

RECOMMANDATION UIT-R F.752-2*

Techniques de diversité pour les systèmes hertziens fixes point à point

(1992-1994-2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation décrit les techniques de diversité pour les systèmes hertziens fixes point à point. Ces techniques couvrent la diversité d'espace, la diversité angulaire, la diversité de fréquence ou des combinaisons de ces techniques. Les principales méthodes pour choisir les techniques de diversité, pour obtenir ou traiter les signaux en diversité sont présentées dans l'Annexe qui décrit des effets concrets de la diversité sur la base de données de propagation. Les techniques de diversité utilisant d'autres supports de transmission de la diversité de trajet/de site qui peut être utilisée pour améliorer la disponibilité des systèmes ne sont pas traitées dans la présente Recommandation.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les évanouissements sélectifs en fréquence entraînent parfois une distorsion et une réduction de la puissance des signaux reçus sur les trajets en visibilité directe et sur les trajets transhorizon et, en conséquence, provoque une dégradation de la qualité de fonctionnement des systèmes hertziens fixes;
- b) que les techniques de diversité permettent d'atténuer les effets des évanouissements sur la qualité de fonctionnement des systèmes;
- c) qu'il est nécessaire d'utiliser des techniques de réception en diversité pour assurer le bon fonctionnement des faisceaux hertziens sur les trajets avec diffraction et sur les trajets transhorizon;
- d) que diverses techniques permettant d'assurer la diversité sur les trajets en visibilité directe, les trajets avec diffraction et les trajets transhorizon ont été étudiés et sont actuellement utilisés;
- e) que l'application des techniques de diversité permet d'assurer un niveau de qualité élevé aux systèmes en visibilité directe à haute efficacité spectrale;
- f) que d'autres précisions sur l'utilisation et l'application des techniques de diversité sont données dans les Recommandations UIT-R P.530 et UIT-R F.1093,

recommande

1 d'utiliser les renseignements fournis dans l'Annexe 1 au moment d'appliquer les techniques de diversité aux systèmes hertziens fixes (voir la Note 1).

NOTE 1 – Le Manuel de l'UIT-R – Faisceaux hertziens numériques contient lui aussi des données utiles sur l'application des techniques de diversité aux systèmes hertziens fixes.

* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

Annexe 1

Techniques de diversité pour les systèmes hertziens fixes point à point

1 Moyens d'obtenir des signaux en diversité

Les méthodes les plus couramment utilisées sont généralement la diversité de fréquence et la diversité d'espace. En diversité de fréquence, les mêmes informations sont transmises sur plusieurs canaux radioélectriques. En diversité d'espace, le signal atteint le récepteur par plus d'un trajet entre antennes d'émission et de réception. Pour décrire la mise en œuvre des techniques de diversité dans différents systèmes fonctionnant dans des conditions de propagation distinctes, il convient d'expliquer d'une manière plus détaillée les méthodes de diversité d'espace.

Les systèmes transhorizon utilisent la diversité tant à l'émission qu'à la réception. Il s'agit d'une diversité multiple avec une souplesse tridimensionnelle complète dans le placement des antennes et parfois d'une diversité angulaire dans laquelle plusieurs faisceaux ou diagrammes de directivité sont formés par une seule antenne. La diversité angulaire permet d'obtenir des signaux relativement décorrelés en tirant parti des variations de l'angle d'arrivée sur l'antenne de réception de l'énergie dispersée.

Sur les trajets en visibilité directe, on réalise généralement la diversité d'espace en utilisant, à la réception, deux antennes ayant une séparation verticale suffisamment grande pour fournir deux signaux dans lesquels les dégradations, à savoir la distorsion du signal et l'affaiblissement de la puissance du signal dus aux évanouissements par trajets multiples, sont suffisamment décorrelés. Le souci d'assurer le bon fonctionnement des liaisons radioélectriques numériques, pour lesquelles la distorsion du signal est la dégradation dominante due à la propagation, a conduit à utiliser des méthodes de diversité qui reposent sur la structure non uniforme du champ électromagnétique incident près de l'antenne de réception principale plutôt que sur une large séparation spatiale pour augmenter la décorrélation entre les dégradations du signal.

Dans ces méthodes, qu'on appelle diversité de diagramme ou diversité angulaire, le signal en diversité émane d'une seconde antenne ou d'un second faisceau qui ont un diagramme de directivité différent ou une ouverture angulaire différente dans le plan vertical et/ou un angle d'élévation différent. Ces méthodes de diversité que l'on peut mettre en œuvre avec des antennes qui ont la même ou presque la même hauteur ou avec des dispositifs d'alimentation multiples dans une même antenne, permettent d'utiliser la technique de diversité sur un bond existant sans avoir à augmenter la hauteur des tours pour aménager cette diversité. Certaines études tendent à établir une distinction entre diversité angulaire et diversité de diagramme, mais d'autres utilisent ces termes d'une manière interchangeable.

Etant donné que l'efficacité de tout système de diversité dépend des corrélations entre les signaux dégradés, les espacements, les angles de pointage et la fréquence, déterminent d'une manière fondamentale, la qualité de fonctionnement des systèmes.

2 Méthodes de traitement des signaux

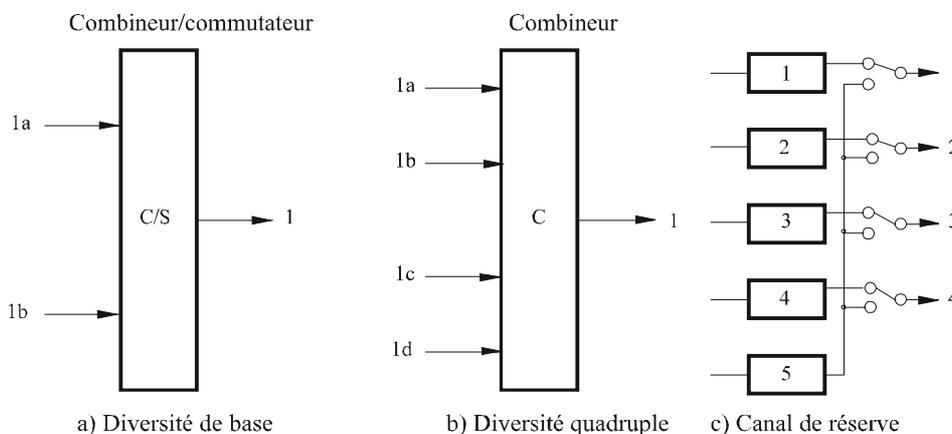
2.1 Dispositions

Les Fig. 1a) et 1b) montrent les dispositions de base dans lesquelles on utilise deux ou quatre signaux pour obtenir une sortie commune ou une décision, dans le cas de certains systèmes numériques. Bien que des systèmes, dans des trajets en visibilité directe, utilisent souvent la

diversité de fréquence pour mettre en œuvre la commutation de protection 1 + 1 avec les dispositions de la Fig. 1a), on utilise plus couramment un ou parfois deux canaux de secours pour plusieurs canaux de travail. La Fig. 1c) montre le schéma pour un fonctionnement 1 + 4. Une telle protection est souvent appliquée conjointement avec la diversité d'espace sur les canaux individuels. Dans des conditions extrêmes, comme celles qu'on rencontre parfois sur les trajets en visibilité directe avec réflexion, la diversité d'espace est utilisée conjointement avec la protection de fréquence 1 + 1. Sur des trajets difficiles, longs ou au-dessus de l'eau, on a aussi utilisé la diversité quadruple, soit sous la forme de diversité d'espace quadruple, soit par combinaison de diversité d'espace double et de diversité de fréquence double.

FIGURE 1

Dispositions dans la combinaison pour diversité



0752-01

2.2 Considérations relatives à la mise en œuvre

Les systèmes actuels mettent en œuvre la technique de diversité en utilisant des combineurs aux fréquences radioélectriques, aux fréquences intermédiaires ou aux fréquences de la bande de base. Il peut s'agir de combineurs utilisant des algorithmes de contrôle de l'égalité du gain, de la puissance maximale ou de la dispersion minimale. Les différences de qualité de transmission étant faibles, le choix du type d'équipement entre ces diverses possibilités est généralement fondé sur la commodité ou la simplicité. Pour savoir si une diversité est nécessaire sur une liaison donnée, il convient de prendre en considération la sévérité prévue des conditions de propagation et les caractéristiques du signal transmis.

L'amélioration réelle qu'on peut obtenir grâce à la diversité dépend de nombreux paramètres, entre autres l'influence de la distorsion d'amplitude dans la bande et du brouillage entre faisceaux sur la qualité de transmission des canaux, et les algorithmes utilisés pour la mise en œuvre de la diversité.

Dans les systèmes hertziens numériques fixes à grande vitesse, on a utilisé les dispositifs de combinaison à dispersion minimale (MID, *minimum dispersion combining*) ainsi que des récepteurs à réception double dans lesquels les signaux avec diversité sont traités par combinaison de puissances maximales (MAP) et le signal composite par égalisation adaptative (EQ). L'emploi de MAP + EQ produit un effet synergique, c'est-à-dire un abaissement considérable du taux d'erreur binaire (TEB). Les méthodes utilisées pour combiner les signaux avec diversité spatiale sur la base

du principe de la puissance maximale qui sont utilisées dans les récepteurs à MAP + EQ peuvent être classées dans les trois catégories suivantes:

- MAPEG ou combinaison de puissances maximales et de gain égal. La méthode qui utilise la sommation linéaire, a l'inconvénient suivant: en cas d'évanouissement complet de l'un des signaux de diversité, le rapport signal/bruit à la sortie du combineur est de 3 dB plus défavorable que celui obtenu avec un récepteur classique.
- MAPEG/SW ou combinaison de puissances maximales gain égal et de commutation. Cette méthode utilise la sommation linéaire et il n'y a pas de perte de rapport signal/bruit à la sortie du combineur lorsque le signal d'entrée en provenance du premier récepteur est coupé quant il devient $(\sqrt{2} + 1)$ plus faible que le signal d'entrée en provenance du second récepteur. Cette méthode a l'inconvénient suivant: lorsque la commutation a lieu, il se produit un processus transitoire donnant lieu, dans les systèmes numériques à grande vitesse, à une augmentation du taux d'erreur binaire.
- MAPOPT ou combinaison optimisée de puissances maximales. Cette méthode ne présente pas les inconvénients inhérents aux systèmes MAPEG et MAPEG/SW. Dans le système MAPOPT, les branches avec diversité à l'entrée du combineur contiennent des atténuateurs électroniques dont l'effet varie automatiquement proportionnellement au rapport des puissances des signaux avec diversité d'espace reçus. Dans un combineur MAPOPT, la sommation linéaire survient en présence d'un fort/faible rapport de puissance entre signaux $\gamma < 7,7$ dB; lorsque l'évanouissement se poursuit, un affaiblissement progressif proportionnel au paramètre γ est introduit dans le trajet du signal faible. Le gain de rapport signal/bruit du système MAPOPT comparé à celui d'un récepteur ordinaire est pratiquement égal au gain tel qu'il est défini par un combineur à sommation optimale (combinaison de rapports maximaux ou MAR).

En ce qui concerne les dispositifs de MID qui sont également utilisés pour combiner les signaux à diversité spatiale, la méthode suivante peut être prise en considération:

2.3 TEB minimum ou stratégie de pondération

Cette méthode est fondée sur une pondération appliquée aux signaux FI (ou en bande de base) reçus et à la dispersion dans la bande afin de réduire au minimum le TEB.

La fonction TEB peut être évaluée en temps réel à partir du niveau reçu du signal et de la dispersion de puissance de ce dernier dans la bande (IBPD, *in-band power dispersion*). Optimiser le TEB évalué revient à optimiser l'interruption de la liaison radioélectrique.

3 Applications aux systèmes transhorizon

3.1 Types de diversité

Les systèmes actuels utilisent la diversité d'espace, la diversité angulaire et la diversité de fréquence, soit séparément soit en combinaison, pour obtenir des signaux suffisamment décorrélés. Pour de plus amples renseignements sur l'application de ces techniques et le calcul de leur efficacité, on se référera à la Recommandation UIT-R F.1101.

3.2 Types de combineurs

Les systèmes transhorizon utilisent généralement des combineurs fonctionnant après démodulation. Les types de combineurs sont par ordre décroissant d'efficacité: le combineur avec rapport maximal, le combineur à égalité de gain et le sélecteur. Au prix d'une très légère réduction de qualité (environ 1 dB pour la diversité quadruple) la combinaison à égalité de gain peut présenter sur la

combinaison avec rapport maximal des avantages tenant à la plus grande simplicité du matériel et de la maintenance. La réduction de qualité précitée peut d'ailleurs encore être diminuée si l'on combine les méthodes à égalité de gain et des combineurs du type sélecteur. Lorsque, dans la combinaison à égalité de gain, les niveaux des signaux reçus sont très différents, la présence du récepteur qui capte le signal le plus faible peut avoir un effet nuisible sur la performance de l'ensemble, mais si, dans ces conditions, on le déconnecte, on peut obtenir un fonctionnement global très voisin de celui d'un combineur avec rapport maximal idéal.

4 Applications aux systèmes en visibilité directe

Les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples sur les trajets en visibilité directe se traduisent par un affaiblissement de la puissance qui peut varier de façon sélective à l'intérieur d'un canal radioélectrique. Ces deux aspects, affaiblissement et dispersion, peuvent être considérés séparément dans certaines applications. Pour les signaux MF et numériques à bande étroite, la qualité de fonctionnement est contrôlée par l'affaiblissement de puissance dans une bande étroite ou à une seule fréquence; pour de nombreux systèmes numériques de grande capacité, la qualité de fonctionnement est contrôlée par la dispersion. Compte tenu de l'évolution rapide des faisceaux hertziens numériques de grande capacité, il est difficile, dans une application donnée, de déterminer quels systèmes sont sensibles seulement à l'affaiblissement, lesquels sont sensibles seulement à la dispersion et lesquels sont sensibles aux deux à la fois. Des modulations comportant un nombre élevé de niveaux sont naturellement plus sensibles aux effets de la dispersion, mais les progrès accomplis dans la conception de l'équipement, comme ceux obtenus avec des égaliseurs améliorés, réduisent la sensibilité des systèmes à la dispersion.

4.1 Considérations relatives à l'affaiblissement de la puissance du signal à une seule fréquence

Sur les faisceaux hertziens en visibilité directe, durant les périodes d'évanouissement par trajets multiples, il est rare que les signaux reçus par deux antennes séparées verticalement subissent simultanément des évanouissements profonds. L'amélioration qui peut être obtenue avec un tel couple d'antennes est définie par le rapport I_0 , dans lequel le numérateur est le temps pendant lequel le niveau du signal provenant de l'antenne de réception principale est inférieur à la marge d'évanouissement et le dénominateur est le temps pendant lequel les niveaux des signaux provenant des deux antennes sont simultanément inférieurs à cette marge. Si P est la fraction d'un mois pendant laquelle les évanouissements sont fréquents et où le niveau du signal reçu sur un canal radioélectrique non protégé est inférieur à une marge particulière, la fraction de temps pendant laquelle le signal protégé en diversité d'espace sur cette liaison à une valeur inférieure à cette marge d'évanouissement est égale à P divisé par I_0 lorsqu'on utilise un système de commutation parfait qui choisit toujours le plus fort des deux signaux reçus.

Pour un système de commutation idéal qui choisit toujours le plus fort des deux signaux reçus, on a établi une relation empirique entre le facteur d'amélioration dû à la diversité d'espace et le niveau des évanouissements, la longueur du trajet, la fréquence et les gains d'antenne pour des trajets où les réflexions au sol sont négligeables.

Le facteur d'amélioration obtenu à l'aide d'un combineur peut être supérieur à celui d'un commutateur idéal, compte tenu de l'addition cohérente de la puissance du signal, mais il dépend de la méthode de contrôle du combineur. Pour une combinaison à égalité de gain et à puissance maximale dans laquelle seule la phase relative des signaux d'entrée est contrôlée, le rapport entre le facteur d'amélioration théorique et celui du commutateur idéal est égal à $3/2$.

4.2 Considérations relatives à la dispersion

On a utilisé aussi bien des combineurs de diversité que des commutateurs de diversité pour réduire l'incidence effective des évanouissements sélectifs dans des systèmes numériques de haute capacité et des systèmes à modulation d'amplitude à bande latérale unique. Pour les applications à diversité d'espace et à diversité angulaire, on a établi des algorithmes de contrôle de la puissance maximale et de la dispersion minimale. Les combineurs appliquent un déplacement de phase relatif aux signaux d'entrée et les additionnent d'une manière cohérente pour atteindre leur objectif nominal: optimisation de la puissance du signal de sortie pour un combineur de puissance maximale; aplatissement de la réponse amplitude/fréquence du signal de sortie pour un combineur à dispersion minimale.

Dans les applications en diversité de fréquence, on utilise généralement des commutateurs fonctionnant dans la bande de base pour choisir, si possible sans créer d'erreur, le signal ayant le TEB le plus faible.

Pour évaluer les techniques de diversité visant à réduire la dispersion, on s'est fondé sur l'observation ou la simulation partielle du fonctionnement de systèmes dans des conditions d'utilisation normale et sur des essais de propagation dans lesquels la dispersion d'amplitude linéaire (LAD) ou la différence de puissance dans la bande (IBPD) a été mesurée. La LAD est la différence en décibels entre l'affaiblissement mesuré près des deux extrémités du spectre de puissance du signal; l'IBPD est la différence en décibels entre l'affaiblissement le plus faible et l'affaiblissement le plus fort mesurés dans la bande du signal. L'utilisation de la LAD ou de l'IBPD est fondée sur les données des essais effectués sur le terrain qui indiquent une bonne correspondance entre l'apparition de ces grandeurs et celle d'un TEB élevé.

4.3 Techniques de diversité pour les systèmes multiporteuses

Dans les systèmes multiporteuses, plusieurs porteuses sont transmises via un seul répéteur. Il existe donc différentes méthodes pour obtenir des signaux en diversité, par exemple combinaison (ou commutation) des signaux ou bien combinaison (ou commutation) des porteuses. Dans le présent paragraphe, on examine ces applications spécifiquement pour les transmissions multiporteuses.

4.3.1 Méthodes de gestion de la combinaison des signaux pour la diversité d'espace

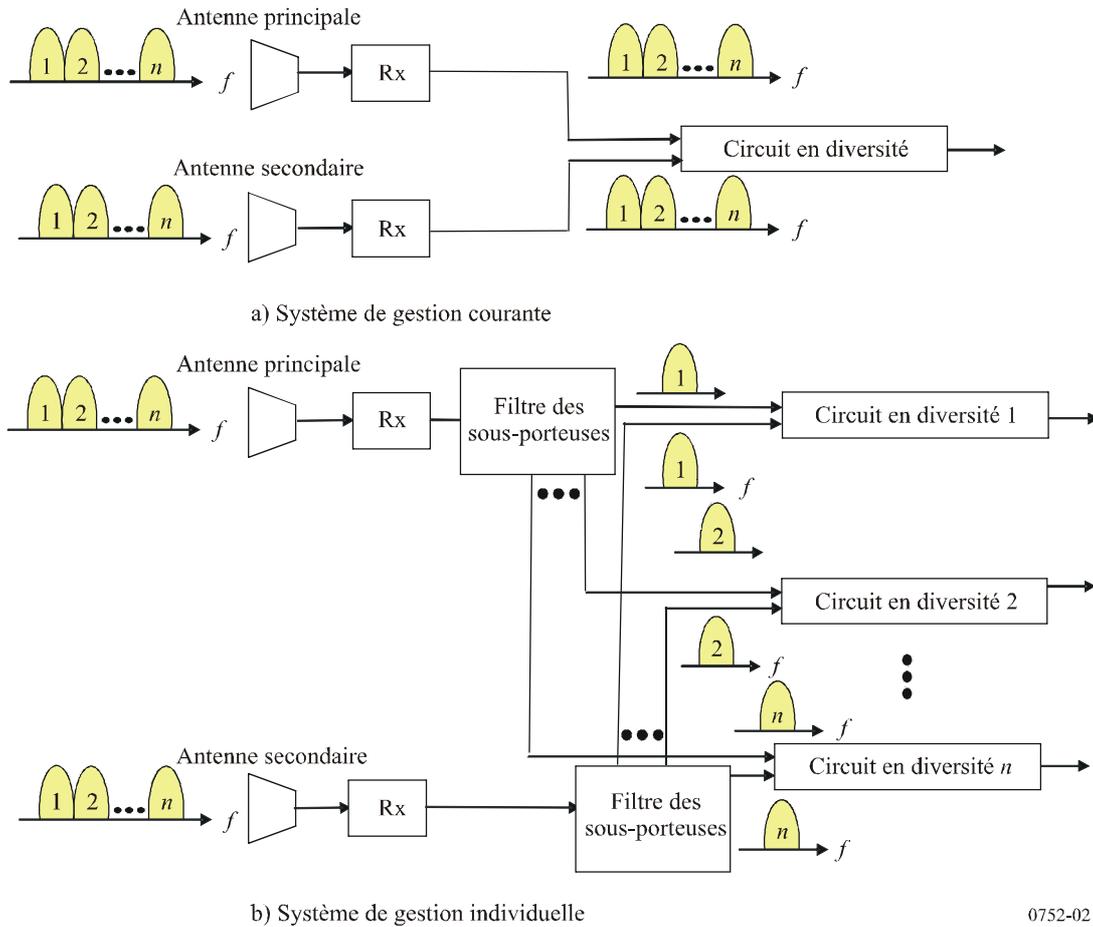
Pour les techniques de diversité d'espace utilisées dans les systèmes hertziens fixes multiporteuses, il existe deux méthodes de gestion de la combinaison des signaux en diversité. La première est une méthode de gestion courante (basée sur la somme des signaux au niveau des récepteurs (Fig. 2a)).

Dans la seconde méthode, un combineur en diversité est associé spécifiquement à chaque porteuse (voir la Fig. 2b)). Il est ainsi possible de faire plus précisément la somme cohérente de la puissance des signaux et donc d'obtenir une amélioration beaucoup plus sensible du phénomène des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples qu'avec la méthode de gestion courante.

La méthode de gestion courante présente l'avantage qu'elle peut être réalisée avec une configuration de circuits relativement simple. Toutefois, grâce aux technologies récentes sur le circuit LSI, il est possible de mettre en œuvre un système de gestion individuelle de façon compacte et économique.

FIGURE 2

Configuration des méthodes de combinaison des signaux en diversité d'espace dans les systèmes multiporteuses



4.3.2 Méthodes de commutation en diversité de fréquence

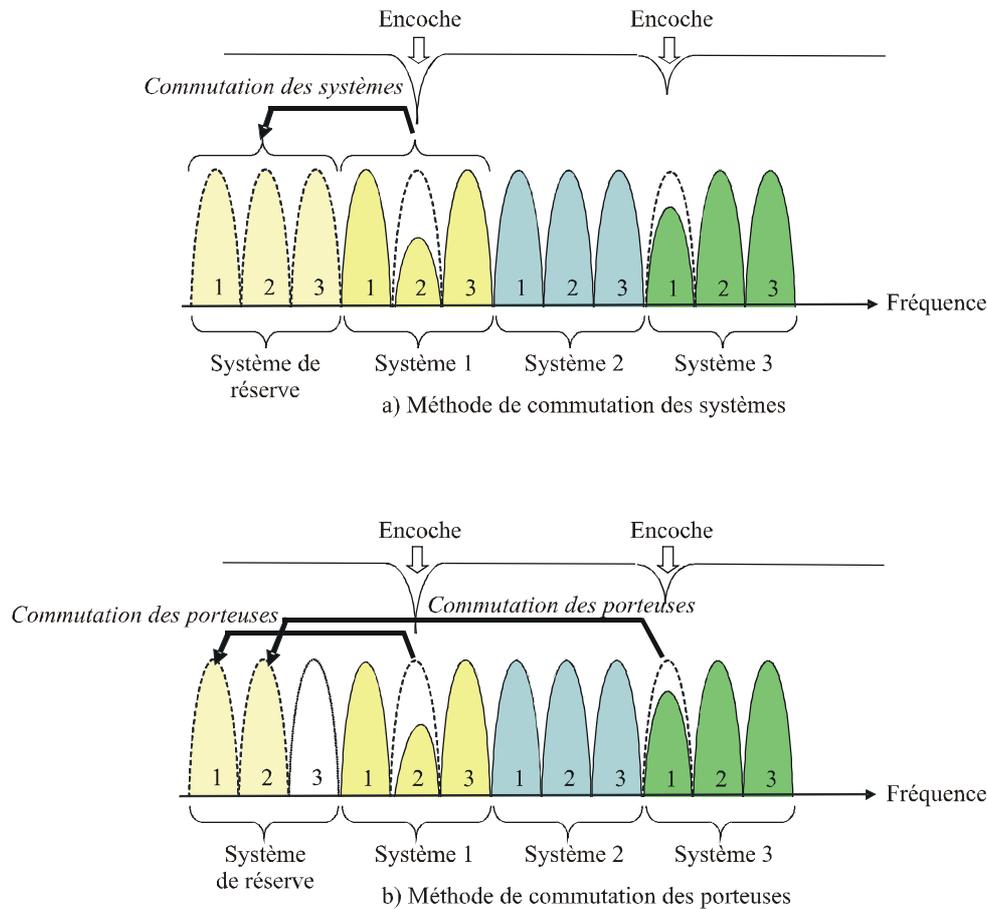
La Fig. 3 illustre deux méthodes possibles de commutation en diversité de fréquence utilisées dans les systèmes multiporteuses. Dans cette Figure prise pour exemple, on part de l'hypothèse qu'il y a trois porteuses par système. Les Fig. 3a) et 3b) illustrent le mécanisme de commutation avec diversité de fréquence et présentent respectivement la méthode de «commutation des systèmes» et la méthode de «commutation des porteuses».

Lorsqu'il y a évanouissement sélectif des fréquences, la dégradation du niveau des différentes porteuses à la réception correspond au niveau d'élimination des évanouissements. Dans le cas d'une commutation des systèmes (Fig. 3a)), toutes les porteuses (porteuses 1, 2 et 3) du système 1 sont commutées sur le système de réserve lorsque l'une des trois porteuses est dégradée. Par conséquent, une autre porteuse dégradée (dans l'exemple considéré, la porteuse 1 du système 3) ne peut pas être commutée sur le système de réserve.

Dans le cas d'une commutation des porteuses (Fig. 3b)), seule la porteuse 2 dégradée du système 1 est commutée sur le système de réserve. Elle sera disponible pour d'autres porteuses dégradées de différents systèmes. Par conséquent, en utilisant efficacement le spectre attribué aux porteuses dans le système de réserve, la méthode de commutation des porteuses permet d'améliorer plus sensiblement l'effet total pour lutter contre l'évanouissement sélectif des fréquences.

FIGURE 3

**Mécanismes des méthodes de commutation en diversité de fréquence
dans les systèmes multiporteuses**



0752-02

La Fig. 4 illustre la configuration pour la méthode de commutation des porteuses. Les signaux des porteuses sont commutés par des commutateurs matriciels 3×3 qui peuvent commuter l'une quelconque des trois porteuses des systèmes en exploitation sur n'importe quel canal de fréquence du système de réserve. La commutation est déclenchée par la détection d'impulsions d'erreur CED et elle est réalisée en conservant la synchronisation des signaux transmis.

4.4 Indications ressortant des données de propagation

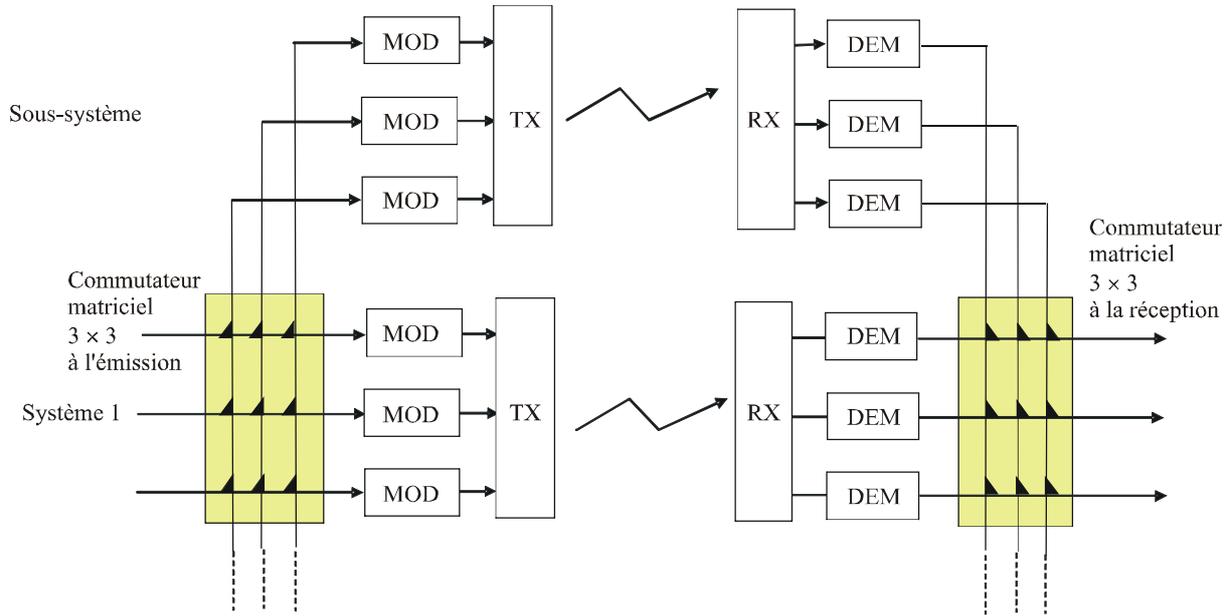
Les systèmes actuels utilisent la diversité d'espace, la diversité angulaire et la diversité de fréquence, soit séparément soit en combinaison, pour obtenir des signaux suffisamment décorrélés.

4.4.1 Diversité d'espace

Lors d'une expérience, des faisceaux numériques de grande capacité ont été équipés de combineurs à puissance maximale et à dispersion minimale. Le combineur à dispersion minimale déterminait la réponse en fréquence en mesurant la forme du spectre; cependant, lorsque le signal combiné baissait au-dessous d'un niveau prédéterminé, le combineur de dispersion minimale fonctionnait comme un combineur à maximum de puissance. La Fig. 5 montre les valeurs calculées et les valeurs mesurées pour un système MAQ-16 et fait ressortir l'amélioration de la probabilité de LAD pour les deux combineurs et pour le fonctionnement sans diversité.

FIGURE 4

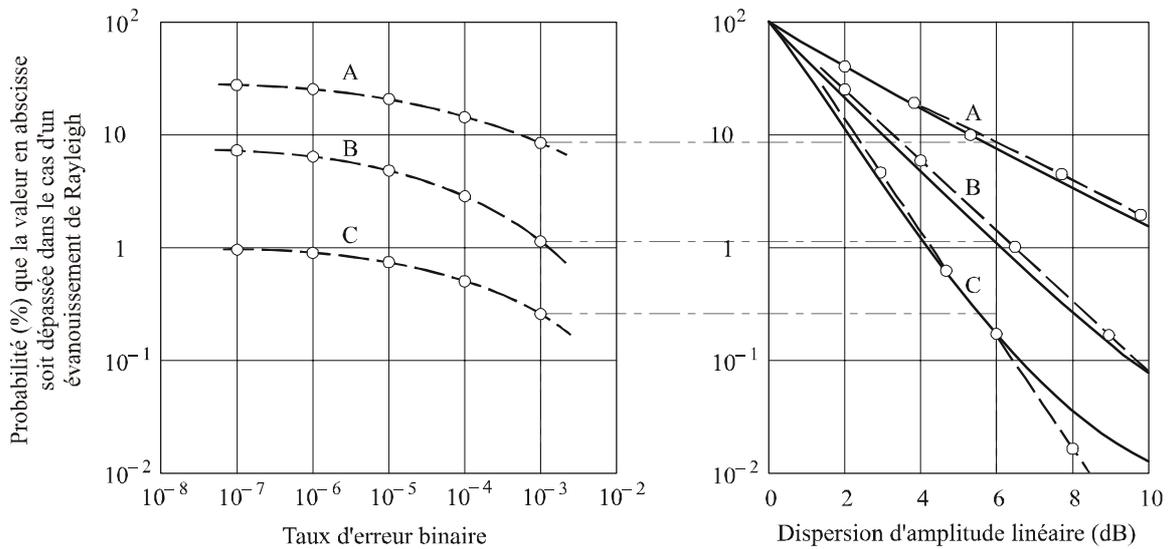
Configuration de la méthode de commutation des porteuses pour les systèmes multiporteuses



0752-04

FIGURE 5

Diagramme montrant l'effet de la diversité d'espace sur la dispersion d'amplitude dans la bande pour un bond unique d'un système modulé en MAQ-16 (bond de 53 km au-dessous de la mer du Japon à la fréquence de 5 GHz pour un débit de 200 Mbit/s et un facteur d'arrondi (roll-off) de 50% sans égaliseur adaptatif)



- A: sans diversité
- B: combineur de puissance maximale
- C: combineur de dispersion minimale
- — ○ valeurs mesurées
- valeurs calculées

0752-05

Sur des systèmes hertziens fixes en visibilité directe, la diversité d'espace a été réalisée avec un espacement vertical des antennes généralement supérieur à 5 m, espacement minimal pour lequel les formules du facteur d'amélioration en cas de diversité d'espace à une seule fréquence sont applicables (voir la Recommandation UIT-R P.530). Ces formules sembleraient indiquer un décroissement de l'efficacité de cette diversité avec des espacements plus faibles, mais des résultats montrent qu'on obtient des améliorations substantielles avec de faibles espacements lorsque les antennes ont des diagrammes de directivité différents dans le plan vertical. En outre, une simulation de liaison numérique indique que l'amélioration due à la diversité peut ne pas tendre uniformément vers zéro même lorsque les antennes sont identiques, en raison de l'interaction des diagrammes d'antenne avec le champ incident. Les différences de diagramme influant sur les facteurs d'amélioration relatifs aussi bien à l'utilisation d'une seule fréquence qu'à la dispersion, les espacements en diversité avec de faibles séparations doivent être considérés comme une forme de diversité de diagramme jusqu'à ce qu'une formulation globale des facteurs d'amélioration soit établie pour les divers cas.

4.4.2 Diversité de diagramme d'antenne ou diversité angulaire

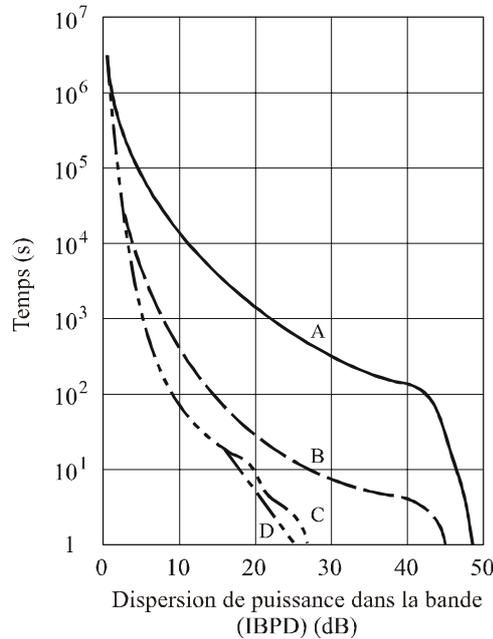
Une des premières études, lors de laquelle on a utilisé la diversité de diagramme par couplage de deux modes différents dans une antenne de réception en cornet, n'a fait apparaître qu'une amélioration modeste, en cas de diversité avec commutation, pour les évanouissements à fréquence pure. Les possibilités d'amélioration importante en diversité qui ont été notées lors d'une expérience concernant des faisceaux hertziens numériques à modulation MDP-4 fonctionnant en cofréquence et en polarisation croisée ont été attribuées à la différence entre les diagrammes de directivité dans le plan vertical et le plan horizontal des antennes d'émission et de réception. Lors d'une étude effectuée sur un trajet long (105 km) au-dessus de l'eau, des mesures de la puissance du signal reçu, qui était un signal numérique MDP-8 de 45 Mbit/s à 7,4 GHz, ont fait apparaître une amélioration importante résultant de la diversité angulaire obtenue à l'aide d'une antenne à double faisceau. On a obtenu des améliorations plus importantes dans la réduction de l'apparition de la dispersion due aux évanouissements par trajets multiples (IBPD) lors d'une expérience dans laquelle deux antennes dissemblables ayant le même angle de visée étaient installées côte à côte. Une expérience dans laquelle les évanouissements ont été mesurés, avec quatre faisceaux formant un réseau dans le plan vertical, sur un bond de 45 km et dans une largeur de bande de 90 MHz à 4 GHz, apporte une confirmation supplémentaire des avantages de la diversité angulaire.

Les résultats de deux expériences de propagation conçues pour permettre une évaluation de la diversité angulaire pour les faisceaux hertziens de grande capacité confirment également les avantages de la diversité angulaire. La première de ces expériences a été effectuée à 6 GHz sur un trajet de 60 km où on savait qu'il se produisait de fortes réflexions sur le sol dans des conditions atmosphériques normales. La diversité angulaire était mise en œuvre avec une antenne à deux sources de rayonnement, qui produisait un premier couple de signaux de diversité sous la forme des signaux «somme» et «différence», et un second couple constitué des signaux des deux sources. A titre de comparaison, la diversité d'espace était contrôlée simultanément à l'aide d'une antenne à cornet conique de 3 m installée à 12,8 m au-dessous de l'antenne principale. Les signaux en diversité étaient obtenus à l'aide d'un combineur à maximum de puissance et on contrôlait les évanouissements en mesurant la puissance reçue sur trois fréquences. Les distributions de l'IBPD à la sortie des combineurs (Fig. 6) montrent que, pendant l'expérience, l'IBPD apparaissait moins souvent avec l'un ou l'autre des signaux d'entrée en diversité angulaire qu'avec les signaux d'entrée en diversité d'espace. A un stade ultérieur, la diversité angulaire a permis de réduire de près de 400 fois le temps d'interruption d'un faisceau hertzien numérique MAQ-64 sur ce trajet.

FIGURE 6

Distributions montrant l'effet de la diversité angulaire et de la diversité d'espace avec une combinaison de puissance maximale sur l'apparition d'une différence de puissance dans la bande (mesurée sur trois fréquences dans une bande de 30 MHz) pour un trajet de 60 km avec réflexions au sol à 6 GHz (Etats-Unis d'Amérique)

Salton à Brawley
1^{er} juin au 10 octobre 1986



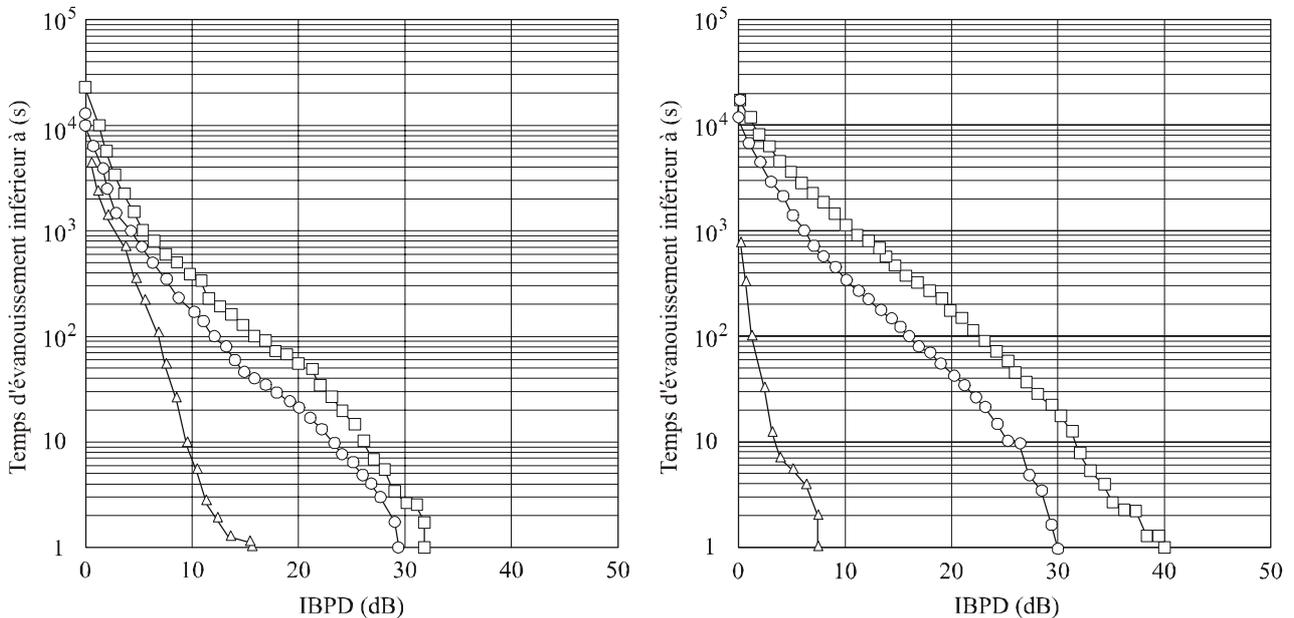
- A: antenne principale, cornet conique de 3 m
- B: combineur avec antenne de diversité en cornet conique de 3 m placé à 12,8 m au-dessous de l'antenne principale
- C: combineur avec signaux résultants et différentiels transmis par une antenne parabolique de 2,4 m à double alimentation
- D: combineur avec signaux de faisceaux supérieur et inférieur transmis par une antenne parabolique de 2,4 m à double alimentation

0752-06

Dans le cadre d'une série d'expériences visant à déterminer les effets de faibles espacements angulaires et spatiaux d'antennes identiques et dissemblables sur un trajet de 38 km en Floride, la diversité angulaire a été implantée, lors d'un essai, avec deux antennes à cornet pyramidal identiques de 3 m installées côte à côte. Lors d'une autre expérience de la même série, le signal en diversité a été obtenu à l'aide d'une deuxième antenne plus petite (1,8 m) située juste au-dessous de l'antenne principale sur la tour. Pour évaluer les évanouissements, on contrôlait la puissance reçue sur 16 fréquences dans une bande de 30 MHz à 6 GHz. La Fig. 7 montre les statistiques relatives au temps d'apparition de l'IBPD pour les deux configurations. Bien que, dans les deux configurations, on constate une réduction substantielle du temps d'apparition de l'IBPD, la réduction obtenue avec une séparation verticale est beaucoup plus importante lors de cette expérience.

FIGURE 7

Distributions montrant les effets de la diversité avec commutation idéale (dispersion minimale) sur l'apparition d'une différence de puissance dans la bande (mesurée sur 16 fréquences dans une bande de 30 MHz) pour un trajet de 37 km à 6 GHz près de Gainesville, Floride (Etats-Unis d'Amérique)



a) Antennes identiques, côte à côte, décalage angulaire vertical de 1°

- Antenne principale, cornet pyramidal de 3 m
- Antenne de diversité, cornet pyramidal de 3 m
- △ Diversité mesurée avec commutation

b) Antennes différentes, toutes deux avec décalage vertical de 3,6 m de l'axe de visée

- Antenne principale, cornet pyramidal de 3 m
- Antenne de diversité, cornet conique de 1,8 m
- △ Diversité mesurée avec commutation

0752-07

D'utiles compléments d'information ont été fournis par des expériences de propagation dans lesquelles on comparait les diversités d'angle et d'espace. Sur un trajet de 55 km près de Darmstadt (République fédérale d'Allemagne) de même que sur un trajet de 51 km à l'Est de l'Angleterre, la diversité d'espace s'est montrée plus efficace que la diversité angulaire. Sur un trajet de 47,8 km près de Richardson, Texas (Etats-Unis d'Amérique), les mesures ont montré que les avantages de la diversité d'espace par rapport à la diversité angulaire dépendaient de la configuration de la diversité angulaire. On obtenait avec une antenne à double faisceau de meilleurs résultats si le faisceau inférieur était pointé sous l'angle nominal d'arrivée que si la direction d'intersection des faisceaux correspondait à cet angle; par ailleurs, une configuration mettant en jeu les signaux «somme» et «différence» était meilleure qu'un ensemble à double faisceau et presque aussi bonne qu'un dispositif à diversité d'espace. Ces résultats ont été confirmés par des données fournies par des mesures météorologiques simultanées.

A partir d'expériences effectuées en Alabama et au Mississippi (Etats-Unis d'Amérique), on a comparé la diversité d'angle et de diagramme à la diversité d'espace. En chacun des emplacements, au cours d'une saison d'évanouissements, il a été constaté qu'avec une antenne double, il était intéressant de pointer une des antennes au-dessus de l'angle nominal d'arrivée et que la diversité d'espace était plus avantageuse que la diversité angulaire. Il a été estimé que la diversité d'espace se révélait plus avantageuse en raison de différences sur les marges d'évanouissement des trajets radioélectriques et des différences concernant la dispersion des évanouissements sur les bonds. A partir de ces résultats et d'autres, on a dégagé la conclusion suivante: lorsque c'est essentiellement la dispersion qui affecte la qualité des radiocommunications numériques, les diversités d'angle et

d'espace sont aussi avantageuses l'une que l'autre. Lorsque l'influence du bruit thermique prédomine, il vaut mieux choisir la diversité d'espace.

Une expérience à 6 GHz sur un bond de 124 km avec de fortes réflexions du lac Léman en Suisse a produit des facteurs d'amélioration extrêmement élevés pour la diversité angulaire et des améliorations légèrement moindres pour la diversité d'espace.

Il ressort d'une expérience de deux ans faite par les Pays-Bas que l'amélioration obtenue avec la diversité angulaire mise en œuvre à l'aide d'une antenne à double faisceau est plus importante si l'un des faisceaux est pointé sous l'angle nominal d'arrivée. Dans cette configuration, l'amélioration était sensiblement équivalente à celle mesurée en diversité d'espace sur sept bonds de longueurs comparables.

4.4.3 Diversité de fréquence

Les données expérimentales indiquent que la diversité de fréquence constitue, contre la dispersion qui affecte les faisceaux hertziens numériques, une mesure plus efficace que contre l'affaiblissement de puissance qui affecte les faisceaux hertziens MF à bande étroite. Lors d'une série d'expériences, on a combiné des essais de propagation avec des mesures du facteur d'amélioration lié à la diversité de fréquence pour un faisceau hertzien numérique 90 Mbit/s, MAQ-16, fonctionnant dans la bande des 6 GHz sur un trajet de 42 km d'Atlanta à Palmetto en Géorgie, Etats-Unis d'Amérique. En traitant le TEB des deux faisceaux hertziens numériques fonctionnant dans des canaux séparés de 60 MHz, comme entrées d'un système de fréquence 1 + 1 avec commutateur idéal, on a obtenu en 1980 et 1982, des données qui font apparaître des facteurs d'amélioration liés à la diversité en fréquence de 100 et 45 respectivement, pour un TEB de 10^{-3} . Cette amélioration est comparable à celle mesurée en diversité d'espace pour une séparation des antennes de 9 m, avec les mêmes faisceaux hertziens sur ce trajet. En revanche, les techniques classiques, fondées sur les évanouissements à une seule fréquence, laissent prévoir un facteur d'amélioration de 9 pour un faisceau hertzien MF analogique avec une marge d'évanouissement comprise entre 30 et 35 dB.

Une expérience effectuée à 6 GHz avec des faisceaux hertziens numériques 90 Mbit/s dans une configuration 1 + 1 sur un trajet de 100 km dans le Wyoming (Etats-Unis d'Amérique) a fait apparaître de même, pour des faisceaux hertziens numériques, une amélioration qui, dans le cas de la diversité de fréquence, était de 10 fois supérieure à celle prévue pour les faisceaux MF.

Lors d'une évaluation expérimentale d'une configuration de diversité de fréquence utilisant un commutateur 3 + 1, on a obtenu un facteur de réduction des interruptions d'environ 5. On avait opéré sur un équipement radioélectrique numérique MDP-4 de 140 Mbit/s fonctionnant à 11 GHz, installé sur un bond unique. L'amélioration ne serait pas aussi grande dans le cas plus fréquent d'un commutateur 5 + 1 protégeant plusieurs bonds.

4.4.4 Diversité quadruple

Il ressort de travaux effectués en Australie sur la diversité quadruple (diversité d'espace quadruple ou combinaison de diversité d'espace double et de diversité de fréquence à bandes croisées, qui est envisagée pour atteindre les objectifs de disponibilité et un taux d'erreur numérique faible sur des trajets difficiles, en particulier les longs trajets au-dessus de l'eau), que cette méthode peut être satisfaisante. Les facteurs d'amélioration mesurés, obtenus à partir de deux expériences menées sur de longs trajets au-dessus de l'eau sont indiqués dans le Tableau 1.

Il ressort qu'on obtient également une bonne amélioration à l'aide de la diversité d'espace quadruple sur un trajet difficile sujet à un évanouissement complet des signaux.

TABLEAU 1

Facteurs d'amélioration obtenus avec la méthode de diversité quadruple par rapport à la diversité double – Mois le plus défavorable, mois typique entre parenthèses

	Expérience 1 158 km	Expérience 2 116 km
Secondes gravement entachées d'erreurs	2,6 (15)	6,5 (29)
Minutes dégradées	1,6 (10)	6,2 (30)
Secondes entachées d'erreurs	1,4 (7,4)	3,7 (4,5)
Secondes non disponibles	2,0 (7,0)	25,0 (> 25)

4.5 Statistiques de dispersion

Des travaux ont été effectués et publiés. Ils donnent des descriptions statistiques des effets de dispersion des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples.

Une évaluation théorique des distributions sans diversité et avec diversité de la dispersion d'amplitude linéaire, sur la base de distributions Rayleigh pour les diverses amplitudes, a été effectuée dans le cadre de systèmes transhorizon. Une étude plus récente a permis d'établir les prévisions de la probabilité pour que la dispersion d'amplitude linéaire dépasse une valeur critique à la sortie des combineurs de puissance maximale et de dispersion minimale.

On a utilisé des simulations de la diversité de fréquence avec un modèle à trois rayons à large bande pour obtenir une description simultanée des évanouissements sélectifs dans tous les canaux d'une bande radioélectrique. Pour une disposition 1 + 1, ce modèle indique que, contrairement au cas des faisceaux hertziens analogiques, dans certaines limites l'amélioration de la qualité des faisceaux hertziens numériques tend à augmenter quand la séparation de fréquence entre les deux canaux diminue.
