

RECOMMANDATION UIT-R F.1704

Caractéristiques des systèmes hertziens fixes multipoint à multipoint ayant une configuration de réseau maillé et fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ

(Question UIT-R 107/9)

(2005)

Domaine de compétence

On trouvera dans la présente Recommandation des indications sur la configuration système et les caractéristiques de systèmes hertziens fixes (FWS, *fixed wireless systems*) multipoint à multipoint (MP-MP) ayant une configuration de réseau maillé et fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ. On trouvera en Annexe une analyse de l'amélioration de la disponibilité et de la réduction de la puissance d'émission ainsi que des effets de la diversité d'acheminement et des fonctions requises pour les systèmes MP-MP.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les systèmes FWS fonctionnent dans différentes bandes de fréquences au-dessus de 17 GHz;
- b) que les administrations mettent en œuvre actuellement diverses techniques permettant l'utilisation de ces fréquences;
- c) que les caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques dans les bandes au-dessus de 17 GHz environ dépendent essentiellement des évanouissements et de l'absorption dus aux précipitations et ne conviennent que pour les applications à courte portée des faisceaux hertziens dans les pays touchés par les précipitations (voir la Recommandation UIT-R P.837);
- d) que les caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques à ces fréquences diffèrent, à certains égards, de celles aux fréquences plus basses et que l'on pourrait tirer parti de certaines de ces différences pour certains types de systèmes;
- e) que la conception des équipements pourrait différer de celle qui est mise en œuvre dans les bandes de fréquences inférieures;
- f) que de nouvelles applications et configurations de réseau sont actuellement utilisées pour le déploiement de systèmes FWS à haute densité dans les bandes supérieures à 17 GHz environ;
- g) que la forte concentration d'utilisateurs du service dans les zones urbaines, suburbaines et industrielles exige une forte densité de terminaux d'utilisateur dans ces zones;
- h) que les systèmes MP-MP présentant une configuration de réseau maillé seraient efficaces du fait qu'ils permettent la diversité d'acheminement;
- j) que, dans certaines conditions, un système MP-MP ayant une configuration de réseau maillé peut être considéré comme une technique efficace pour améliorer la disponibilité ou réduire la puissance d'émission lors du déploiement de systèmes FWS fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ,

recommande

d'utiliser l'Annexe 1 pour obtenir des indications sur la configuration système et les caractéristiques des systèmes MP-MP ayant une configuration de réseau maillé et fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ.

Annexe 1

Configuration de système et caractéristiques des systèmes MP-MP avec une configuration de réseau maillé et fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ

1 Introduction

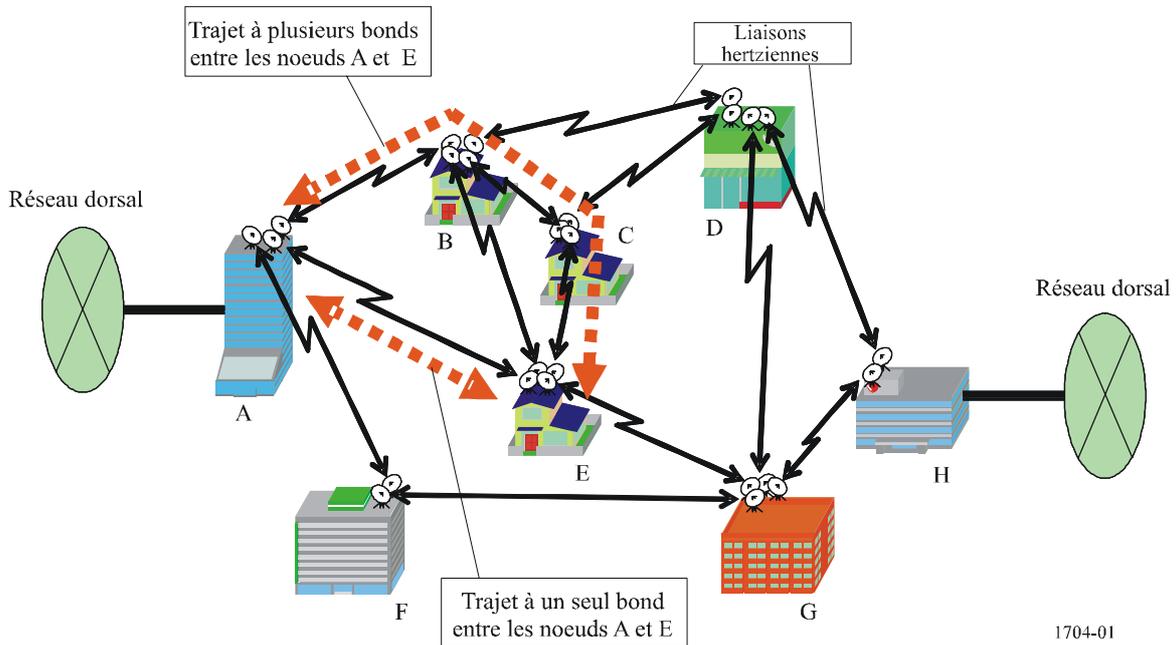
L'utilisation de systèmes MP-MP avec une configuration de réseau maillé est considérée comme un moyen efficace d'atténuer la dégradation de la qualité des télécommunications des systèmes FWS fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 17 GHz environ. On trouvera dans la présente Annexe un aperçu général de la configuration système des systèmes MP-MP présentant une configuration de réseau maillé ainsi que les résultats de l'analyse quantitative de l'amélioration de la disponibilité et de la réduction de la puissance d'émission résultant du gain de diversité obtenu dans une configuration de réseau maillé. On trouvera également dans cette Annexe les prescriptions fonctionnelles du système permettant de tirer parti au maximum des effets de la diversité d'acheminement ainsi que des exemples concrets des fonctions requises. Par ailleurs, des résultats d'expériences en grandeur réelle concernant le gain de diversité sont présentés dans l'Appendice 1 à cette Annexe.

2 Aperçu général de la configuration du système

La Fig. 1 illustre, à titre d'exemple, un système MP-MP ayant une configuration de réseau maillé. Le réseau maillé hertzien comprend des nœuds hertziens qui sont soit des sites d'abonné, soit des nœuds relais sans trafic d'origine/de terminaison soit encore des points d'interface (POI) avec d'autres réseaux tels que ceux des fournisseurs de services Internet. Un nœud hertzien est connecté à d'autres nœuds par l'intermédiaire de liaisons hertziennes. Le trafic de bout en bout est acheminé sur le trajet à un seul bond ou sur des trajets à plusieurs bonds. Alors que le trajet à un seul bond comprend une seule liaison hertzienne, les trajets à plusieurs bonds comprennent plusieurs liaisons hertziennes. On peut considérer le réseau dans son intégralité comme un système MP-MP. Lorsqu'il existe au moins un trajet en diversité dans le réseau, on désigne plus particulièrement le système sous la dénomination «système MP-MP avec configuration de réseau maillé».

FIGURE 1

Exemple de système MP-MP avec configuration de réseau maillé



3 Amélioration de la disponibilité et réduction de la puissance d'émission

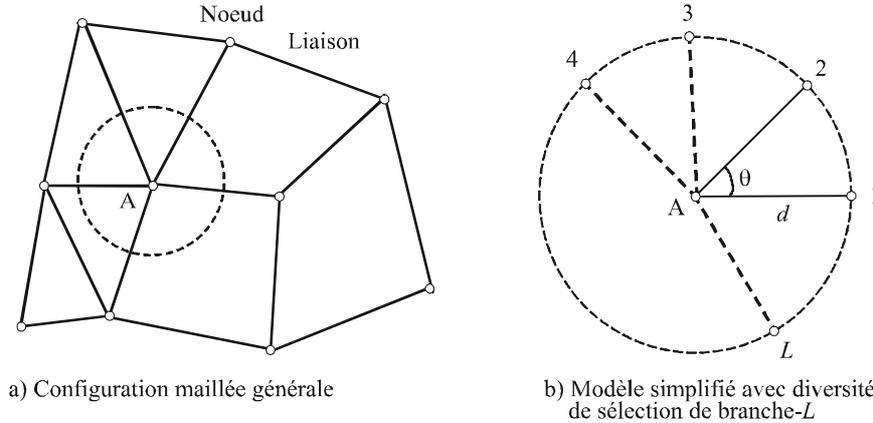
Les systèmes MP-MP présentant une configuration de réseau maillé sont dotés de fonctionnalités intrinsèques qui leur permettent d'assurer une diversité d'acheminement entre une paire de nœuds. Le trafic de télécommunication de bout en bout est transmis à partir d'un nœud d'origine vers un nœud de destination via des nœuds transitoires intermédiaires et qu'il peut y avoir plusieurs trajets entre la paire de nœuds d'origine et de destination. Si l'une des liaisons hertziennes d'un trajet entre une paire de nœuds d'origine et de destination devient indisponible en raison de l'affaiblissement dû à la pluie, le trafic de télécommunication sur le trajet hertzien peut être réacheminé vers d'autres trajets. En raison des effets de la diversité d'acheminement, il est possible d'améliorer la disponibilité des télécommunications de bout en bout offerte par le réseau hertzien maillé proposé par rapport aux systèmes point à point, point à multipoint (P-MP) ou MP-MP classiques qui ne présentent pas de configuration de réseau maillé.

On trouvera dans la présente section un modèle analytique et plusieurs résultats chiffrés de l'étude analytique de l'amélioration de la disponibilité et du gain de diversité de systèmes MP-MP ayant une configuration de réseau maillé. Dans le modèle analytique, la probabilité de dégradation simultanée de liaisons multiples résultant de l'affaiblissement dû à la pluie est exprimée par la fonction de distribution gamma à variables aléatoires multiples avec corrélation.

3.1 Modèle analytique

La Fig. 2 représente un réseau maillé à évaluer. Plusieurs liaisons connectées au nœud A à l'intérieur d'un réseau maillé (voir la Fig. 2 a)) sont simplifiées par un modèle (voir la Fig. 2 b)), où plusieurs liaisons fournissent une diversité de branche- L vers le nœud A. Dans le modèle simplifié, on part du principe que l'écart angulaire θ entre les liaisons adjacentes est identique et que toutes les liaisons ont la même longueur d .

FIGURE 2
Réseau maillé hertzien



1704-02

3.1.1 Indisponibilité du nœud

Dans la Fig. 2 b), le nœud A devient indisponible lorsque toutes les liaisons connectées au nœud sont indisponibles simultanément. En conséquence, la probabilité pour que toutes les liaisons assurant la diversité de branche- L soient indisponibles simultanément est appelée «indisponibilité du nœud (c'est-à-dire probabilité d'interruption)». Admettons que X_i représente une variable stochastique de l'affaiblissement linéique de la $i^{\text{ème}}$ liaison et que $f(X_i, X_j, \dots, X_k)$ soit la fonction de densité de probabilité commune de X_i, X_j, \dots et X_k . L'indisponibilité du nœud $p_{NU}^{(L)}$, qui est la probabilité pour que toutes les branches de diversité vers le nœud deviennent indisponibles simultanément est calculée à l'aide de l'équation:

$$p_{NU}^{(L)} = p_u^{12\dots L} \quad (1)$$

où,

$$p_u^{12\dots L} = \int_x \dots \int_x f(X_1, X_2, \dots, X_L) dX_1 dX_2 \dots dX_L \quad (2)$$

A noter que dans cette équation, x représente la valeur de seuil de l'affaiblissement dû à la pluie pour qu'une liaison hertzienne reste disponible. On suppose ici que la probabilité d'affaiblissement dû à la pluie d'une liaison hertzienne suit une distribution gamma et qu'il existe un certain niveau de corrélation entre les niveaux d'affaiblissement dû à la pluie des liaisons hertziennes. Parallèlement aux distributions gamma à variables aléatoires multiples avec des corrélations arbitraires, on calcule $p_u^{12\dots L}$ à l'aide de l'équation:

$$p_u^{12\dots L} \approx \delta^v \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(v+n)}{\Gamma(v) n!} (1-\delta)^n \left[\frac{\Gamma(v+n, x/\delta)}{\Gamma(v+n)} \right]^L, \quad (3)$$

où:

$\Gamma(a)$: fonction gamma complète;

$\Gamma(a, x)$: fonction gamma incomplète du deuxième type.

L'équation (3) est exacte pour $L \leq 2$ et approximative pour $L > 2$. Le paramètre de forme v a une valeur type de l'ordre de 0,005 à 0,01 dans les pays touchés par des précipitations dans les bandes d'ondes millimétriques.

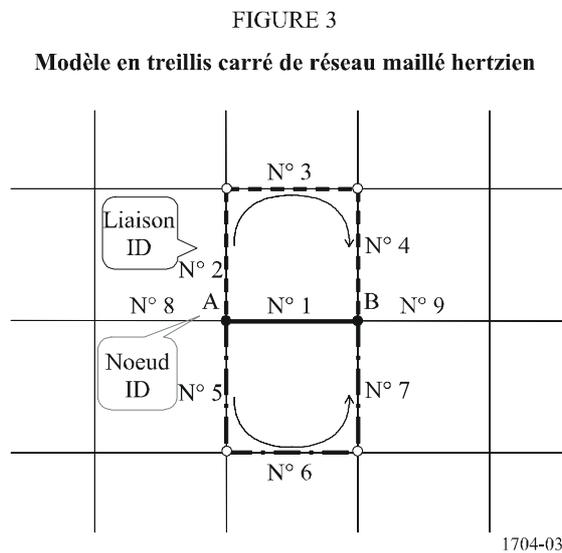
La corrélation entre les branches L est représentée par $\delta = \det(R)^{\frac{1}{L-1}}$, où:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{\rho_{12}} & \cdots & \sqrt{\rho_{1L}} \\ \sqrt{\rho_{12}} & 1 & \cdots & \sqrt{\rho_{2L}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{\rho_{1L}} & \sqrt{\rho_{2L}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ρ_{ij} est un coefficient de corrélation entre les $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ liaison et peut être évalué en établissant la moyenne d'une corrélation spatiale de l'intensité de pluie sur les deux liaisons (à l'aide d'une double intégrale). S'agissant du coefficient de corrélation spatiale de l'intensité de pluie, on utilise en général une formule classique de $\rho_r = \exp(-0,3\sqrt{r})$, où r est une distance entre deux emplacements (km).

3.1.2 Indisponibilité du trajet

Pour examiner l'indisponibilité du trajet de réseaux maillés, un modèle simple en treillis carré est présenté dans la Fig. 3. En ce qui concerne le trajet à liaison unique entre les nœuds A et B, il existe de nombreux autres trajets possibles. L'un des trajets les plus courts, exception faite du trajet à liaison unique entre les nœuds A et B, est celui qui comprend les liaisons N° 2, N° 3 et N° 4. L'autre trajet est celui qui comprend les liaisons N° 5, N° 6 et N° 7.



L'indisponibilité de tous les trajets possibles entre les deux nœuds est appelée «indisponibilité du trajet». Sachant qu'un seul autre trajet possible entre les nœuds A et B comprend les liaisons N° 2, N° 3 et N° 4, mis à part le trajet à liaison unique (ce qui signifie qu'il y a deux trajets en tout), on peut calculer l'indisponibilité du trajet entre les nœuds A et B à partir de l'équation (5):

$$P_{RU}^{A-B(2)} = 1 - (p_a^1 + p_a^{234} - p_a^{1234}) \quad (5)$$

A noter que l'exposant «A-B(2)» de $p_{RU}^{A-B(2)}$ signifie qu'il y a deux trajets entre les nœuds A et B. La variable $p_a^{ij\dots k}$ est la probabilité pour que toutes les liaisons i, j, \dots, k soient disponibles et peut être calculée à l'aide de l'équation (6):

$$\begin{aligned} \rho_a^{ij\dots k} &= \int_0^x \dots \int_0^x f(X_i, X_j, \dots, X_k) dX_i dX_j \dots dX_k \\ &\approx \delta^v \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(v+n)}{\Gamma(v)n!} (1-\delta)^n \left[\frac{\gamma(v+n, x/\delta)}{\Gamma(v+n)} \right]^L \end{aligned} \quad (6)$$

où $\gamma(a, x)$ est la fonction gamma incomplète du premier type. Dans l'équation, L représente le nombre de liaisons (c'est-à-dire, i, j, \dots, k) à prendre en compte.

S'il y a deux autres trajets possibles (c'est-à-dire un trajet comprenant les liaisons N° 2, N° 3 et N° 4 et un autre trajet comprenant les liaisons N° 5, N° 6 et N° 7), on peut calculer l'indisponibilité du trajet entre les nœuds A et B à l'aide de l'équation (7):

$$p_{RU}^{A-B(3)} = 1 - (p_a^1 + p_a^{234} + p_a^{567} - p_a^{1234} - p_a^{1567} - p_a^{234567} + p_a^{1234567}) \quad (7)$$

3.2 Amélioration de la disponibilité et gain de diversité

On trouvera dans les lignes qui suivent quelques résultats chiffrés de l'étude analytique concernant l'amélioration de la disponibilité et le gain de diversité sur la base du modèle analytique fourni dans la section précédente. On suppose que la fréquence des liaisons hertziennes est à 26 GHz, sauf dans le cas de la Fig. 6, qui représente la dépendance du gain de diversité à l'égard de la fréquence.

La Fig. 4 représente l'indisponibilité du nœud en fonction du nombre de branches de diversité (c'est-à-dire les liaisons hertziennes connectées au nœud), L . On trace sur une courbe l'indisponibilité du nœud lorsque l'indisponibilité est de 10^{-2} - 10^{-5} pour chaque branche de diversité. Il y a indisponibilité du nœud sans branches de diversité lorsque $L = 1$. Il apparaît qu'un nombre de branches supérieur à 4 ne donne qu'une amélioration marginale. La Fig. 5 représente l'indisponibilité du nœud en fonction de la longueur de la liaison d dans le cas où $L = 4$. Une diversité à quatre branches avec des liaisons radioélectriques de 2 km avec le nœud permet de réduire l'indisponibilité d'un facteur de l'ordre de 0,3 à 0,5 pour la disponibilité spécifiée de 10^{-2} - 10^{-5} . Plus la longueur de la liaison augmente, plus la corrélation spatiale de l'affaiblissement dû à la pluie entre les liaisons diminue. En conséquence, l'amélioration de l'indisponibilité du nœud augmente en raison des effets accrus de la diversité.

La Fig. 6 a) représente le gain de diversité en fonction de la longueur de la liaison d dans le cas où $L = 4$. Le gain de diversité, qui contribue à l'augmentation de la marge du bilan de liaison, peut contribuer à la réduction de la puissance d'émission et permet d'employer une plus petite antenne avec un gain moins élevé, ou de faciliter la conception du système de réception en assouplissant le facteur de bruit. Il ressort de cette Figure que le gain de diversité augmente de manière quasi linéaire à mesure que la longueur de la liaison augmente. Plus l'indisponibilité du nœud $p_{NU}^{(L)}$ est petite, plus les gains de diversité sont importants. Il ressort également de la Fig. 6 b) que le gain de diversité devient plus important à mesure que la fréquence augmente.

FIGURE 4

Indisponibilité du noeud en fonction du nombre de branche- L

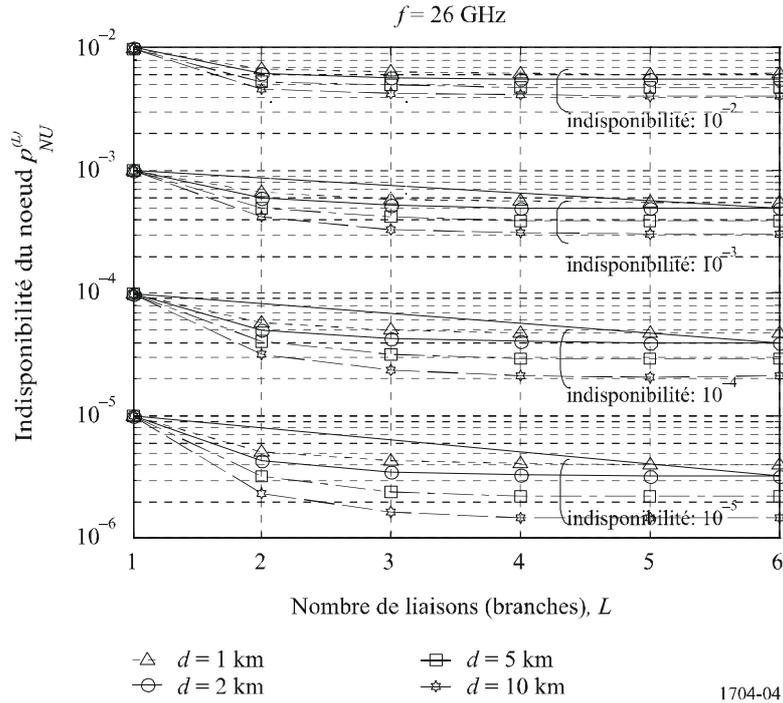


FIGURE 5

Indisponibilité du noeud en fonction de la longueur de la liaison

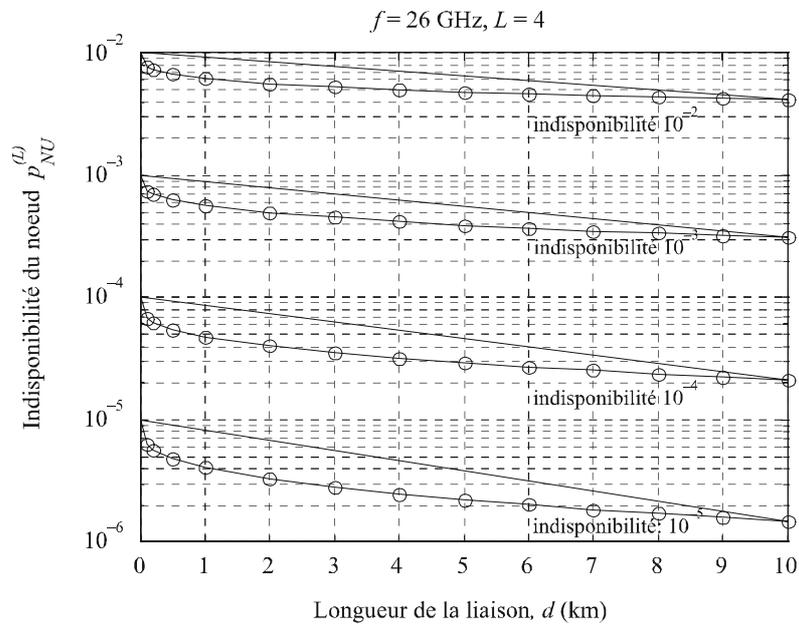
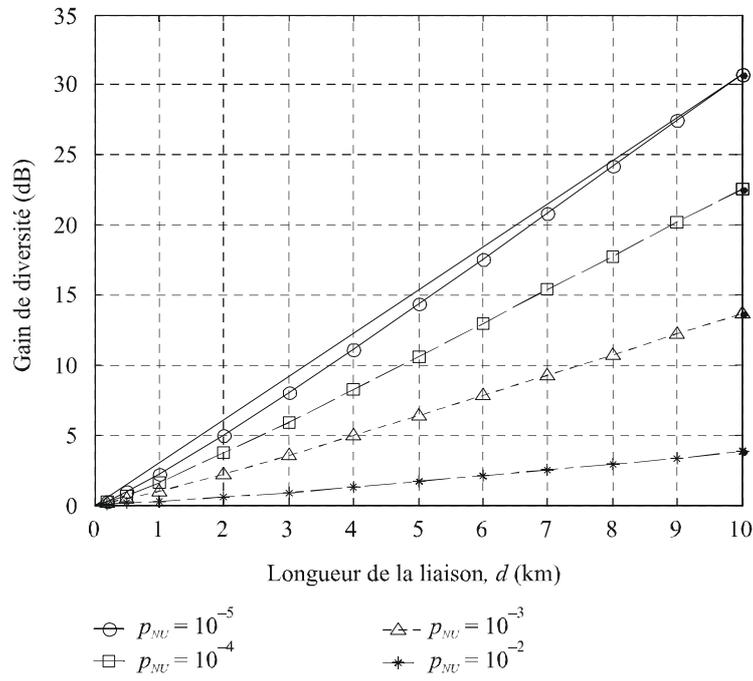


FIGURE 6

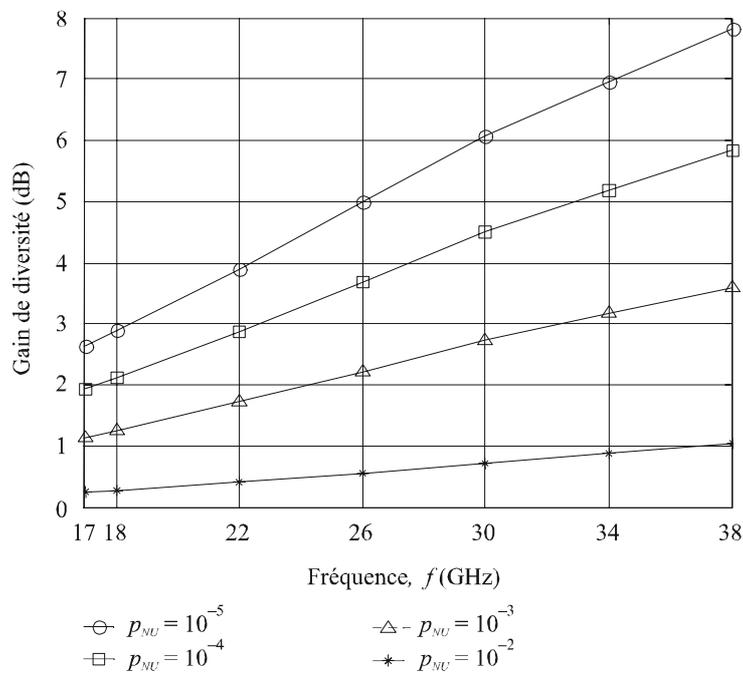
Gain de diversité d'une configuration de réseau maillé du point de vue de l'indisponibilité du nœud

$f = 26 \text{ GHz}, L = 4$



a) Gain de diversité en fonction de la longueur de la liaison

$d = 2 \text{ km}, L = 4$

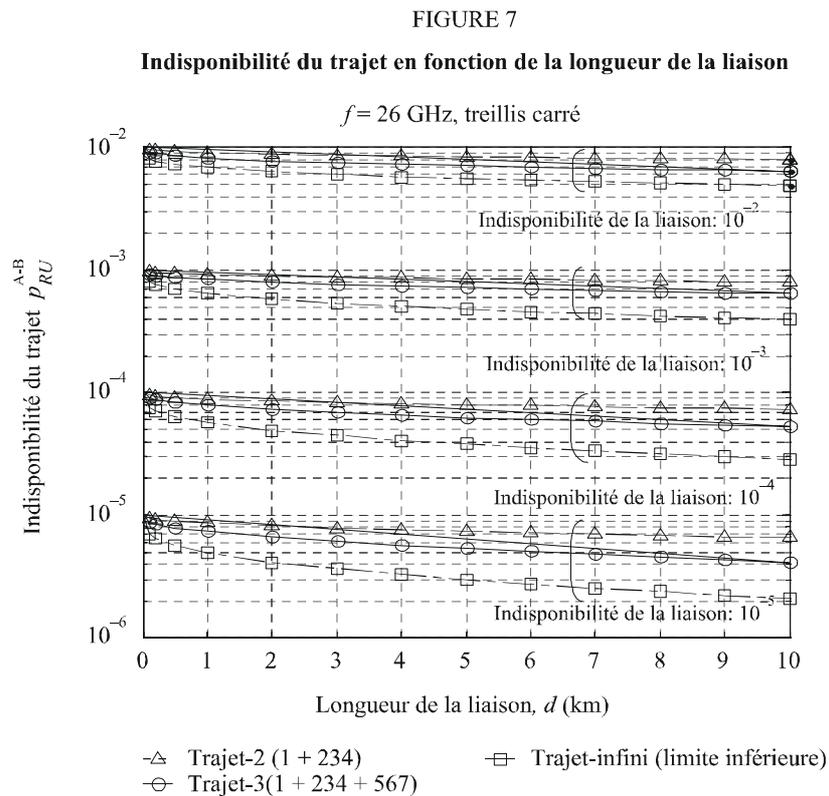


b) Gain de diversité en fonction de la bande de fréquences

La Fig. 7 représente l'indisponibilité du trajet en fonction de la longueur de la liaison d . On considère que plus le nombre de trajets est élevé, plus l'indisponibilité des trajets est faible. La limite inférieure de l'indisponibilité du trajet est également présentée dans la Figure. On obtient une estimation de la limite inférieure en partant de l'hypothèse qu'il existe un nombre infini de trajets entre les nœuds A et B dans la Fig. 3 et on calcule cette limite à l'aide de l'équation (8):

$$p_{RU}^{A-B(\infty)} = p_u^{1258} + p_u^{1479} - p_u^{1245789} \quad (8)$$

Cette équation indique la probabilité pour que l'un ou l'autre des nœuds (c'est-à-dire le nœud A ou B) devienne indisponible.

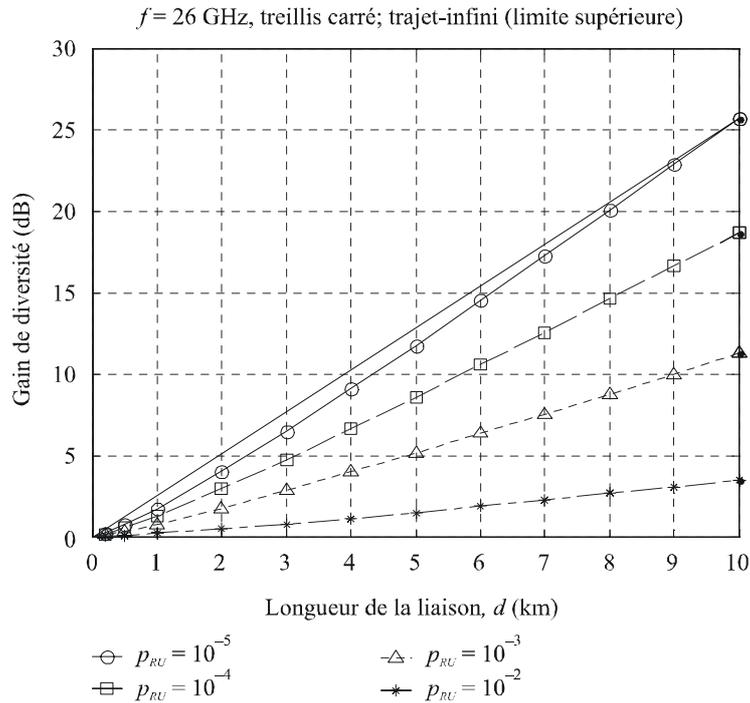


1704-07

Enfin, la Fig. 8 représente le gain de diversité en fonction de la longueur de la liaison d dans le cas où on suppose qu'il existe un nombre infini de trajets entre les nœuds A et B de la Fig. 3. Cela permet d'obtenir la limite supérieure du gain de diversité. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus d'après la Fig. 6.

FIGURE 8

Gain de diversité d'une configuration de réseau maillé du point de vue de l'indisponibilité du trajet



3.3 Résumé des résultats analytiques

Les résultats ci-dessus permettent de dégager les conclusions suivantes:

1. On peut s'attendre à une réduction importante de la puissance d'émission en raison du gain de diversité (par exemple, une réduction de l'ordre de 10 dB est à prévoir dans l'hypothèse:
 - d'une liaison de 4 km de longueur;
 - d'une bande de fréquences de 26 GHz;
 - d'une indisponibilité de la liaison de 1×10^{-5} ;
 - d'une corrélation spatiale de $\rho_r = \exp(-0,3\sqrt{r})$, r étant la distance en kilomètres.
2. On peut s'attendre à un gain de diversité d'autant plus élevé:
 - que l'indisponibilité de chaque liaison est faible;
 - que la liaison est longue;
 - que la bande de fréquences est élevée.
3. Du point de vue des effets de la diversité, quatre branches (liaisons) par nœud sont suffisantes.

4 Fonctions de système nécessaires pour tirer parti de la diversité d'acheminement

4.1 Fonctions requises

Les fonctions suivantes sont nécessaires pour les systèmes MP-MP avec une configuration de réseau maillé, afin de favoriser les effets de la diversité d'acheminement tels que l'amélioration de la disponibilité du trajet et la réduction de la puissance d'émission.

4.1.1 Fonction d'établissement de plusieurs trajets entre une paire de nœuds

Pour tirer parti de la diversité du trajet, il faut prévoir une fonction de réseau permettant d'établir plusieurs trajets, dont des trajets à plusieurs bonds, dans la configuration maillée physique des systèmes MP-MP.

4.1.2 Fonction de sélection du trajet en diversité

Si l'un des trajets configurés devient indisponible, le trafic de télécommunication écoulé sur ce trajet doit être réacheminé vers les autres trajets disponibles. En conséquence, il est indispensable de disposer d'une fonction permettant de sélectionner des trajets appropriés pour faire en sorte que les télécommunications ne subissent aucune interruption sur les trajets. Il convient de noter que l'on peut s'attendre à une efficacité accrue de trajets multiples si l'on utilise un mécanisme d'équilibrage de la charge de trafic pour améliorer la capacité du système.

4.1.3 Fonction de gestion de la qualité de la liaison

Afin d'utiliser la fonction de sélection du trajet en diversité, il faut recueillir des renseignements sur la qualité des liaisons hertziennes assurées sur le réseau maillé. Pour assurer la transmission harmonieuse du trafic de télécommunication entre les trajets et réduire le plus possible la période d'indisponibilité des services de télécommunication, ces renseignements doivent être recueillis et pris en compte suffisamment souvent et rapidement.

4.2 Exemples concrets permettant d'exécuter les fonctions requises

On trouvera ci-après quelques exemples concrets permettant de mettre en œuvre les fonctions décrites plus haut.

4.2.1 Fonction d'établissement de plusieurs trajets entre une paire de nœuds

Les protocoles de routage qui ont été utilisés jusqu'à présent dans la couche du protocole Internet (IP), par exemple les protocoles «premier itinéraire ouvert le plus court» (OSPF, *open shortest path fast*) et le protocole d'information de routage (RIP, *routing information protocol*), ne sélectionnent qu'un seul trajet entre une paire de nœuds d'origine et de destination. En conséquence, pour chaque paire de nœuds d'origine et de destination, des routeurs établissent le trajet unique qui est déterminé par ces protocoles de routage. Toutefois, le routeur de l'architecture du réseau hertzien maillé, qui est fourni à chaque nœud hertzien, doit être doté d'une fonction permettant de transmettre des paquets de données IP vers plusieurs trajets.

La technologie de commutation multiprotocole avec étiquette (MPLS, *multi-protocol label switching*) est une méthode prometteuse pour l'établissement de plusieurs trajets, étant donné qu'elle permet d'établir expressément plusieurs trajets. Pour une série de trajets pour chaque nœud de sortie, le routeur à un nœud d'entrée établit des chemins étiquetés (LSP, *label switched paths*) correspondant aux trajets utilisant cette technologie.

4.2.2 Fonction de sélection du trajet en diversité

Le choix de plusieurs trajets entre une paire de nœuds d'entrée et de sortie peut se faire de diverses manières. Dans l'optique de l'utilisation efficace des ressources du réseau maillé, il faut utiliser un mécanisme de sélection du trajet adoptant les techniques d'ingénierie du trafic. A cette fin, il convient de choisir des trajets qui permettent de réduire le plus possible la valeur maximale de la charge de trafic dans les trajets. Pour déterminer les trajets optimaux sous l'angle de l'ingénierie du trafic, une méthode heuristique proposée consiste à segmenter la demande de trafic à chaque nœud d'entrée en une petite partie de demande de trafic, qui est attribuée à l'un des trajets disponibles entre les nœuds d'entrée et de sortie, tout en réduisant le plus possible la charge de trafic maximale parmi les charges de trafic des trajets.

Par ailleurs, pour tirer parti des avantages de l'effet de détournement qui existent dans les réseaux maillés, il convient de choisir comme trajets en diversité des trajets présentant une faible corrélation spatiale. On peut obtenir les trajets en diversité présentant une faible corrélation spatiale de la façon suivante.

Etape 1: Calculer le coefficient de corrélation spatiale $r(i, j)$ entre une liaison i d'un trajet x et une liaison j d'un trajet y différent du trajet x .

Etape 2: Définir le coefficient de corrélation spatiale $r'(x, y)$ d'une paire de trajets x et y comme étant $r'(x, y) = \max_{i \in x} \{ \max_{j \in y} r(i, j) \}$ et calculer $r'(x, y)$ de toutes les paires de trajets.

Etape 3: Sélectionner le trajet ayant la plus petite valeur de $r'(x, y)$.

Pour intégrer les deux méthodes ci-dessus, qui permettent de déterminer les trajets en diversité, on sélectionne le trajet x comme étant le trajet déterminé par la méthode en tenant compte de l'ingénierie du trafic. En conséquence, les trajets multiples entre des paires de nœuds d'entrée et de sortie satisfont à la prescription liée à l'utilisation efficace des ressources du réseau maillé dans des conditions météorologiques normales (c'est-à-dire des conditions météorologiques sans précipitations), tandis que les trajets en diversité présentant une corrélation spatiale minimale avec des trajets normaux sont utilisés de manière efficace aux fins du détournement du trafic en cas de précipitations.

4.2.3 Fonction de gestion de la qualité des liaisons

Afin de tirer parti au maximum des ressources du réseau, il convient d'informer tous les nœuds du réseau maillé de la qualité des liaisons hertziennes et de la demande de trafic immédiatement après un changement de la qualité de ces liaisons et de cette demande. A cette fin, il convient de transférer la qualité des liaisons hertziennes connectées à un nœud de l'unité radioélectrique vers le routeur du nœud, le routeur étant tenu de disposer d'une fonction de surveillance de la demande de trafic. On peut procéder au transfert des informations sur la qualité de liaison à partir de l'unité radioélectrique en connectant une session de protocole de commande de transmission (TCP, *Transmission Control Protocol*) entre l'unité radioélectrique et le routeur et en mettant en œuvre les télécommunications TCP/IP. Par ailleurs, les routeurs proposés sur le marché sont normalement équipés d'une fonction de surveillance du trafic.

En plus de la fonction de collecte des informations locales au niveau des routeurs, ceux-ci doivent être munis d'une fonction d'échange d'informations sur la liaison et la demande de trafic. Une solution consiste à utiliser l'option «LSA (annonce d'état de liaison) opaque» du protocole OSPF. Une fois qu'un routeur du réseau maillé reconnaît un changement dans la qualité de la liaison hertzienne ou dans le volume de trafic, l'information sur ce changement est communiquée à tous les routeurs du réseau au moyen d'un mécanisme d'inondation (voir la Recommandation UIT-T E.360.4). L'information échangée en provenance d'autres nœuds hertziens est mémorisée dans la base de données sur les états de liaison (LSDB, *link state database*).

Appendice 1 à l'Annexe 1

Exemple de données d'expériences en grandeur réelle sur les effets de la diversité d'acheminement

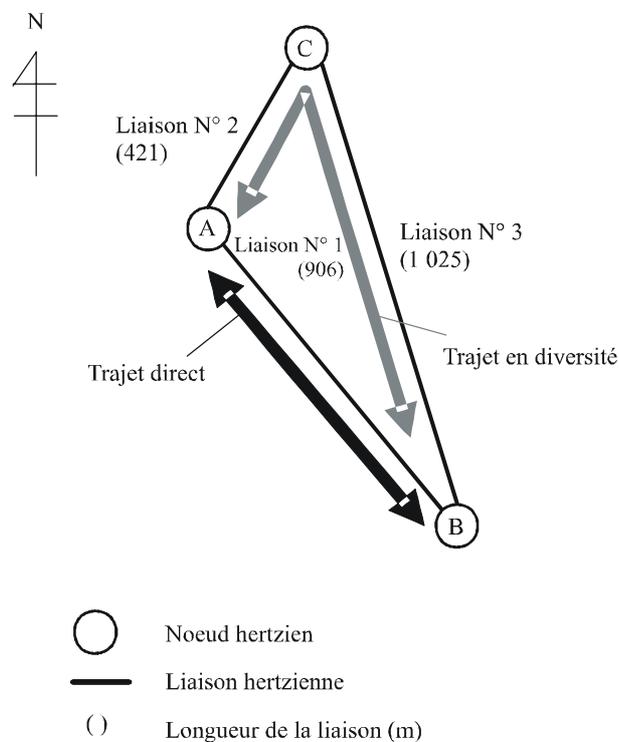
On trouvera dans le présent Appendice les résultats d'expériences en grandeur réelle concernant l'affaiblissement dû à la pluie sur des liaisons hertziennes dans un réseau maillé et quelques exemples de diversité d'acheminement.

1 Mise en place d'un réseau maillé hertzien – Paramètres de système

Le réseau maillé présenté dans la Fig. 9 a été mise en place à Kamifukuoka (Saitama, Japon), près de Tokyo. Le réseau maillé hertzien utilisé pour les expériences en grandeur réelle comprend trois nœuds hertziens et trois liaisons hertziennes. Comme le montre la Fig. 9, la liaison N° 3 est la plus longue des trois liaisons. Un nœud hertzien comprend des unités radioélectriques et un routeur hertzien, qui est doté des fonctions indiquées au § 4.2 de l'Annexe 1. Les principales spécifications système des prototypes d'unités radioélectriques sont exposées dans le Tableau 1. On a mesuré les niveaux du signal reçu pour les liaisons hertziennes. L'intervalle de mesure était de 1 s.

FIGURE 9

Réseau maillé hertzien mis en place pour des expériences en grandeur réelle



On sait que l'affaiblissement dû à la pluie diminue à mesure que la longueur de la liaison devient plus courte. En conséquence, on considère qu'un trajet à plusieurs bonds comprenant des liaisons courtes présente un affaiblissement dû à la pluie peu élevé par rapport à un trajet à un seul bond comprenant une longue liaison. Par conséquent, on peut prévoir le gain de diversité en choisissant ce trajet à plusieurs bonds comportant des liaisons courtes.

L'un des avantages des réseaux maillés est qu'ils permettent d'obtenir des gains de diversité même lorsqu'un trajet en diversité avec une longue liaison est sélectionné. Dans la Fig. 9, on suppose que la liaison directe entre les nœuds A et B est la liaison N° 1 et que le trajet en diversité entre la paire de nœuds comprend les liaisons N° 2 et N° 3 qui est la liaison la plus longue. La présente section porte principalement sur le gain de diversité obtenu avec un trajet en diversité.

TABLEAU 1

Principales spécifications des prototypes d'unités radioélectriques

Fréquence radioélectrique (RF) (GHz)	26,80-26,86
Nombre d'intervalles de fréquence	7 dans la bande des 60 MHz
Séparation entre les intervalles de fréquence (MHz)	8,5
Mode duplex	DRT
Puissance d'émission maximale par porteuse (mW)	50
Gain d'antenne (dBi)	35

2 Données mesurées sur l'affaiblissement dû à la pluie

La Fig. 10 fait apparaître des écarts entre les valeurs relatives de l'indicateur du champ du signal reçu (RSSI, *received signal strength indicator*) de chacune des liaisons hertziennes du réseau maillé. Dans les Figures, les mesures commencent à 15 h 30 et se terminent à 18 h JST (heure japonaise) le 29 juillet 2004, journée marquée par de fortes précipitations, par intervalles, provoquées par un typhon.

La Fig. 11 présente le taux de précipitation et les précipitations enregistrées pendant la même période que la Fig. 10. Les précipitations ont été mesurées au moyen d'un pluviomètre, qui génère une impulsion lorsqu'une quantité de 0,5 mm de pluie est recueillie dans l'auge du pluviomètre et est installée au niveau du nœud A. Il ressort de la Fig. 11 que le taux maximal de précipitations instantanées atteint près de 130 mm/h et qu'il y a eu trois épisodes de fortes pluies pendant la période considérée. Les deux Figures confirment également que les niveaux RSSI diminuent fortement en cas de fortes précipitations. Le niveau maximal d'affaiblissement dû à la pluie a atteint plus de 26 dB en raison de ces fortes précipitations.

FIGURE 10

Valeurs relatives de l'indicateur RSSI dans le cas de liaisons hertziennes d'un réseau maillé entre 15 h 30 et 18 heures (heure japonaise) le 29 juillet 2004

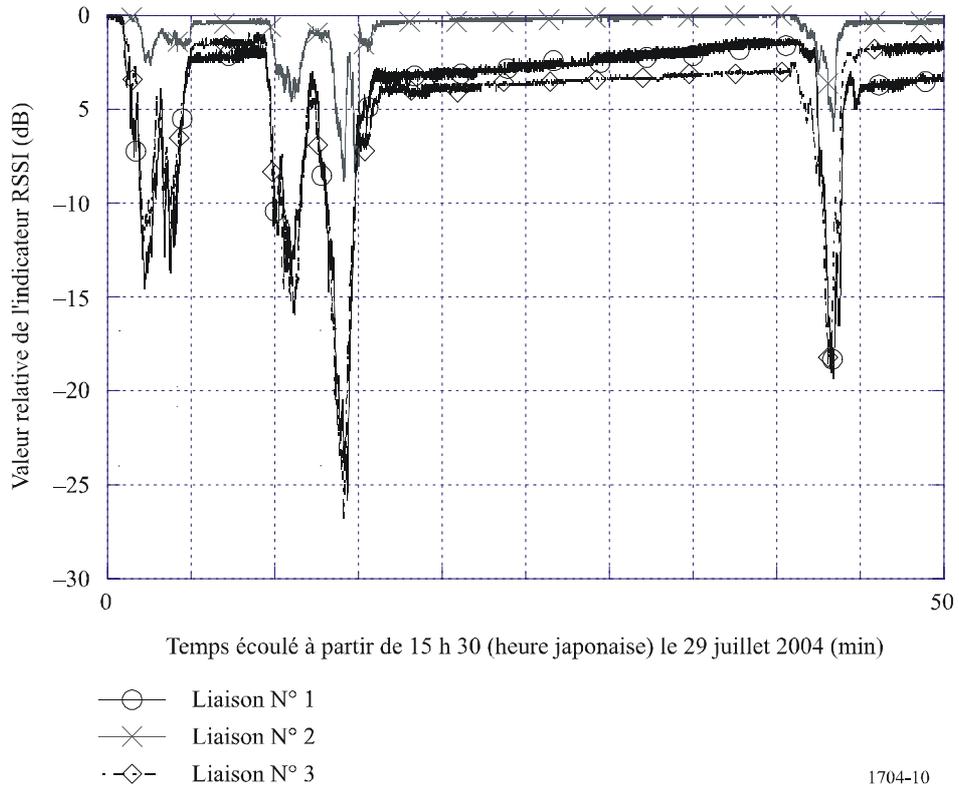
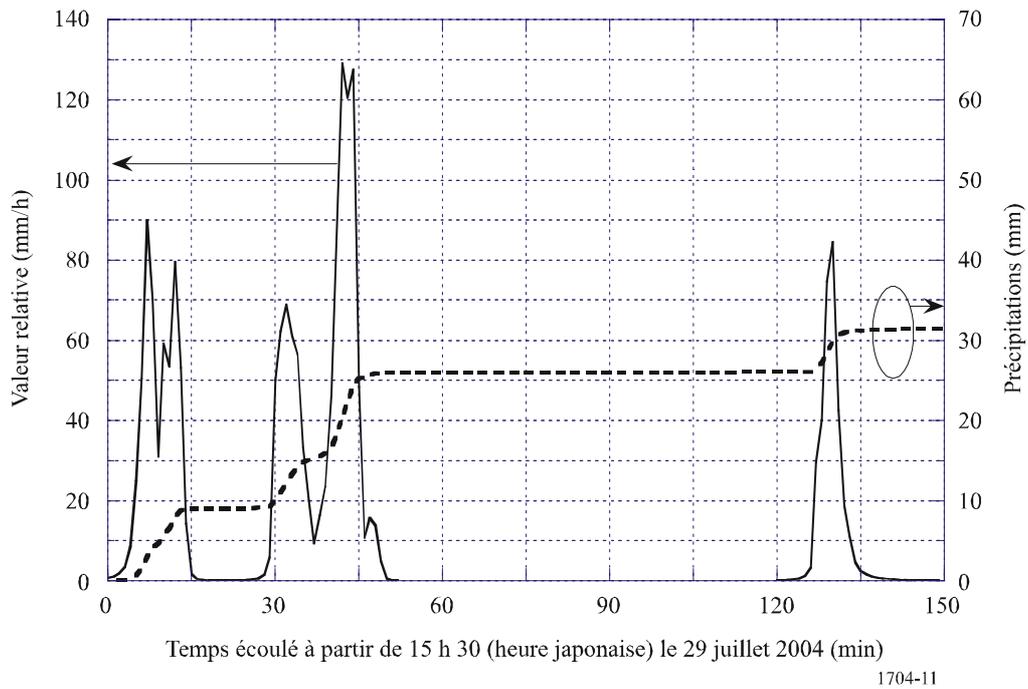


FIGURE 11

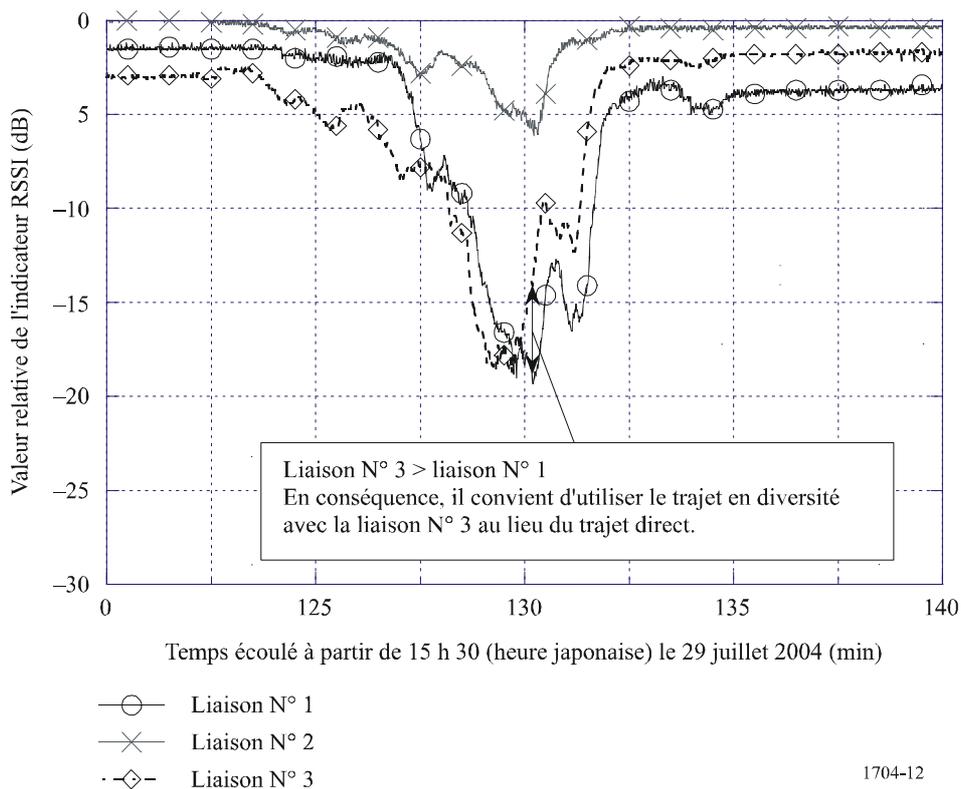
Taux de précipitation et précipitations au niveau du nœud A entre 15 h 30 et 18 heures (heure japonaise) le 29 juillet 2004



La Fig. 12 se limite à un laps de temps pendant la période de mesure indiquée dans la Fig. 10. Il apparaît que, pendant ce laps de temps, le trajet en diversité, y compris la liaison la plus longue (liaison N° 3) présente un niveau de RSSI plus élevé que le trajet direct de la liaison N° 1, car il y a un temps de décalage au niveau de crête de l'affaiblissement dû à la pluie entre les liaisons N° 1 et N° 3, ce qui signifie qu'il faut choisir le trajet en diversité. En conséquence, on obtient un effet de diversité.

FIGURE 12

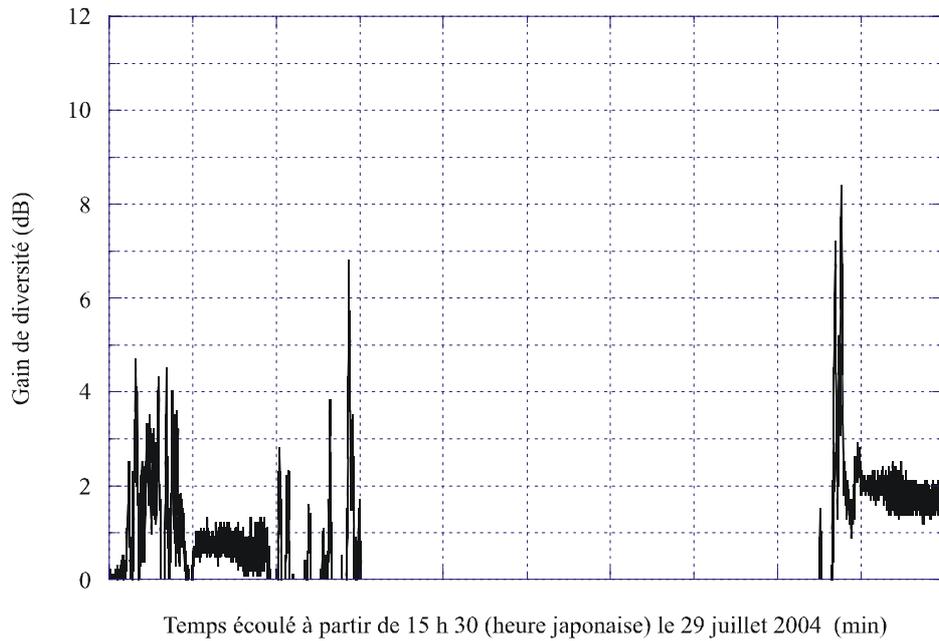
Exemple de gain de diversité d'acheminement en utilisant la liaison la plus longue



Compte tenu de l'analyse ci-dessus, le gain en diversité est défini comme étant l'indicateur RSSI de la liaison N° 3 moins celui de la liaison N° 1. La Fig. 13 représente des données de séries chronologiques sur le gain de diversité pour la même période que la Fig. 10. Il ressort de la Fig. 13 que le gain de diversité maximal a atteint plus de 8 dB et que l'on peut s'attendre à un gain de diversité en cas de fortes précipitations. Même dans ce réseau maillé de petite dimension avec une longueur maximale de la liaison d'environ 1 km, la Figure montre que l'on peut s'attendre à un gain de diversité.

FIGURE 13

Données de séries chronologiques sur le gain de diversité entre 15 h 30 et 18 heures (heures japonaise) le 29 juillet 2004

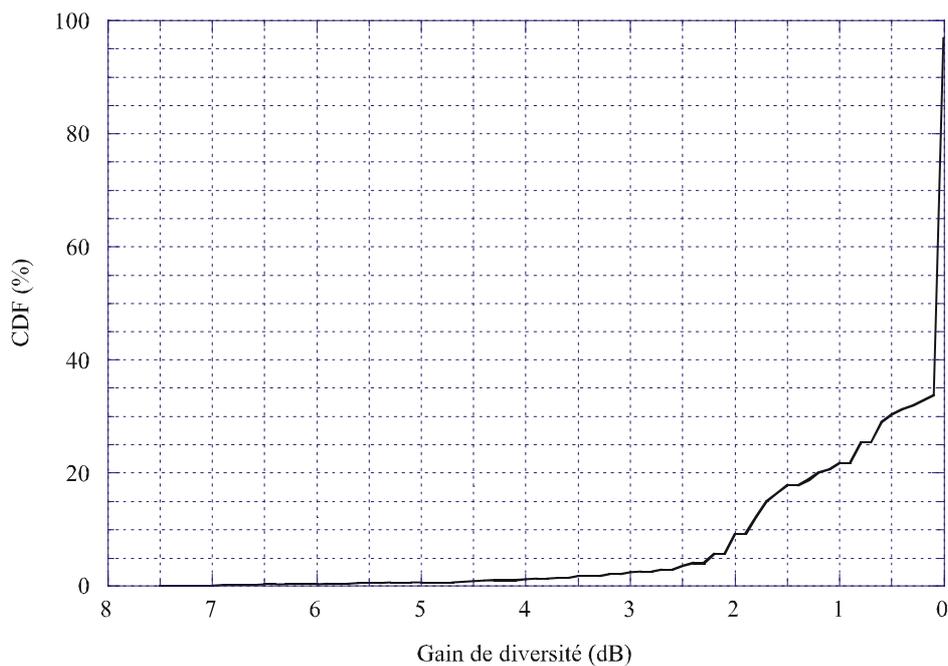


1704-13

La Fig. 14 présente la fonction de distribution cumulative (CDF) du gain de diversité. On a obtenu un gain de diversité d'au moins 1 dB pendant plus de 20% du temps au cours de la période de mesure comprise entre 15 h 30 et 18 h (heure japonaise) le 29 juillet 2004. La Figure montre également qu'un gain de diversité d'au moins 3 dB a été obtenu pendant 2,4% du temps au cours de la période considérée.

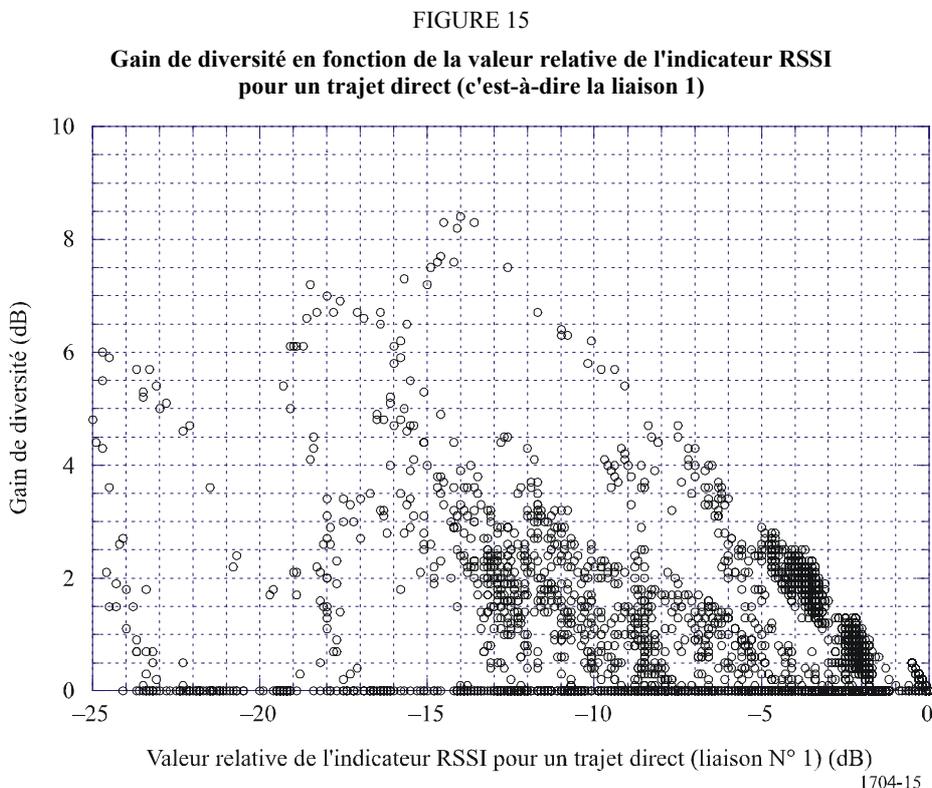
FIGURE 14

CDF du gain de diversité



1704-14

Enfin, on trouvera dans la Fig. 15 un diagramme de dispersion sur le gain de diversité en fonction du niveau RSSI du trajet direct (c'est-à-dire la liaison N° 1), qui permet de savoir si l'on peut s'attendre à un effet de diversité dans des conditions d'affaiblissement dû à la pluie important. Il ressort de cette Figure que l'on peut s'attendre à un gain de diversité non seulement quand l'affaiblissement dû à la pluie est peu élevé, mais aussi lorsqu'il est important.



3 Résumé des effets de la diversité d'acheminement en cas de fortes précipitations obtenus lors d'expériences en grandeur réelle

Les résultats expérimentaux exposés ci-dessus permettent de dégager les conclusions suivantes:

- Les résultats expérimentaux ont montré que l'on obtenait une diversité d'acheminement en cas de fortes précipitations, même avec un système MP-MP doté d'un réseau maillé de petite dimension avec trois liaisons, y compris des liaisons d'environ 1 km de longueur.
- Le gain de diversité a été obtenu en particulier pendant la période où l'affaiblissement dû à la pluie était important.
- Il ressort des mesures expérimentales effectuées en grandeur réelle:
 - que l'on a obtenu un gain de diversité maximal de 8 dB;
 - que l'on a obtenu un gain de diversité d'au moins 3 dB pendant 2,4% du temps au cours de la période de mesure.