrélation entre les précipitations aux différents emplacements peut toujours exister entre des emplacements espacés de plusieurs centaines de kilomètres.

Pour généraliser (1), la probabilité conjointe d'évanouissement aux stations 1, 2, ..., M conditionnée par l'événement F_A peut s'exprimer par la formule:

$$P(F_1, F_2, \dots, F_M / F_A) = (\alpha \beta)^M P(F_1) \dots P(F_M) = (\alpha \beta p)^M \quad (2)$$

En se fondant sur ce modèle, on peut évaluer la probabilité d'interruption à la station A, $P(INT_A)$, en calculant la probabilité qu'aucune capacité de réserve n'est disponible lorsqu'un évanouissement se produit en A. Si la capacité de réserve se compose de k voies de secours dans une bande de fréquences inférieures, la probabilité d'interruption à une station A donnée peut être obtenue au moyen de la formule (2):

$$P(INT_A) = p \sum_{j=k}^{N-1} \frac{j+1-k}{j+1} \binom{N-1}{j} (\alpha \beta p)^j (1 - \alpha \beta p)^{N-1-j} \quad (3)$$

où:

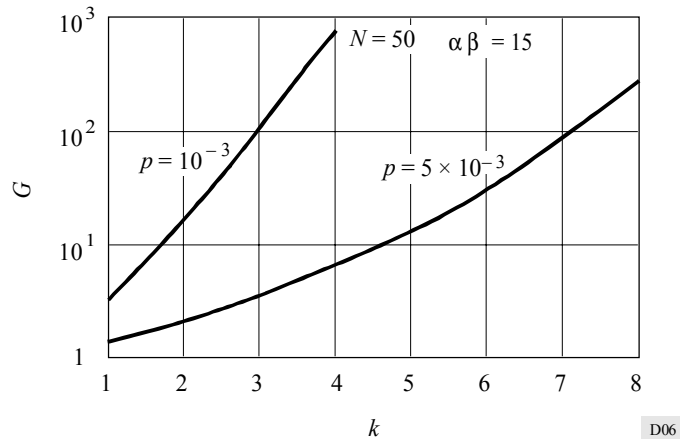
k : nombre de voies de secours disponibles.

Le facteur $(j+1-k)/(j+1)$ représente la probabilité qu'aucune voie de secours du faisceau n'est affectée à A lorsque j stations subissant des évanouissements ($j \geq k$), en plus de A, demandent une voie de secours. On notera que la probabilité d'interruption pour la liaison (A, B) est à peu près deux fois plus grande qu'à la station A (ou B) si la probabilité d'évanouissement simultané en A et B est très inférieure à la probabilité d'évanouissement en A (ou B). A titre d'exemple, la Fig. 6 montre le facteur de réduction d'évanouissement (rapport entre la probabilité d'interruption avec diversité de fréquence et la probabilité d'interruption sans diversité de fréquence), en fonction du nombre de voies de secours k dans un cas particulier, à savoir pour $N=50$ et $\alpha \beta = 15$. Les courbes correspondent à deux valeurs de p , probabilité d'interruption quand le système n'est pas protégé au moyen de la diversité de fréquence. La probabilité p dépend de la marge de puissance incorporée dans l'émetteur de la station. La probabilité qu'un affaiblissement donné A soit dépassé dépend de la fréquence ainsi que des conditions météorologiques de chaque emplacement de station. Dans cet exemple, on a pris pour les calculs la formule suivante, qui donne l'affaiblissement en fonction de la distribution cumulative:

$$A = A_{0,01} - 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \quad \text{dB} \quad (4)$$

où p est la probabilité (en pourcentage d'une année moyenne) que l'affaiblissement A soit dépassé. $A_{0,01}$ représente l'affaiblissement dépassé pendant 0,01% du temps, affaiblissement qui dépend des conditions météorologiques de la station, de l'angle d'élévation du trajet et de la fréquence de la liaison radioélectrique Terre-espace. Pour fournir des exemples chiffrés, nous avons envisagé une liaison fonctionnant à 30 GHz et pour laquelle $A_{0,01}$ a pour valeur 28,5 dB. Il est clair que plus la valeur du facteur $\alpha \beta$ sera élevée, plus la capacité de réserve nécessaire pour assurer la disponibilité requise augmentera. Dans l'exemple envisagé ci-dessus ($N=50$ stations et $\alpha \beta = 15$) il résulte de l'équation (3) que, pour une liaison à 30 GHz avec $p = 5 \times 10^{-3}$, la probabilité d'interruption avec diversité de fréquence est inférieure à 2×10^{-4} si l'on utilise une capacité de réserve de $k=6$. En pareil cas, la liaison est conçue avec une marge de puissance correspondant à $p = 5 \times 10^{-3}$, soit 4,9 dB. Pour obtenir les mêmes résultats d'interruption sans protection par diversité de fréquence, il faut prévoir une marge de puissance de 21,7 dB, conformément à l'équation (4). On remarquera que la marge de puissance nécessaire en l'absence de diversité de fréquence est considérable. Outre le coût accru de la liaison, cet énorme excédent de puissance peut aussi causer des brouillages à d'autres liaisons radioélectriques.

FIGURE 6

Facteur de réduction des interruptions G en fonction du nombre de voies de secours k  p : probabilité d'interruption en l'absence de diversité de fréquence

5.3 Fonctionnement du système de commande adaptatif et résultats de simulation

La précédente analyse de la qualité de fonctionnement des systèmes de diversité de fréquence a été faite pour un cas théorique, dans lequel la commutation du mode normal au mode assisté (et vice versa) peut se faire instantanément. Dans un système réel de protection adaptative contre les évanouissements, le temps de réponse n'est pas négligeable, notamment en cas d'utilisation de l'assignation à la demande de la capacité de réserve; le délai d'établissement de la protection contre les évanouissements ou de rétablissement de l'état initial est principalement dû à la propagation dans la liaison spatiale (de l'équipement terminal à la station directrice et retour) et il dépend du protocole utilisé.

Un système de protection adaptative aux évanouissements exige, pour déceler les évanouissements, que soient mesurées les conditions instantanées de la voie, soit par surveillance directe de l'affaiblissement soit par estimation du taux d'erreur binaire. Etant donné le temps d'établissement du système de protection contre les évanouissements, le système devrait tenir compte des caractéristiques dynamiques de l'évanouissement, en particulier de sa vitesse de variation et de la présence de fluctuations rapides, afin de prévoir à l'avance à quel moment sera atteint le niveau d'affaiblissement S correspondant à la qualité minimum admissible et de pouvoir établir en temps utile la protection contre les évanouissements.

Pour ce faire, le moyen le plus simple consiste à entamer la procédure d'établissement quand l'affaiblissement atteint le niveau $S_1 = S - M$, M étant une marge appropriée choisie en relation avec la vitesse de variation statistique de l'affaiblissement. Pour ce qui est de la vitesse de variation de l'affaiblissement, des données expérimentales ont été fournies pour la bande 14/11 GHz.

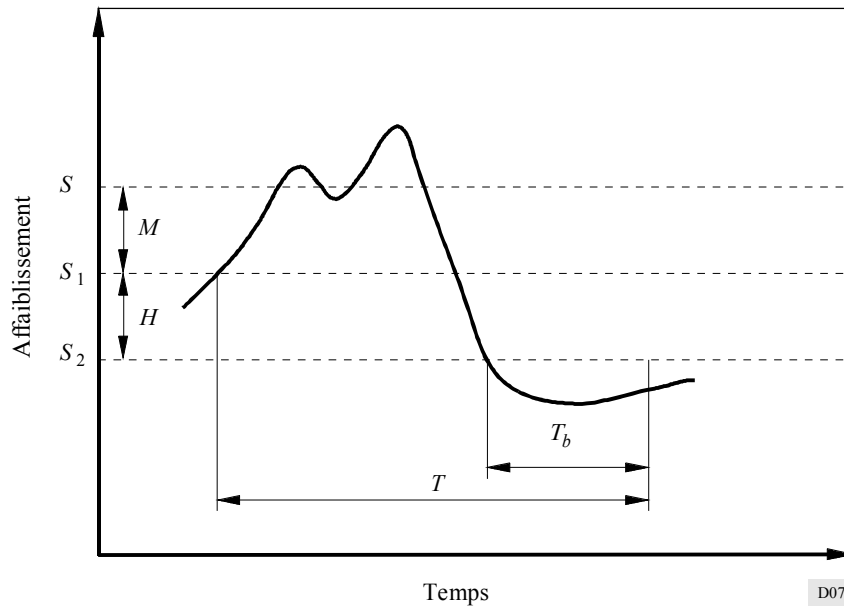
Pour éviter toute interruption au cours du temps d'établissement, il convient de donner à M une valeur suffisante, pas trop élevée toutefois pour éviter une utilisation éventuellement inefficace de la protection contre les évanouissements. L'apparition de fausses alarmes implique que la ressource partagée est utilisée plus longtemps que nécessaire, ce qui peut causer des interruptions en cas de demandes simultanées de capacité de réserve.

La qualité de fonctionnement de cette procédure de commutation a été étudiée et comparée avec celle obtenue en prévoyant le niveau d'affaiblissement sur la base des précédents échantillons d'affaiblissement. On a envisagé des algorithmes fondés sur la régression linéaire pour la prévision en temps réel de l'affaiblissement par la pluie. Si l'algorithme de régression peut prévoir la tendance moyenne de l'affaiblissement, il ne peut pas en prévoir les fluctuations très rapides. Ainsi, pour

obtenir les résultats présentés, on a appliqué l'algorithme de régression à différents nombres d'échantillons précédents et ajouté à la valeur prévue un décalage constant pour compenser les fluctuations très rapides. La ligne parallèle qui passe par le dernier échantillon est prise en considération en plus de la ligne de régression parce qu'elle améliore la qualité de la prévision.

La présence de fluctuations relativement rapides de l'affaiblissement devrait être également soigneusement prise en compte pour le choix de la procédure de mise hors circuit de la protection contre les évanouissements, lorsque ces derniers disparaissent. Dans la pratique, il peut y avoir intérêt à filtrer les oscillations d'affaiblissement en laissant le système à l'état protégé (application de la protection contre les évanouissements) pendant que l'affaiblissement oscille autour du seuil $S_1 = S - M$. La marge contre les fluctuations rapides est représentée par M , dans le cas de l'algorithme de régression. Une solution consiste à introduire une hystérésis H , c'est-à-dire de mettre hors circuit la protection contre les évanouissements quand l'affaiblissement tombe au-dessous du niveau $S_2 = S_1 - H$. Afin de disposer d'une protection supplémentaire contre les fluctuations rapides, la mise hors circuit de la protection contre les évanouissements peut être retardée pendant un intervalle T_b judicieusement choisi. Cette mise hors circuit est déclenchée seulement si l'affaiblissement reste constamment en dessous de S_2 pendant l'intervalle T_b (voir la Fig. 7). La solution consistant à introduire une marge M lors de la mise en circuit et une hystérésis H avec un retard T_b lors de la mise hors circuit implique une réduction d'efficacité du système par rapport à un système avec commande idéale, dans lequel $M = H = T_b = 0$, parce que la capacité de réserve est utilisée pendant une plus longue période par la liaison subissant un évanouissement.

FIGURE 7
Définition des paramètres qui caractérisent la procédure de commutation entre mode normal et mode assisté, ou vice-versa



Pour analyser et comparer la qualité de différents systèmes de commande, deux paramètres ont été examinés. Le premier est le pourcentage d'apparitions d'interruptions pendant le temps d'établissement, par rapport au nombre de fois que la protection contre les évanouissements a été fournie à la liaison subissant un évanouissement. Le second est l'efficacité du système, défini par le facteur d'utilisation $U = (T_{tot} - T_{idéal}) / T_{idéal}$, où T_{tot} est le temps total d'utilisation de la capacité de réserve dans le système et $T_{idéal}$ le temps d'utilisation de la capacité de réserve dans un système à commande idéale.

Le comportement du système a été simulé au moyen de la série des temps d'affaiblissement à 11,6 GHz mesurés avec le satellite Sirio pendant quatre ans (de 1979 à 1982) à la station de Spino d'Adda, dans le nord de l'Italie. Les résultats statistiques obtenus sont fiables, du fait que la masse des données expérimentales disponibles était très importante.

Bien que l'analyse de la procédure de commutation repose sur une série de temps d'affaiblissement à 11,6 GHz, les résultats de la simulation obtenus fournissent aussi une bonne estimation de la qualité statistique de la commutation à 20 et à 30 GHz, comme expliqué ci-dessous.

Quand les résultats expérimentaux concernant l'affaiblissement par la pluie aux fréquences inférieures font l'objet d'une extrapolation aux fréquences supérieures, il convient de tenir compte d'au moins deux phénomènes: l'affaiblissement dû aux hydrométéores et la scintillation due à la propagation par trajets multiples (qu'il faut associer aux variations rapides de l'indice de réfraction équivalent produit par l'air et la diffusion par les hydrométéores).

L'extrapolation de l'affaiblissement par la pluie mesuré a fait l'objet d'études et de bonnes formules d'extrapolation sont à présent disponibles. Comme l'affaiblissement et la scintillation qui se produisent à une fréquence donnée ne sont pas séparés dans les données extrapolées, ces formules empiriques extrapolent les effets des deux phénomènes à une fréquence plus élevée.

Cependant, on ne dispose pas pour le moment d'une extrapolation de fréquence en temps réel et les résultats statistiques de commutation peuvent seulement être extrapolés à partir de seuils fixes à 11,6 GHz vers les seuils correspondant à 20 ou à 30 GHz. Il peut être évident que ces résultats sont, statistiquement, également valables à ces fréquences supérieures. De fait, ces fréquences ne sont pas suffisamment élevées pour faire apparaître des phénomènes physiques imprévus, d'après les quelques résultats connus à ce jour. Les fondements physiques de l'affaiblissement dû à la pluie sont fort bien connus et les expériences concordent bien avec les prévisions d'affaiblissement à long terme. Par ailleurs, les fondements physiques de la scintillation par temps clair ou humide sont bien connus en théorie et les modèles sont expérimentalement confirmés. Les résultats des expériences portant sur les spectres de puissance de scintillation à 11,6 GHz peuvent être extrapolés par des modèles simples pour des fréquences plus élevées. Par exemple, compte tenu des dimensions des antennes et des fréquences de l'expérience de diversité de fréquence prévue avec le satellite européen Olympus, le spectre de puissance de scintillation moyen diminue avec la fréquence f en vertu de la loi théorique $f^{-8/3}$, à partir d'environ 0,5 Hz à 20 GHz et environ 0,6 Hz à 30 GHz; ces données deviennent respectivement 1,6 Hz et 2 Hz dans 95% des cas. A 12,5 GHz, les fréquences correspondantes sont d'environ 0,4 Hz et 1,3 Hz.

L'amplitude des scintillations augmente statistiquement beaucoup moins que l'affaiblissement dû à la pluie. L'écart type de la scintillation, pour un trajet donné et des conditions physiques identiques, augmente seulement comme $f^{7/12}$, alors que l'affaiblissement par la pluie augmente grosso modo comme $f^{1,76}$. En conséquence, on pense que le comportement dynamique global à 20 et à 30 GHz ne diffère pas beaucoup de celui qui a été mesuré à 11,6 GHz, une fois que les seuils d'affaiblissement ont été extrapolés.

5.4 Résultats des simulations

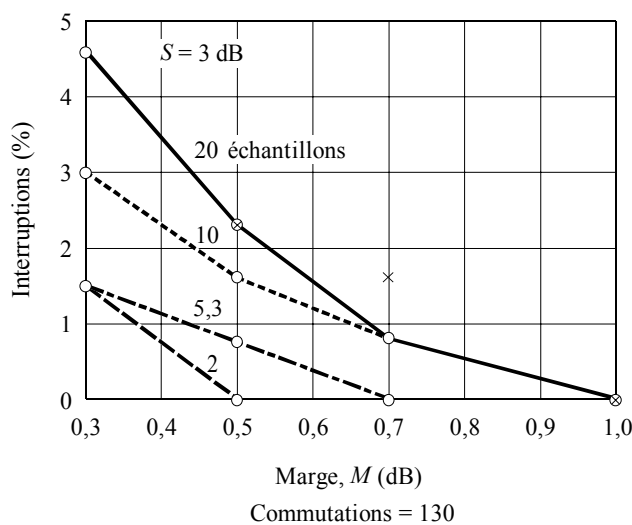
Afin de comparer le pourcentage d'interruptions pendant le temps d'établissement des différentes procédures de commande sur la base d'un même nombre de procédures de commutation accomplies, on a conservé une valeur constante au seuil S_2 de mise hors circuit. Les Fig. 8 et 9 montrent les résultats des simulations effectuées pour un seuil d'interruption $S = 3$ dB, un temps d'établissement $T_c = 2$ s, un seuil de mise hors circuit $S_2 = 1,8$ dB et un intervalle $T_b = 20$ s. Le seuil d'interruption S qui a été choisi est celui qui est dépassé selon une probabilité d'environ 10^{-3} à 11,6 GHz à Spino d'Adda, ce qui correspond à 8 dB environ à 20 GHz.

L'algorithme de prévision repose sur les 20, 10, 5, 3 et 2 derniers échantillons et il utilise une marge contre les fluctuations rapides égale à 0,3 dB, 0,5 dB, 0,7 dB ou 1 dB. Si le niveau d'affaiblissement, prévu avec un temps d'anticipation égal à 2 s (temps d'établissement) plus un temps de garde de 1 s (fréquence d'échantillonnage d'affaiblissement), dépasse le seuil S , la procédure d'établissement est déclenchée. Pour l'algorithme utilisant le seuil préfixé constant, S_1 a été estimé égal à 2,5 dB, 2,3 dB et 2 dB, ce qui correspond à un taux de variation de l'affaiblissement admissible de 0,25 dB/s, 0,35 dB/s et 0,5 dB/s.

Les résultats suggèrent que le système qui applique l'algorithme à seuil préfixé constant présente à peu près la même qualité que celui qui utilise la prévision reposant sur les 20 échantillons précédents. En ce qui concerne le pourcentage d'interruptions, la meilleure qualité est obtenue par la mise en œuvre de la prévision d'affaiblissement basée sur les deux derniers échantillons seulement, moyennant l'adjonction d'une marge de 0,5 dB contre la scintillation. Il est évident, en revanche, que la réduction du nombre d'échantillons précédents pour servir à la prévision allonge le temps d'utilisation des mesures de protection contre les évanouissements, du fait que de fausses alarmes en plus grand nombre peuvent se produire. Le facteur U augmente jusqu'à 1,2 environ, ce qui signifie que le temps d'utilisation de la protection contre les évanouissements dépasse de plus du double le temps total d'utilisation dans le cas idéal. Si la capacité de réserve disponible est faible et si le nombre de stations terriennes qui y font appel est élevé, il pourrait être commode d'appliquer l'algorithme qui améliore l'efficacité du système, même si cela accroît le nombre de courtes interruptions pendant le temps d'établissement. Les longs temps d'utilisation de la protection contre les évanouissements sont également dus à la valeur élevée de l'hystérésis H (0,7 dB) et de l'intervalle T_b (20 s), introduits dans la procédure pour rétablir les conditions normales de transmission. La Fig. 10 montre les résultats des simulations faites pour évaluer l'effet de la réduction de l'intervalle T_b , initialement fixé à 20 s. On a appliqué l'algorithme de prévision en utilisant seulement les deux derniers échantillons et en tenant compte d'une marge contre les fluctuations de 0,5 dB et d'une hystérésis $H = 0,2$ dB. On peut noter que cette valeur d'hystérésis et un intervalle T_b de 10 s sont suffisants pour contrecarrer efficacement les fluctuations rapides, le facteur U diminuant de 1,2 à 0,8.

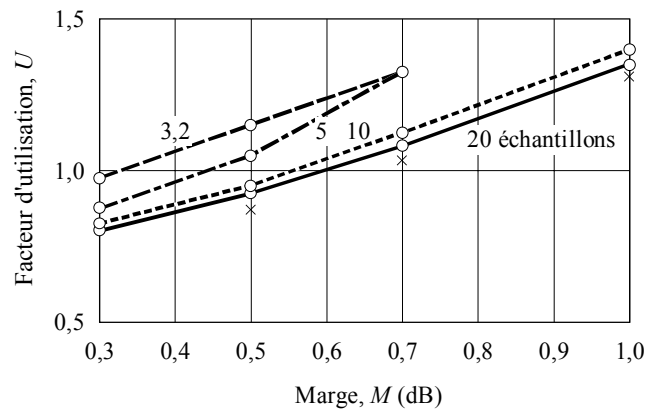
FIGURE 8

Pourcentage d'interruptions attendu pendant le temps d'établissement en fonction de la marge d'anticipation



Les points marqués x montrent les résultats quand un algorithme à seuil préfixé constant est mis en œuvre. Les autres courbes montrent les résultats quand un algorithme de prévision linéaire est mis en œuvre avec le nombre indiqué d'échantillons précédents.

FIGURE 9

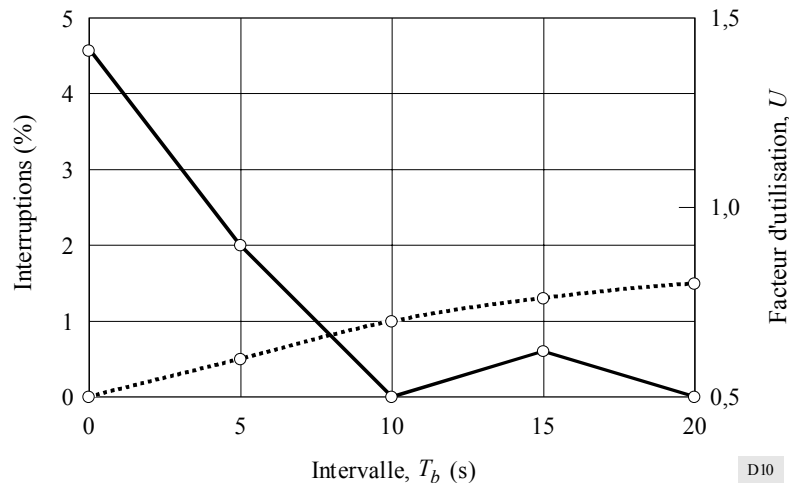
Facteur d'utilisation U en fonction de la marge d'anticipation

Les points marqués x montrent les résultats quand un algorithme à seuil préfixé constant est mis en œuvre. Les autres courbes montrent les résultats quand un algorithme de prévision linéaire est mis en œuvre avec le nombre indiqué d'échantillons précédents. D09

Les résultats des simulations montrent qu'en raison de la nature de l'évolution de l'affaiblissement avec le temps au cours de précipitations, il est difficile de concevoir de bonnes méthodes de prévision. La technique la plus simple et la plus robuste semble consister à prévoir une marge fixe d'anticipation d'amplitude appropriée. Les algorithmes de prévision examinés ici ne peuvent pas améliorer beaucoup la qualité globale de fonctionnement (mesurée par le nombre d'interruptions et par le facteur d'utilisation), par rapport à celui qui repose sur la marge fixe d'anticipation. De toute façon, il est toujours possible d'établir un compromis entre le nombre des interruptions (c'est-à-dire la qualité) et la valeur du facteur d'utilisation (c'est-à-dire la disponibilité). Ce compromis dépend, bien entendu, des conditions requises du système de télécommunication.

FIGURE 10

Pourcentage d'interruptions pendant le temps d'établissement (ligne en trait plein) et facteur d'utilisation U (ligne tiretée) en fonction de l'intervalle T_b . La prévision linéaire repose sur les deux échantillons précédents et la marge contre les fluctuations est de 0,5 dB



D10

5.5 Conclusions

La méthode reposant sur la diversité de fréquence en deux bandes est particulièrement efficace quand de faibles niveaux de probabilité d'interruption sont exigés.

La diversité de fréquence en deux bandes assure de grandes marges de puissance équivalente avec une faible capacité de réserve disponible. Le nombre de voies de secours nécessaires dépend aussi des caractéristiques de corrélation des processus d'affaiblissement en ce qui concerne les différents emplacements des stations.
