

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.1407-4**  
**(10/2009)**

**Propagation par trajets multiples et  
paramétrage de ses caractéristiques**

**Série P**  
**Propagation des ondes radioélectriques**



Union  
internationale des  
télécommunications

## Avant-propos

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

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

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

### Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique  
Genève, 2010

© UIT 2010

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

## RECOMMANDATION UIT-R P.1407-4

**Propagation par trajets multiples et paramétrage  
de ses caractéristiques**

(Question UIT-R 203/3)

(1999-2003-2005-2007-2009)

**Champ d'application**

La Recommandation UIT-R P.1407 décrit la nature de la propagation par trajets multiples, définit les paramètres appropriés pour la description statistique des effets de la propagation par trajets multiples et donne des exemples décrivant les effets de corrélation entre les trajets multiples de propagation et leur calcul.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) qu'il est nécessaire d'évaluer les effets de la propagation par trajets multiples sur les services utilisant des systèmes numériques;
- b) qu'il est souhaitable de normaliser la terminologie et les expressions servant à caractériser la propagation par trajets multiples,

*recommande*

- 1 d'utiliser les termes et définitions figurant dans l'Annexe 1 pour décrire de façon cohérente les notions liées à la propagation par trajets multiples;
- 2 d'utiliser les concepts de corrélation de l'Annexe 2 pour analyser les effets des systèmes à entrées multiples et à sorties multiples (MIMO).

**Annexe 1****1 Introduction**

Dans les systèmes radioélectriques avec de faibles hauteurs d'antenne, il y a souvent plusieurs trajets indirects entre l'émetteur et le récepteur dus aux réflexions sur les objets environnants, auxquels s'ajoute le trajet direct en cas de visibilité directe. Cette propagation par trajets multiples est particulièrement significative en milieu urbain, où les murs des bâtiments et les surfaces pavées des routes sont à l'origine d'importantes réflexions. Le signal reçu est donc la résultante de plusieurs composantes caractérisées par des amplitudes, des angles de phase et des directions d'incidence différentes.

On peut considérer que la variabilité spatiale de l'intensité du signal qui en résulte a deux modes:

- a) évanouissement rapide qui varie sur des distances de l'ordre d'une longueur d'onde, essentiellement en raison des variations des angles de phase des différentes composantes du signal;
- b) évanouissement lent qui varie sur des distances importantes, essentiellement en raison des variations de l'effet d'écran des objets environnants.

Par ailleurs, les différentes composantes du signal peuvent être sujettes à un effet Doppler plus ou moins marqué selon le mouvement du mobile ou des objets réfléchissants, véhicules par exemple.

Le canal multitrajet associé au mobile peut se caractériser par sa réponse impulsionnelle qui varie en fonction de la vitesse du mobile et/ou des diffuseurs. Un récepteur doit donc tenir compte de la distorsion du signal provoquée par des échos dans le canal et des variations rapides de la nature de cette distorsion. Ces caractéristiques du canal radioélectrique associé au mobile sont décrites par les profils de puissance en fonction du retard et les spectres Doppler obtenus à partir de sondages à large bande du canal.

L'amplitude des signaux à destination ou en provenance de véhicules circulant dans des zones urbaines ou boisées varie considérablement en raison de la diffusion par trajets multiples. Des évanouissements de 30 dB ou plus au-dessous du niveau moyen sont courants. Le champ instantané mesuré sur des distances de quelques dizaines de longueurs d'onde correspond à peu près à la distribution de Rayleigh. Les valeurs moyennes de ces distributions sur un secteur peu étendu varient considérablement d'une zone à l'autre, en fonction de la hauteur, de la densité et de la répartition des collines, des arbres, des bâtiments et autres structures.

La connaissance des caractéristiques de propagation par trajets multiples dans les liaisons du service mobile est un élément majeur pour maîtriser la qualité de transmission de signaux numériques. Physiquement, les caractéristiques de la propagation par trajets multiples comprennent le nombre de trajets, les amplitudes, les différences de longueur de trajet (retards) et les angles d'incidence. Ces caractéristiques peuvent être définies à partir du profil de puissance en fonction du retard. A défaut, la transformation de Fourier de la réponse impulsionnelle complexe donne la fonction de transfert complexe dont les caractéristiques d'amplitude en fonction de la fréquence indiquent la sélectivité en fréquence des trajets multiples et est liée à la largeur de bande de corrélation.

Les § 2 et 3 donnent les définitions des paramètres de canal pour un secteur peu étendu (à petite échelle). On utilise ensuite des données statistiques associées à ces paramètres à petite échelle pour générer des fonctions de distribution cumulative (CDF). Une CDF à moyenne échelle couvre un certain tronçon de mesures, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de longueur. On considère que l'association des données issues de plusieurs tronçons à moyenne échelle constitue une caractérisation à grande échelle ou globale qui est représentative de l'environnement considéré (terrain accidenté, zone urbaine, zone suburbaine, grandes pièces intérieures, couloirs, etc.).

Un canal linéaire variable dans le temps peut être caractérisé par un filtre transverse linéaire. Le signal de sortie du filtre est la somme de répliques du signal d'entrée retardées, affaiblies et affectées de l'effet Doppler. Le canal est alors représenté par une fonction d'étalement Doppler du temps de propagation, parfois appelée fonction de diffusion. Cette fonction représente le phénomène de propagation par trajets multiples dans les trois dimensions: temps de propagation excédentaire, fréquence Doppler et densité de puissance. Cette formulation convient particulièrement pour la réalisation d'un simulateur sous forme d'un filtre transverse dynamique.

## **2 Paramètres relatifs aux profils de retard**

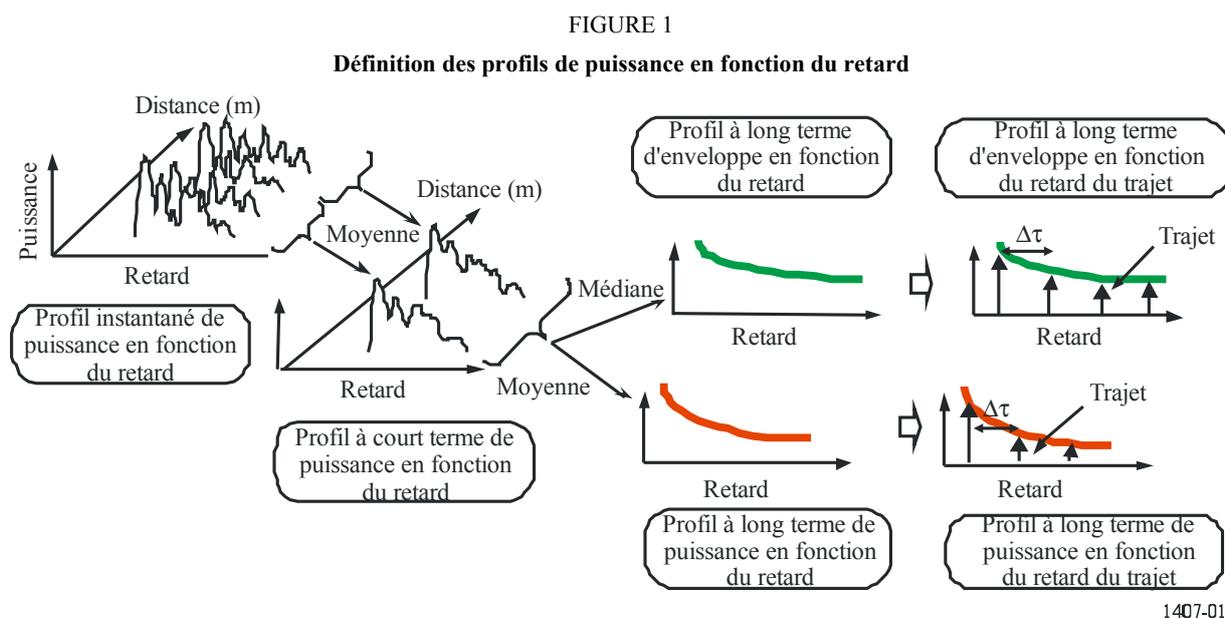
### **2.1 Définition des profils de puissance en fonction du retard**

Les paramètres appropriés pour la description statistique des retards de propagation par trajets multiples peuvent être calculés à partir de l'un quelconque des trois types de profils de puissance en fonction du retard suivants: profil instantané, profil à court terme ou profil à long terme, qui correspondent soit à des moyennes temporelles qui sont obtenues lorsque le récepteur est immobile et qui représentent des variations dans l'environnement, soit à des moyennes spatiales obtenues lorsque le récepteur est en mouvement.

La définition des profils de puissance en fonction du retard est telle qu'indiquée sur la Fig. 1.

Le profil instantané de puissance en fonction du retard correspond à la densité de puissance de la réponse impulsionnelle à un moment donné et en un point donné.

Le profil à court terme de puissance en fonction du retard est obtenu en faisant la moyenne spatiale des profils instantanés de puissance en fonction du retard sur plusieurs dizaines de longueurs d'onde comprises dans l'intervalle dans lequel les mêmes composantes de propagation par trajets multiples sont maintenues afin de supprimer les variations dues aux évanouissements rapides.



Le profil à long terme de puissance en fonction du retard est obtenu en faisant la moyenne spatiale des profils à court terme de puissance en fonction du retard à environ la même distance de la station de base (BS) afin de supprimer les variations dues à l'effet d'écran.

Les profils à long terme de puissance en fonction du retard avec un temps de propagation excédentaire discret normalisé par la résolution temporelle  $1/B$ , où  $B$  est la largeur de bande, sont définis comme étant des profils à long terme de puissance en fonction du retard du trajet, et non comme étant des profils continus de puissance en fonction du retard.

Par ailleurs, le profil à long terme d'enveloppe en fonction du retard correspond à la valeur médiane des profils à court terme de puissance en fonction du retard à environ la même distance de la station de base; il représente la forme du profil de retard dans la zone considérée.

## 2.2 Définition des paramètres statistiques

On trouvera ci-après les paramètres appropriés pour la description statistique des retards de propagation par trajets multiples.

Le *retard moyen* est la moyenne pondérée en fonction de la puissance des temps de propagation excédentaires mesurés et il est donné par le moment d'ordre un du profil de puissance en fonction du retard (le carré de l'amplitude de la réponse impulsionnelle).

La *valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards* est l'écart type pondéré en fonction de la puissance des temps de propagation excédentaires et elle est donnée par le moment d'ordre deux du profil de puissance en fonction du retard. Elle fournit une mesure de la variabilité du retard moyen.

La *fenêtre des retards* est la longueur de la portion médiane du profil de puissance en fonction du retard qui contient un certain pourcentage (généralement 90%) de l'énergie totale présente dans la réponse impulsionnelle.

L'*intervalle des retards* est défini comme la durée de la réponse impulsionnelle entre les deux valeurs de temps de propagation excédentaire qui correspondent à la première fois où l'amplitude de la réponse impulsionnelle dépasse un seuil donné, et à la dernière fois où elle devient inférieure à ce seuil. Le seuil utilisé dépend de la gamme dynamique de l'équipement de mesure: la valeur type est de 20 dB au-dessous du niveau crête du profil de retard.

La *largeur de bande de corrélation* est définie comme la bande de fréquences pour laquelle la fonction d'autocorrélation de la fonction de transfert est au-dessus d'un seuil donné; une valeur type de ce seuil est de 0,5.

Le *nombre de composantes de la propagation par trajets multiples ou de composantes du signal* correspond au nombre de crêtes dans un profil de puissance en fonction du retard, dont l'amplitude se situe à moins de A dB de la crête maximale et au-dessus du seuil de bruit.

### 2.2.1 Energie totale

L'énergie totale,  $P_m$ , de la réponse impulsionnelle est donnée par:

$$P_m = \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt \quad (1)$$

où:

- $P(t)$ : densité de puissance de la réponse impulsionnelle
- $t$ : retard par rapport à une référence de temps
- $t_0$ : instant où  $P(t)$  dépasse le seuil de coupure pour la première fois
- $t_3$ : instant où  $P(t)$  dépasse le seuil de coupure pour la dernière fois.

### 2.2.2 Retard moyen

Le retard moyen,  $T_D$ , est donné par le moment d'ordre un du profil de puissance en fonction du retard:

$$T_D = \frac{\int_0^{\tau_e} \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau} - \tau_a \quad (2a)$$

où:

- $\tau$ : variable de temps de propagation excédentaire, égale à  $t - t_0$
- $\tau_a$ : instant d'arrivée de la première composante multitrajet reçue (première crête du profil)
- $\tau_e = t_3 - t_0$ .

Sous sa forme discrète avec la résolution temporelle  $\Delta\tau$  ( $= 1/B$ ), l'équation (2a) devient:

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)} - \tau_M \quad (2b)$$

$$\tau_i = (i - 1) \Delta\tau = (i - 1)/B \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

où  $i = 1$  et  $N$  sont les indices des premier et dernier échantillons du profil de retard au-dessus du niveau de seuil,  $M$  étant l'indice de la première composante multitrajet reçue (première crête du profil).

Les retards peuvent être déterminés à partir de la relation suivante:

$$t_i (\mu s) = 3,3 r_i \quad \text{km} \quad (3)$$

où  $r_i$  est la somme des distances qui séparent d'une part l'émetteur du réflecteur multitrajet et d'autre part le réflecteur du récepteur, ou encore la distance totale qui sépare l'émetteur du récepteur pour  $t_{LOS}$ .

### 2.2.3 Valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards

La valeur quadratique moyenne de l'étalement des retards  $S$  est définie par la racine carrée du moment central d'ordre deux:

$$S = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_e} (\tau - T_D - \tau_a)^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau}} \quad (4a)$$

Sous sa forme discrète avec la résolution temporelle  $\Delta\tau$ , l'équation (4a) devient:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - T_D - \tau_M)^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)}} \quad (4b)$$

### 2.2.4 Fenêtres des retards

La fenêtre des retards,  $W_q$ , est la durée de la portion médiane du profil de puissance en fonction du retard qui contient un certain pourcentage  $q$  de la puissance totale:

$$W_q = (t_2 - t_1) \quad (5)$$

où les instants  $t_1$  et  $t_2$  sont définis par:

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \frac{q}{100} \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt = \frac{q}{100} P_m \quad (6)$$

et l'énergie à l'extérieur de la fenêtre est divisée en deux parts égales  $\left(\frac{100 - q}{200}\right)P_m$ .

### 2.2.5 Intervalle des retards

L'intervalle des retards,  $I_{th}$ , est défini comme l'intervalle de temps entre l'instant  $t_4$  où l'amplitude du profil de puissance en fonction du retard dépasse pour la première fois un seuil donné  $P_{th}$ , et l'instant  $t_5$  où cette amplitude tombe pour la dernière fois au-dessous de ce seuil:

$$I_{th} = (t_5 - t_4) \quad (7)$$

### 2.2.6 Largeur de bande de corrélation de fréquences

La transformation de Fourier de la densité de puissance de la réponse impulsionnelle donne l'autocorrélation  $C(f)$  de la fonction de transfert:

$$C(f) = \int_0^{\tau_e} P(\tau) \exp(-j 2 \pi f \tau) d \tau \quad (8)$$

Dans l'équation (8), la largeur de bande de corrélation est sous-estimée dans le cas d'un canal à distribution de Rice. Pour ces canaux, il est plus précis d'estimer la largeur de bande de corrélation à partir de la fonction de corrélation de fréquences décalées, qui est obtenue au moyen de la fonction de transfert complexe variant en fonction du temps, en calculant le coefficient de corrélation pour différents espacements de fréquence.

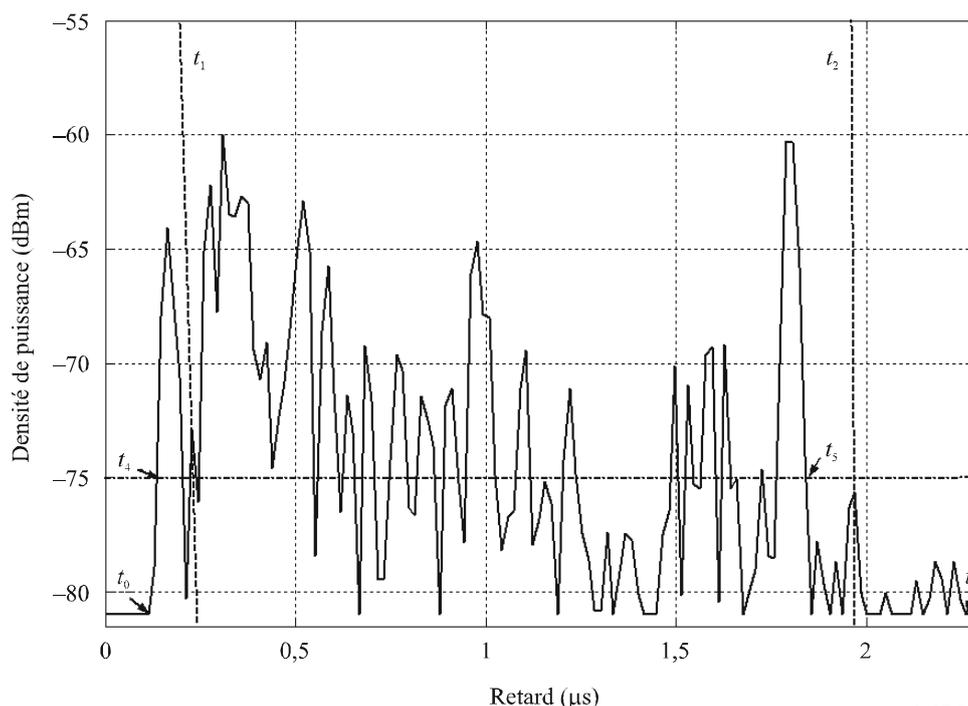
La largeur de bande de corrélation,  $B_x$ , est définie comme la fréquence pour laquelle  $|C(f)|$  est égal à  $x\%$  de  $C(f=0)$ .

### 2.2.7 Valeurs de paramètres recommandées

Lors de l'analyse des données, il est recommandé d'utiliser des fenêtres des retards pour 50%, 75% et 90% de la puissance, des intervalles des retards pour des seuils de 9 dB, 12 dB et 15 dB en dessous de la valeur crête et une largeur de bande de corrélation pour 50% et 90% de corrélation. Il faut noter que les effets du bruit et des signaux parasites dans le système (de la partie radioélectrique au système de traitement de données) peuvent être tout à fait significatifs. Il est donc important de déterminer avec précision le seuil de bruit et/ou des signaux parasites des systèmes et de conserver une marge de sécurité au-dessus de celui-ci. Une marge de sécurité de 3 dB est recommandée et, dans le but de garantir l'exactitude des résultats, il est recommandé d'utiliser un rapport minimum crête/parasite de 15 dB, par exemple (non compris les 3 dB de marge de sécurité) comme critère d'acceptation avant qu'une réponse impulsionnelle ne soit incluse dans les statistiques.

La Fig. 2 illustre un exemple d'utilisation de quelques-uns des termes définis ci-dessus.

FIGURE 2



1407-02

Profil de puissance en fonction du retard illustrant les paramètres suivants: la fenêtre des retards,  $W_{90}$ , contenant 90% de la puissance reçue est représentée entre les deux lignes verticales tiretées ( $t_1$  et  $t_2$ ), l'intervalle des retards,  $I_{15}$ , contenant le signal au-dessus du niveau à 15 dB sous la crête, se situe entre  $t_4$  et  $t_5$ ,  $t_0$  et  $t_3$  indiquant le début et la fin du profil au-dessus du seuil de bruit.

### 3 Paramètres relatifs à la direction d'incidence

#### 3.1 Définition des profils de puissance en fonction de l'angle d'incidence

Les paramètres appropriés pour la description statistique de l'angle d'incidence des trajets multiples peuvent être calculés à partir de l'un quelconque des trois types de profils de puissance en fonction de l'angle d'incidence suivants: profil instantané, profil à court terme ou profil à long terme, qui correspondent soit à des moyennes temporelles qui sont obtenues lorsque le récepteur est immobile et qui représentent des variations dans l'environnement, soit à des moyennes spatiales obtenues lorsque le récepteur est en mouvement.

La définition des profils de puissance en fonction de l'angle d'incidence est telle qu'indiquée sur la Fig. 4.

Le profil instantané de puissance en fonction de l'angle d'incidence correspond à la densité de puissance de la réponse impulsionnelle à un moment donné et en un point donné.

Le profil à court terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence est obtenu en faisant la moyenne spatiale des profils instantanés de puissance en fonction de l'angle d'incidence sur plusieurs dizaines de longueurs d'onde comprises dans l'intervalle dans lequel les mêmes composantes de propagation par trajets multiples sont maintenues afin de supprimer les variations dues aux évanouissements rapides.

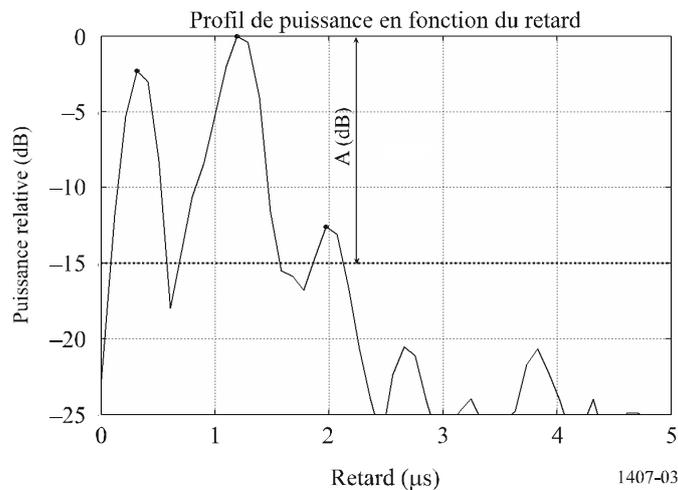
Le profil à long terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence est obtenu en faisant la moyenne spatiale des profils à court terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence à environ la même distance de la station de base (BS) afin de supprimer les variations dues à l'effet d'écran.

Les profils à long terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence avec un angle discret normalisé par la résolution angulaire de l'antenne sont définis comme étant des profils à long terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence du trajet, et non comme étant des profils continus de puissance en fonction de l'angle d'incidence.

Par ailleurs, le profil à long terme de l'enveloppe en fonction de l'angle d'incidence correspond à la valeur médiane des profils à court terme de puissance en fonction de l'angle d'incidence à environ la même distance de la station de base; il représente la forme du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence dans la zone considérée.

FIGURE 3

**Profil de puissance en fonction du retard, indiquant les composantes de la propagation par trajets multiples situées au-dessus du niveau de seuil**



### 3.2 Définition des paramètres statistiques

On trouvera ci-après les définitions des paramètres appropriés pour la description statistique de l'angle d'incidence des trajets multiples:

L'*angle d'incidence moyen* est la moyenne pondérée en fonction de la puissance des directions d'incidence mesurées et il est donné par le moment d'ordre un du spectre de puissance en fonction de l'azimut (on l'appelle également profil de puissance en fonction de l'angle).

Le *profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence* est défini comme la caractéristique de puissance en fonction de l'angle dans le plan de l'azimut/horizontal.

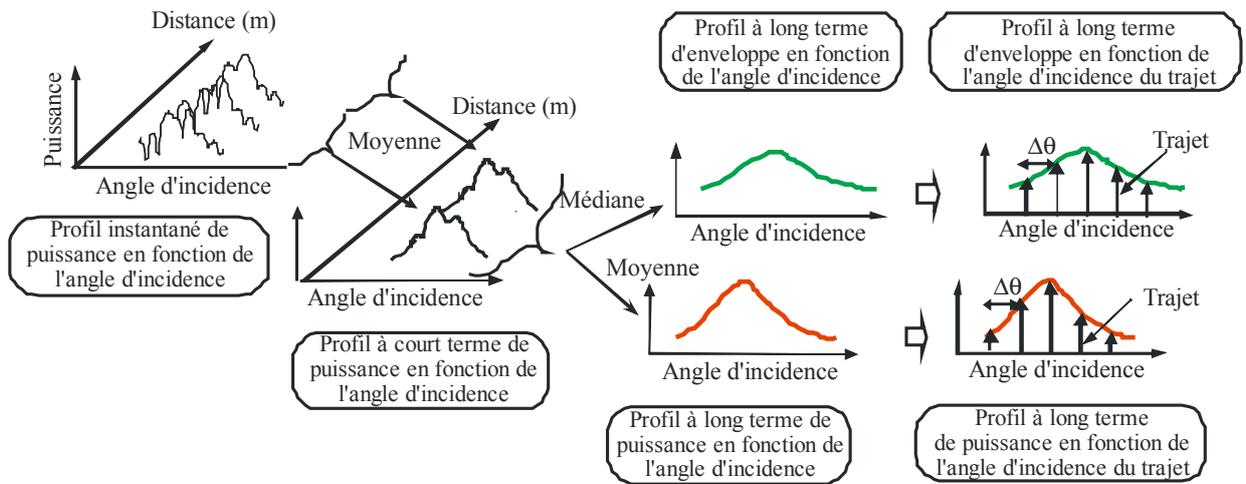
La *valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire* est l'écart type pondéré en fonction de la puissance de la direction d'incidence et elle est donnée par le moment d'ordre deux du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence. Elle permet de mesurer la variabilité de l'angle d'incidence moyen.

La *fenêtre angulaire* est la largeur de la portion médiane du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence qui contient un certain pourcentage défini de l'énergie totale présente dans le profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence.

L'*intervalle angulaire* (ou *espacement angulaire*) est défini comme la largeur de la réponse impulsionnelle (ou largeur de profil d'angle) entre les deux valeurs de direction d'incidence qui correspondent au premier angle auquel l'amplitude du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence dépasse un seuil donné et au dernier angle auquel elle devient inférieure à ce seuil. Le seuil utilisé dépend de la gamme dynamique de l'équipement de mesure: la valeur type est de 20 dB au-dessous du niveau crête du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence.

FIGURE 4

Définition des profils de puissance en fonction de l'angle d'incidence



1407-04

### 3.2.1 Energie totale

Supposons que  $P(\theta)$  soit la puissance reçue dans la direction  $\theta$ .

L'énergie totale,  $P_0$ , du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence est définie comme la puissance supérieure au niveau de seuil  $L_0$  qui sépare le signal du bruit, tel que le montre la Fig. 5:

$$P_0 = \int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta \quad (9a)$$

où:

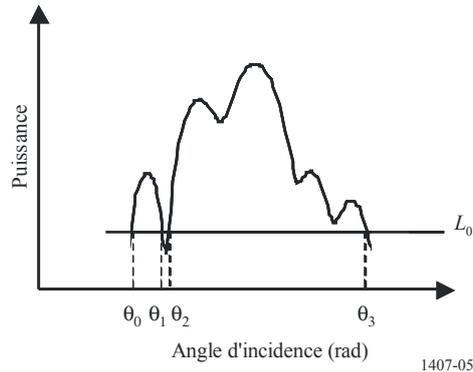
- $\theta$ : angle (rad) mesuré par rapport à la direction du signal principal (qui est censée être constante pendant la durée de la mesure)
- $P(\theta)$ : profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence au-dessus du niveau de seuil  $L_0$ ; au-dessous de  $L_0$ ,  $P(\theta) = 0$
- $L_0$ : niveau au-dessus du seuil de bruit, avec une certaine marge (3 dB recommandés)
- $\theta_0$ : angle d'incidence pour lequel  $P(\theta)$  dépasse le niveau de seuil  $L_0$  pour la première fois dans  $\theta_{max}(-\pi, \pi)$
- $\theta_3$ : angle d'incidence pour lequel  $P(\theta)$  dépasse le niveau de seuil  $L_0$  pour la dernière fois dans  $\theta_{max}(-\pi, \pi)$ .

Sous sa forme discrète, l'équation (9a) devient:

$$P_0 = \sum_{i=1}^N P(\theta_i) \quad (9b)$$

où  $i = 1$  et  $N$  sont, respectivement, les indices des premier et dernier échantillons du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence au-dessus du niveau de seuil.

FIGURE 5  
Energie totale



### 3.2.2 Angle d'incidence moyen

L'angle d'incidence moyen,  $T_A$ , est donné par le moment d'ordre un du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence:

$$T_A = \frac{1}{P_0} \int_{\theta_0}^{\theta_3} \theta P(\theta) d\theta \quad (10a)$$

Sous sa forme discrète avec la résolution angulaire  $\Delta\theta$ , l'équation (10a) devient:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^N P(\theta_i)} \quad (10b)$$

$$(\theta_i = (i - 1) \Delta\theta (i = 1, 2, \dots, N))$$

où  $i = 1$  et  $N$  sont, respectivement, les indices des premier et dernier échantillons du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence au-dessus du niveau de seuil.

### 3.2.3 Valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire

La valeur quadratique moyenne de l'étalement angulaire  $S_A$  de la direction d'incidence est définie comme suit:

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{P_0} \int_{\theta_0}^{\theta_3} (\theta - T_A)^2 P(\theta) d\theta} \quad (11a)$$

Sous sa forme discrète avec la résolution angulaire  $\Delta\theta$ , l'équation (11a) devient:

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i - T_A)^2 P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^N P(\theta_i)}} \quad (11b)$$

où  $i = 1$  et  $N$  sont, respectivement, les indices des premier et dernier échantillons du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence au-dessus du niveau de seuil.

### 3.2.4 Fenêtre angulaire

La fenêtre angulaire,  $\theta_w$ , est la largeur de la portion médiane du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence qui contient un pourcentage  $q$  de la puissance totale, comme le montre la Fig. 6:

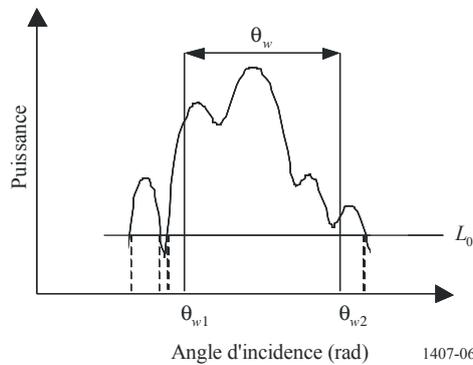
$$\theta_w = \theta_{w2} - \theta_{w1} \tag{12}$$

où les angles  $\theta_{w1}$  et  $\theta_{w2}$  sont définis par:

$$\int_{\theta_{w1}}^{\theta_{w2}} P(\theta) d\theta = \frac{q}{100} \int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta = \frac{q}{100} P_0 \tag{13}$$

et l'énergie à l'extérieur de la fenêtre est divisée en deux parts égales  $\left(\frac{100-q}{200}\right)P_0$

FIGURE 6  
Fenêtre angulaire

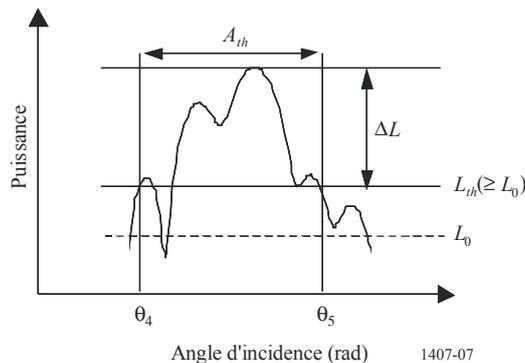


### 3.2.5 Intervalle angulaire (espacement angulaire)

L'intervalle angulaire,  $A_{th}$ , est défini comme la différence entre l'angle  $\theta_4$  pour lequel l'amplitude du profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence dépasse pour la première fois un seuil  $L_{th}$  donné et l'angle  $\theta_5$  pour lequel cette amplitude tombe pour la dernière fois au-dessous de ce seuil, tel que le montre la Fig. 7:

$$A_{th} = \theta_5 - \theta_4 \tag{14}$$

FIGURE 7  
Intervalle angulaire



### 3.2.6 Distance de corrélation spatiale

En particulier pour les canaux à entrées multiples et à sorties multiples (MIMO), le coefficient de corrélation spatiale en fonction de l'espacement  $d$  est obtenu à partir de la fonction de transfert complexe du profil de puissance en fonction de l'angle. Le coefficient de corrélation spatiale  $R(d)$  est défini comme suit:

$$R(d) = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) \exp(-j2\pi d \sin \theta / \lambda) d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta} \quad (15)$$

où:

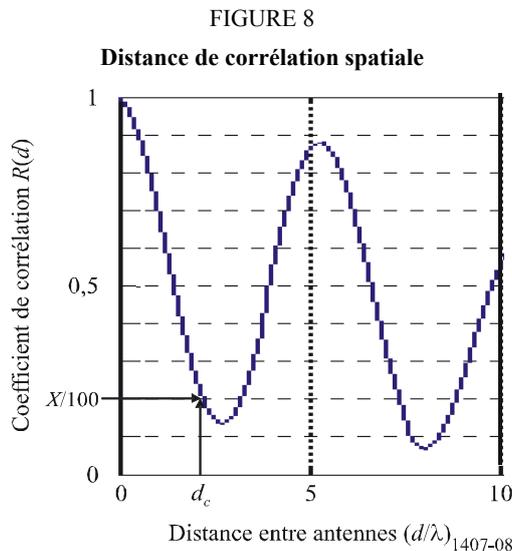


espacement

$\lambda$ : longueur d'onde.

Comme le montre la Fig. 8, la distance de corrélation spatiale  $d_c$  est définie comme la première distance de coupure pour laquelle  $|R(d)|$  est égale à  $x\%$  de  $|R(d=0)|$ :

$$|R(d_c)| / |R(0)| = x/100 \quad (16)$$



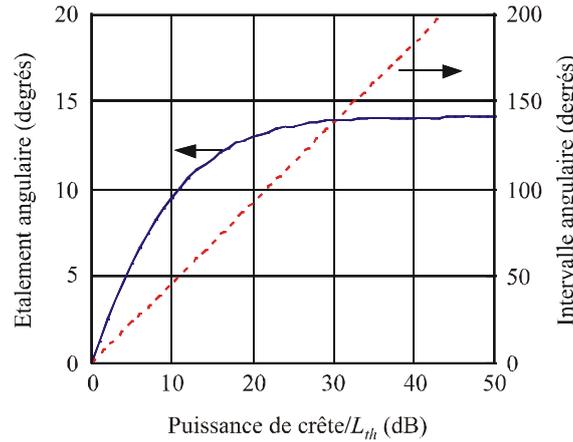
### 3.2.7 Paramètres recommandés

Pour pouvoir analyser les données en détail, il est recommandé d'utiliser des fenêtres angulaires pour 50%, 75% et 90% de la puissance, des intervalles angulaires pour des seuils de 9, 12 et 15 dB en dessous de la valeur crête et des distances de corrélation pour 50% et 90% de corrélation. Par ailleurs, il faut noter que les effets du bruit et des signaux parasites dans le système (de l'étage RF à l'étage de traitement des données) peuvent être tout à fait significatifs. Il est donc important de déterminer avec précision le seuil de bruit et/ou des signaux parasites des systèmes et de conserver une marge de sécurité au-dessus de celui-ci. Une marge de sécurité de 3 dB est recommandée et, dans le but de garantir l'exactitude des résultats, il est recommandé d'utiliser un rapport minimum crête/parasite de 15 dB, par exemple (non compris les 3 dB de marge de sécurité) comme critère d'acceptation pour limiter les profils de puissance en fonction de l'angle d'incidence inclus dans les

statistiques. La Fig. 9 présente un exemple de l'effet provoqué par le réglage de la valeur du rapport crête/ $L_{th}$  minimal ( $\Delta L$ ). Dans cette figure, on suppose que le profil de puissance en fonction de l'angle d'incidence obéit à une distribution de Laplace (distribution exponentielle double) avec un étalement angulaire de  $14^\circ$ ; l'étalement angulaire et l'intervalle angulaire sont calculés en fonction du rapport puissance de crête/ $L_{th}$ . Cette figure montre que ces paramètres subissent des modifications significatives même lorsque les valeurs sont fondamentalement les mêmes. Par conséquent, la valeur du rapport  $\Delta L$  utilisée pour l'évaluation statistique devrait être spécifiée.

FIGURE 9

Exemple de l'effet correspondant au rapport crête/ $L_{th}$  minimal ( $\Delta L$ )



Distribution de Laplace (Ecart type de  $14^\circ$ )  
1407-09

## Annexe 2

### 1 Introduction

La présente Annexe illustre certains résultats du calcul des coefficients de corrélation à partir d'un profil de puissance en fonction de l'angle et l'effet des coefficients de corrélation sur la capacité d'un canal MIMO.

### 2 Calcul des coefficients de corrélation spatiale

La définition donnée dans l'équation (15) de l'Annexe 1 a été utilisée pour calculer la corrélation spatiale. La présente Annexe expose brièvement un résultat et illustre la manière dont la corrélation est affectée par l'espacement des antennes.

La Fig. 10 montre un spectre de puissance en fonction de l'azimut (PAS) laplacien tronqué idéal tel que:

$$PAS_L(\varphi) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{Q_{L,k}}{\sigma_{L,k} \sqrt{2}} \exp \left[ -\frac{\sqrt{2} |\varphi - \varphi_{0,k}|}{\sigma_{L,k}} \right] \left\{ \varepsilon[\varphi - (\varphi_{0,k} - \Delta\varphi_k)] - \varepsilon[\varphi - (\varphi_{0,k} + \Delta\varphi_k)] \right\} \quad (17)$$

où  $\varepsilon(\varphi)$  est à la fonction échelon et  $N_c$  le nombre de groupes;  $\varphi_{0,k}$  est l'angle d'incidence moyen du  $k^{\text{ième}}$  groupe et  $\sigma_{L,k}$  est l'étalement angulaire. Le spectre PAS est défini dans l'intervalle  $[\varphi_0 - \Delta\varphi, \varphi_0 + \Delta\varphi]$ . On suppose que la condition de normalisation de la puissance est:

$$\sum_{k=1}^{N_c} Q_{L,k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\varphi_k}{\sigma_{L,k}}\right) \right] = 1 \quad (18)$$

Le coefficient de corrélation d'enveloppe est alors donné par:

$$\rho_e(D) = |R_{XX}(D) + jR_{XY}(D)|^2 \quad (19)$$

où:

$$D = 2\pi d/\lambda$$

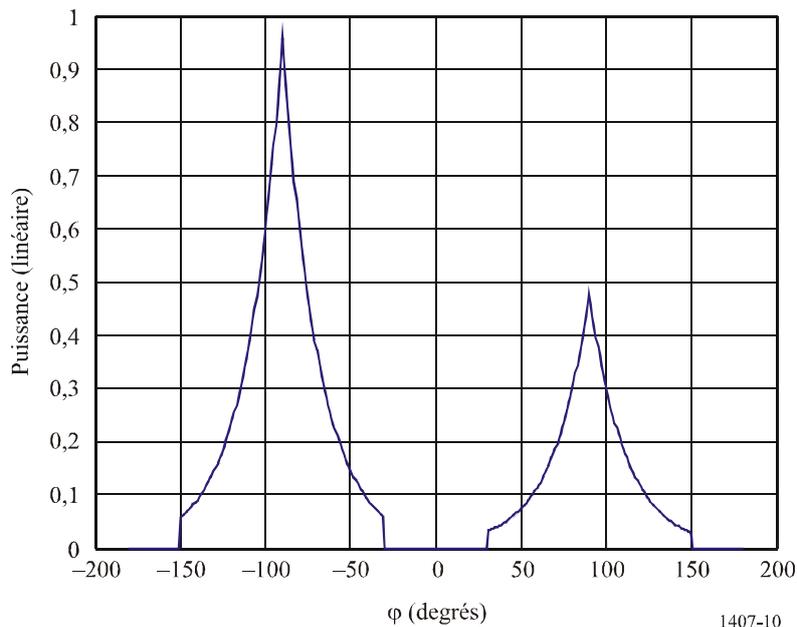
$d$ : espacement des antennes

$\lambda$ : longueur d'onde,

et les fonctions de corrélations croisées  $R_{XX}(D)$  et  $R_{XY}(D)$  sont définies dans l'équation (16).

FIGURE 10

Spectre de puissance en fonction de l'azimut (PAS) laplacien tronqué idéal

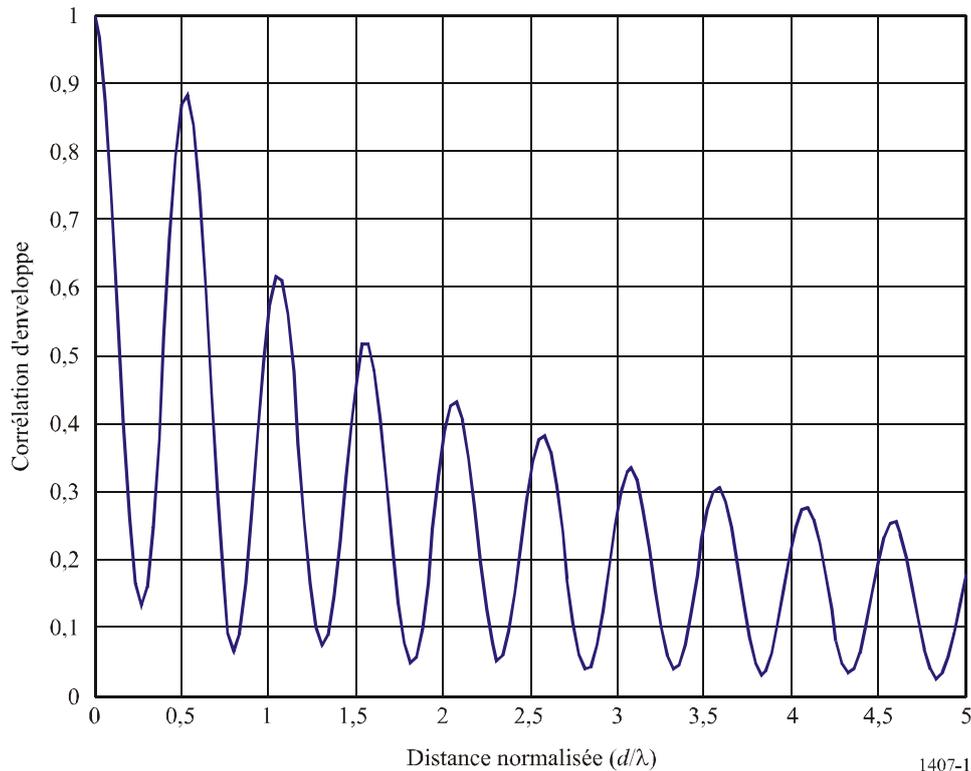


Spectre PAS laplacien normalisé dans le cas de deux groupes.  $AS=30^\circ$ ,  $\varphi_0 \in [-90^\circ, +90^\circ]$ . De plus, le groupe situé à  $+90^\circ$  a deux fois moins de puissance que le groupe situé à  $-90^\circ$ .

La Fig. 11 illustre la corrélation spatiale obtenue.

FIGURE 11

Corrélation spatiale obtenue



1407-11

Coefficient de corrélation d'enveloppe en fonction de la distance normalisée =  $d/\lambda$  dans le cas de deux groupes (voir la Fig. 10).

### 3 Effet des coefficients de corrélation sur la capacité d'un canal MIMO

Pour des canaux avec évanouissement de Rayleigh, la capacité ergodique d'un canal MIMO est la suivante en l'absence de connaissance du canal au niveau de l'émetteur:

$$C = \log_2 \det \left( I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} R_R^{1/2} H_w R_T H_w^H (R_R^{1/2})^H \right) = \log_2 \det \left( I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} H_w R_T H_w^H R_R^H \right) \quad (20)$$

où:

$n_R$  et  $n_T$ : respectivement nombre d'antennes de réception et d'émission

$P$ : puissance totale d'émission

$I_{n_R}$ : matrice unité  $n_R \times n_R$

$(\cdot)^H$  et  $\det(\cdot)$ : respectivement opérateurs hermitien et déterminant

$H_w$ : matrice dont les éléments sont des variables aléatoires indépendantes obéissant à la même distribution complexe de Gauss avec une moyenne nulle et une variance égale à 1

$(\cdot)^{1/2}$ : racine carrée hermitienne d'une matrice.

Les matrices  $R_R$  et  $R_T$  déterminent les corrélations spatiales entre les récepteurs et les émetteurs, respectivement, où la matrice des canaux  $H$  est définie par  $H = R_R^{1/2} H_w R_T^{1/2}$ ,  $R_R^{1/2}$ , et  $R_T^{1/2}$  sont des matrices hermitiennes définies positives et on suppose enfin qu'elles sont normalisées de sorte que  $[R_R]_{j,j}$  pour  $j = 1, K, n_R$  et  $[R_T]_{i,i}$  pour  $i = 1, K, n_T$ .

En supposant que  $R_R$  et  $R_T$  ont le rang le plus élevé et que  $n_R = n_T = n$ , alors, avec un rapport signal/bruit ( $S/N$ ) élevé, la capacité peut être calculée approximativement avec la formule suivante:

$$C \approx \log_2 \det \left( \frac{P}{n_T \sigma^2} H_w H_w^H \right) + \log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T) \quad (21)$$

Si on désigne les valeurs propres de  $R_R$  par  $\lambda_i$ ,  $i = 1, K, n$ , alors  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = n$ . A partir de l'inégalité moyenne arithmétique-moyenne géométrique:

$$\prod_{i=1}^n \lambda_i \leq 1 \quad (22)$$

Etant donné que  $\det(R_R) = \prod_{i=1}^n \lambda_i$ , alors  $\log_2 \det(R_R) \leq 0$  et n'est égal à zéro que lorsque toutes les

valeurs propres de  $R_R$  sont égales, c'est-à-dire  $R_R = I_n$ . Par conséquent, la corrélation détermine la capacité du canal MIMO et la perte de capacité ergodique, lorsque le rapport  $S/N$  est élevé, est donnée par  $(\log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T))$  bit/s/Hz.

La Fig. 12 illustre l'effet des corrélations spatiales sur la capacité ergodique d'un canal MIMO lorsque  $n_R = n_T = 2$ . Dans la Fig. 12, on suppose que  $R_T = I_2$ . La matrice de corrélation du récepteur est choisie en fonction de:

$$R_R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_R \\ \rho_R^* & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

où  $\rho_R$  désigne la corrélation spatiale entre les antennes réceptrices.

FIGURE 12

Capacité ergodique avec une corrélation de réception faible et élevée

