

Évaluation théorique de performance d'un système à antennes distribuées sur canaux multi-trajets partiellement bloqués

Thibaut ROLLAND^{1,2} Matthieu CRUSSIÈRE¹ Marie LE BOT²

¹Orange Innovation, 4 rue du Clos Courtel, 35510 Cesson-Cévigné, France

²INSA Rennes, CNRS, IETR –UMR 6164, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, 35043 Rennes Cedex, France

Résumé – Cet article s'intéresse à l'établissement théorique des expressions de probabilité d'erreur binaire (PEB) pour les systèmes à antennes distribuées sur canaux à évanouissement partiellement bloqués. Des modèles de lignes à retard par grappes de rayons ou *clusters* issus du 3GPP sont considérés, avec la possibilité de bloquer un sous-ensemble de ces *clusters*. En supposant que le récepteur ne puisse pas mettre à jour son égaliseur lors d'un blocage furtif, une analyse statistique est effectuée afin de fournir les fonctions de densité de probabilité des symboles égalisés avec biais selon l'évènement de blocage. Les expressions de PEB sont ensuite obtenues puis validées par simulation. Les résultats théoriques fournis permettent de prédire les performances des systèmes multi-antennes distribués et d'analyser précisément l'impact du blocage dans divers scénarios.

Abstract – This paper introduces the theoretical derivations for establishing the bit error rate (BER) expressions of distributed antenna systems (DAS) over partially blocked Rayleigh fading channels. Clustered delay line models from 3GPP are considered with a subset of blocked propagation components. Assuming the receiver cannot update its equalizer during sudden blockage events, a statistical analysis of the erroneously equalized channel gains is performed to provide the probability density functions of the received symbols depending on the blockage event. BER derivations are then obtained and validated through simulations. The provided expressions allow to predict the performance of DAS and accurately analyze the impact of various blockage scenarios.

1 Introduction

Les systèmes à antennes distribuées (DAS) – tels que le MIMO distribué et la transmission multipoint coordonnée – exploitent la technologie multi-antennes pour améliorer la couverture des réseaux en assurant une transmission coordonnée via des points d'accès (AP) répartis sur une zone donnée, garantissant ainsi une meilleure desserte des équipements utilisateurs (UE). Par ailleurs, l'utilisation de fréquences en ondes millimétriques permet d'apporter une réponse aux nouveaux besoins de bande passante, mais pose de nouveaux défis : atténuation accrue du signal, puissance de sortie réduite et probabilité de blocage plus élevée [2, 4].

Dans ce contexte, cet article évalue les performances d'un système de type DAS soumis à un blocage soudain de certains rayons de propagation du canal. Ce blocage, non détecté et non estimé par le récepteur, conduit à une égalisation des symboles basée sur une estimation de canal biaisée [6] lorsque la durée de l'évènement est inférieure à l'intervalle de rafraîchissement du CSI-RS (Channel State Information - Reference Signal) du système. La formule théorique de probabilité d'erreur binaire (PEB) est ainsi calculée à partir de l'analyse de la densité de probabilité (PDF) du gain de canal égalisé erroné, en fonction du type de constellation, du nombre d'AP et du sous-ensemble de *clusters* bloqués.

2 Modèle du système et du canal

Le système DAS considéré est constitué d'un ensemble $\mathcal{S}$ de K_{AP} points d'émission, chacun transmettant de manière synchrone un signal commun à un unique UE. Cette configuration permet à l'UE de recevoir une superposition de signaux provenant de différents canaux, améliorant ainsi la robustesse de la réception et la fiabilité du signal. Afin de se focaliser sur les

performances intrinsèques des DAS, on suppose que chaque AP opère avec une seule antenne omnidirectionnelle¹.

La réponse impulsionnelle du canal en liaison descendante pour chaque AP k est donnée par un modèle de ligne à retard [1], où plusieurs rayons avec des phases aléatoires forment des *clusters* c ayant des retards similaires à l'arrivée. Chaque *cluster* est ainsi représenté par un délai $\tau_{c,k}$ et un gain complexe $a_{c,k}$. Ce gain est modélisé comme une variable aléatoire (VA) normale complexe de moyenne nulle et de variance $\sigma_{c,k}^2$, noté $a_{c,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{c,k}^2)$. Le gain du canal en bande étroite $H_k(f)$ pour l'AP k , évalué à la fréquence f s'écrit :

$$H_k(f) = \sum_{c \in \mathcal{C}_k} a_{c,k} e^{-j2\pi f \tau_{c,k}} \quad (1)$$

où $\mathcal{C}_k$ désigne l'ensemble des *clusters* du canal associé au k -ième AP. Deux sous-ensembles disjoints sont définis : $\mathcal{C}_k^{NB}$, correspondant aux *clusters* non bloqués, et $\mathcal{C}_k^B$, regroupant les *clusters* bloqués, tels que $\mathcal{C}_k = \mathcal{C}_k^{NB} \cup \mathcal{C}_k^B$. Lorsque certains *clusters* sont bloqués par des obstacles, l'expression de la réponse fréquentielle du canal donnée par (1) devient :

$$\bar{H}_k(f) = \sum_{c \in \mathcal{C}_k^{NB}} a_{c,k} e^{-j2\pi f \tau_{c,k}} \quad (2)$$

où la sommation est restreinte aux *clusters* non bloqués. Par ailleurs, afin d'alléger les notations, la dépendance en fréquence f sera ignorée dans la suite. En exploitant les propriétés des distributions gaussiennes complexes (sommation et transformée de Fourier), on modélise le gain complexe du canal et sa version bloquée respectivement par $H_k \sim \mathcal{CN}(m_{h_k}, \sigma_{h_k}^2)$ et $\bar{H}_k \sim \mathcal{CN}(m_{\bar{h}_k}, \sigma_{\bar{h}_k}^2)$. Dans la suite, on considère un scénario d'affaiblissement de type Rayleigh, c'est-à-dire que

¹Des capacités de formation de faisceaux avec plusieurs antennes pourraient être intégrées au modèle sans modifier la méthodologie proposée.

$m_{h_k} = 0$ et $m_{\bar{h}_k} = 0$ pour tout k , ce qui signifie qu'aucun trajet direct ne domine la propagation.

En notant $\mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}$ l'ensemble des AP non bloqués et $\mathcal{S}^{\mathcal{B}}$ l'ensemble des AP bloqués, avec $\mathcal{S} = \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}} \cup \mathcal{S}^{\mathcal{B}}$, le signal reçu en bande étroite pour un système DAS avec obstruction de différents *clusters* sur chaque lien s'exprime alors comme :

$$r = \left(\sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \sqrt{\mu_k} H_k + \sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{B}}} \sqrt{\mu_k} \bar{H}_k \right) x + n \quad (3)$$

où $x \in \mathcal{A}$ est le symbole transmis issu de la constellation $\mathcal{A}$, $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ représente un bruit blanc additif gaussien (BBAG), et les coefficients μ_k pondèrent les contributions des AP afin de refléter les différences de puissances reçues.

À partir de (3), l'estimation du symbole x est obtenue par une égalisation selon le critère du forçage à zéro (ZF), consistant à diviser le signal reçu par l'estimation du canal dans le domaine fréquentiel. En présence de blocage soudain, cette estimation est considérée inchangée. Ainsi, le facteur d'égalisation utilisé correspond à un état de canal différent mais cependant corrélé à celui réellement rencontré. Ainsi, l'égalisation devient biaisée, et le symbole estimé $\hat{x} = \hat{x}_I + j\hat{x}_Q$ est affecté par cette estimation erronée du canal :

$$\hat{x} = \frac{r}{\sum_{k \in \mathcal{S}} \sqrt{\mu_k} H_k} \quad (4)$$

Pour obtenir les expressions du PEB, il faut analyser la variable aléatoire $\hat{X} | x$, fonction de l'état du canal, du symbole x transmis et du bruit n . Dans toute cette section, cette variable est étudiée *conditionnellement au symbole transmis* x , ce qui implique que les statistiques des signaux reçus et égalisés dépendent explicitement de x . Elle s'exprime comme le rapport de deux variables complexes normales corrélées R et E :

$$\frac{\mathcal{CN}\left(0, \left(\sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{h_k}^2 + \sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{\bar{h}_k}^2 \right) P_x + \sigma_n^2\right)}{\mathcal{CN}\left(0, \sum_{k \in \mathcal{S}} \mu_k \sigma_{h_k}^2\right)} \quad (5)$$

où $P_x = |x|^2$ est l'énergie du symbole considéré. Ce conditionnement à x est implicite dans l'équation, mais restera valable pour toutes les distributions utilisées dans la suite. Les variances du canal du lien k peuvent être décomposées en variances individuelles pour chaque *cluster*, chacune étant obtenue par la somme des variances des rayons qui le composent :

$$\sigma_{h_k}^2 = \sum_{c \in \mathcal{C}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \sigma_{c,k}^2 + \sum_{c \in \mathcal{C}^{\mathcal{B}}} \sigma_{c,k}^2; \quad \sigma_{\bar{h}_k}^2 = \sum_{c \in \mathcal{C}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \sigma_{c,k}^2 \quad (6)$$

La méthode consiste à déterminer la distribution de $\hat{X} | x$, puis à intégrer sur la région d'erreur associée.

3 Caractérisation statistique du signal égalisé en présence de blocage

3.1 Distribution du rapport de VA corrélées

L'équation (5) correspond au rapport de deux VA gaussiennes complexes corrélées (GCC). La littérature [3, 5] fournit des informations précieuses sur les propriétés statistiques d'un tel rapport. Soit le vecteur aléatoire $[R, E]^T$ suivant une loi complexe gaussienne, dont le vecteur moyen et la matrice de covariance sont donnés par :

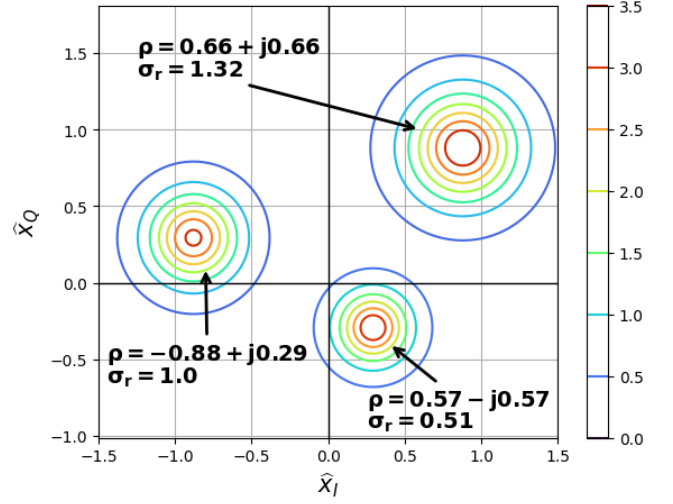


FIGURE 1 : Affichage de quelques PDF conjointes $f_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q)$ pour $m_r = m_e = 0$ et $\sigma_e = 1$.

$$\mathbf{m} = [m_r, m_e]^T \text{ et } \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & \rho \sigma_r \sigma_e \\ \rho^* \sigma_r \sigma_e & \sigma_e^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dans [5], l'expression de la PDF conjointe du rapport $\hat{X} | x = \frac{R}{E} = \hat{X}_I + j\hat{X}_Q$ est présentée. En posant $m_r = m_e = 0$, cette expression constitue la base de notre étude. Après quelques simplifications, la PDF conjointe $f_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q)$ s'exprime :

$$\frac{1 - |\rho|^2}{\pi \sigma_r^2 \sigma_e^2} \left(\left(\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right)^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2} + \left(\frac{\hat{x}_Q}{\sigma_r} - \frac{\rho_Q}{\sigma_e} \right)^2 \right)^{-2} \quad (8)$$

où ρ_I et ρ_Q sont les parties réelle et imaginaire de ρ , le coefficient de corrélation entre R et E . L'équation (8) est illustrée à la Fig. 1, où l'on observe l'effet du blocage par le décalage de la PDF le long des axes réel et imaginaire, en fonction des paramètres ρ , σ_r et σ_e . On note que par l'effet du blocage, la PDF est translatée mais conserve sa symétrie centrale par rapport au décalage (observé sur la figure, et évident compte tenu de l'expression (8) qui présente une symétrie dans la mise en jeu des composantes réelle et imaginaire).

Dans la suite, les PDF et les fonctions de distribution cumulatives (CDF) marginales sont calculées afin d'être utilisées pour le calcul de PEB. En vertu de la propriété de symétrie précédemment établie, les calculs sont réalisés uniquement pour la partie réelle, les résultats étant ensuite transposés à la partie imaginaire en remplaçant $\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e}$ par $\frac{\hat{x}_Q}{\sigma_r} - \frac{\rho_Q}{\sigma_e}$.

3.1.1 Fonction de densité de probabilité marginale

En posant $\alpha = \left(\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right)^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2}$ et en effectuant le changement de variable $u = \frac{\hat{x}_Q}{\sigma_r} - \frac{\rho_Q}{\sigma_e}$, la densité marginale de $\hat{X}_I | x$ s'obtient en intégrant la densité conjointe $f_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q)$:

$$\begin{aligned} f_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) &= \int_{\mathbb{R}} f_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q) d\hat{x}_Q \\ &= \frac{1 - |\rho|^2}{\pi \sigma_r^2 \sigma_e^2} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sigma_r}{(u^2 + \alpha)^2} du \end{aligned} \quad (9)$$

Comme $\alpha \geq 0$, on pose $u = \sqrt{\alpha} \tan(\theta)$, d'où :

$$f_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) = \frac{1 - |\rho|^2}{\pi \sigma_r \sigma_e^2} \alpha^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

En remplaçant α par son expression, on obtient finalement la PDF marginale du rapport de deux VA GCC centrées :

$$f_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) = \frac{1 - |\rho|^2}{2\sigma_r\sigma_e^2} \left(\left(\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right)^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

3.1.2 Fonction de répartition cumulative marginale

La CDF de la composante réelle $\hat{X}_I | x$ est donnée par :

$$\begin{aligned} F_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) &= P(\hat{X}_I < \hat{x}_I) = \int_{-\infty}^{\hat{x}_I} f_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_i) d\hat{x}_i \\ &= \frac{1 - |\rho|^2}{2\sigma_r\sigma_e^2} \int_{-\infty}^{\hat{x}_I} \left(\left(\frac{\hat{x}_i}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right)^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2} \right)^{-\frac{3}{2}} d\hat{x}_i \end{aligned} \quad (12)$$

En effectuant le changement de variable $u = \frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e}$:

$$F_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) = \frac{1 - |\rho|^2}{2\sigma_e^2} \int_{-\infty}^{\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e}} \left(u^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2} \right)^{-\frac{3}{2}} du \quad (13)$$

En posant ensuite $u = \sqrt{\frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2}} \cdot \tan(\theta)$, on obtient :

$$F_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) = \frac{1}{2} (\sin(\tan^{-1}(\psi)) + 1) \quad (14)$$

avec $\psi = \left(\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right) \sqrt{\frac{\sigma_e^2}{1 - |\rho|^2}}$. Enfin, en utilisant la propriété $\sin(\tan^{-1}(\psi)) = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \psi^2}}$, on obtient finalement :

$$F_{\hat{X}_I|x}(\hat{x}_I) = \frac{\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e}}{2\sqrt{\frac{1 - |\rho|^2}{\sigma_e^2} + \left(\frac{\hat{x}_I}{\sigma_r} - \frac{\rho_I}{\sigma_e} \right)^2}} + \frac{1}{2} \quad (15)$$

La Fig. 2 présente les expressions marginales obtenues : les courbes représentent les PDF, tandis que les zones colorées illustrent les CDF, qui correspondent également à la probabilité d'erreur pour un dépassement de seuil à l'origine. On observe que la zone colorée s'étend lorsque le module de la corrélation — grandeur complexe — diminue, ce qui se produit typiquement en présence de blocage et reflète une relation affaiblie entre le canal et son estimation.

3.2 Application au système DAS

Dans la section 3.1, il a été établi que les distributions marginales dépendent de ρ , σ_r et σ_e . Les paramètres sont remplacés par ceux des systèmes DAS, donnant, d'après l'équation (5), les expressions suivantes pour les variances :

$$\begin{cases} \sigma_r^2 = \left(\sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{h_k}^2 + \sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{\bar{h}_k}^2 \right) P_x + \sigma_n^2 \\ \sigma_e^2 = \sum_{k \in \mathcal{S}} \mu_k \sigma_{h_k}^2 \end{cases} \quad (16)$$

où σ_r dépend des variances (bloquées ou non), de la puissance du symbole et du bruit, tandis que σ_e ne considère que la variance des canaux estimés (non bloqués). La corrélation entre R et E , définie dans (5), s'exprime par :

$$\rho = \frac{x}{|x|} \frac{\left[\sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{h_k}^2 + \sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{\bar{h}_k}^2 \right]}{\sqrt{\sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{N}\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{h_k}^2 + \sum_{k \in \mathcal{S}^{\mathcal{B}}} \mu_k \sigma_{\bar{h}_k}^2 + \frac{\sigma_n^2}{|x|^2}} \sqrt{\sum_{k \in \mathcal{S}} \mu_k \sigma_{h_k}^2}}$$

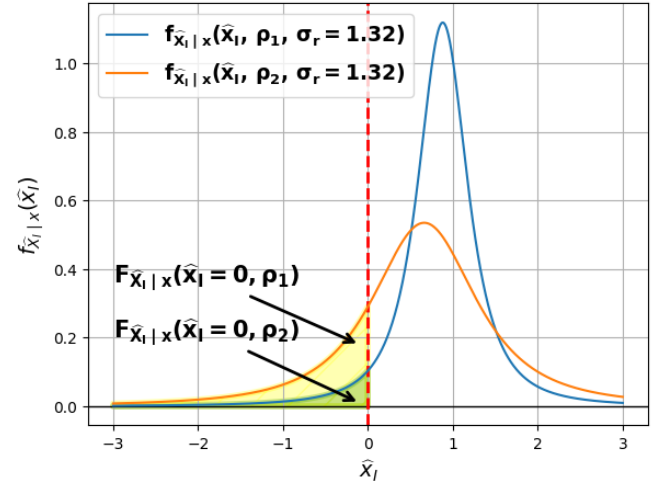


FIGURE 2 : Affichage de quelques PDF et CDF marginales pour $m_r = m_e = 0$; $\sigma_e = 1$; $\rho_1 = \frac{2}{3} + j\frac{2}{3}$; $\rho_2 = \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}$

Ce terme complexe se décompose en paramètres essentiels du canal, déterminés par les coefficients de corrélation $\rho_k^{h\bar{h}}$ qui décrivent la relation entre H_k et $\bar{H}_k$:

$$\rho_k^{h\bar{h}} = \text{Cor}(H_k, \bar{H}_k) = \frac{\text{Cov}(H_k, \bar{H}_k)}{\sigma_{h_k} \sigma_{\bar{h}_k}} = \frac{\sigma_{\bar{h}_k}}{\sigma_{h_k}} \quad (17)$$

Ce résultat montre qu'après suppression d'un sous-ensemble de *clusters*, le canal reste fortement corrélé à l'original, surtout lorsque la puissance des *clusters* bloqués est faible.

4 Calcul de PEB d'un système DAS avec blocage partiel

Dans cette section, les expressions PDF/CDF obtenues sont utilisées pour calculer la probabilité d'erreur binaire P_{eb} d'un système DAS sur des canaux partiellement bloqués. Ces expressions, établies pour un symbole x d'une constellation donnée, sont respectivement notées $f_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q)$ et $F_{\hat{X}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q)$ afin de mettre en évidence cette dépendance.

4.1 Méthode générale

4.1.1 Probabilité d'erreur symbole

La probabilité d'erreur de symbole P_{es} est obtenue en intégrant la PDF conjointe sur la région d'erreur $\mathbb{R}^2 \setminus R_i$ associée à chaque symbole x_i , où R_i est la région de décision de x_i .

$$P_{es} = \sum_{i \in \mathcal{A}} P(x = x_i) \int_{\mathbb{R}^2 \setminus R_i} f_{\hat{x}|x}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q) d\hat{x}_I d\hat{x}_Q \quad (18)$$

Ainsi, contrairement aux approches classiques sur canaux à évanouissements, où le calcul consiste à intégrer la probabilité d'erreur de symbole gaussienne sur la densité du canal, l'équation (18) comporte une intégrale par symbole x_i , puisque les densités sont ici conditionnées à chaque symbole.

4.1.2 Probabilité d'erreur binaire

La PEB est calculée en moyennant les probabilités d'erreur de chaque bit, $P_e(b_j)$. L'erreur sur le bit j (0 ou 1) dépend des symboles dont le j ème bit vaut 0 ou 1. L'analyse repose sur la définition des sous-ensembles suivants :

$$\mathcal{S}_j^\nu = \{x_i \mid b_j(x_i) = \nu\} \quad (19)$$

où ν prend la valeur 0 ou 1, ce qui conduit à l'expression :

$$P_e(b_j = \nu) = \sum_{x_i \in \mathcal{S}_j^\nu} P(x = x_i | \mathcal{S}_j^\nu) \\ = \int_{\mathbb{R}^2 \setminus \bigcup_{k \in \mathcal{S}_j^\nu} R_k} f_{\hat{X}|x_i}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q) d\hat{x}_I d\hat{x}_Q \quad (20)$$

Dans la plupart des cas, on a $P(x = x_i | \mathcal{S}_j^\nu) = \frac{1}{\text{Card}(\mathcal{S}_j^\nu)}$, du fait de l'hypothèse d'équiprobabilité et du codage binaire qui répartit équitablement les 0 et les 1 dans la constellation. Cela conduit à une expression analytique de P_{eb} , valable pour toutes les constellations et intégrant les effets du blocage via les PDF conjointes pour une analyse complète des erreurs :

$$P_{eb} = \frac{1}{\log_2(M)} \sum_{j=1}^{\log_2(M)} \left[\frac{1}{2} P_e(b_j = 0) + \frac{1}{2} P_e(b_j = 1) \right] \quad (21)$$

4.2 Application sur une constellation QPSK

Prenons comme exemple le calcul de P_{eb} pour une modulation QPSK avec codage Gray. Les symboles complexes $x = x_I + jx_Q$ proviennent de la constellation $\mathcal{A} = \{x_1 = d + jd, x_2 = d - jd, x_3 = -d + jd, x_4 = -d - jd\}$, où d est une constante réelle, avec le mapping binaire $\{b_1 b_0\} \in \{11, 01, 10, 00\}$. À partir de (21), on déduit (22). En exploitant successivement la symétrie de la PDF conjointe, l'expression de la PDF marginale puis de la CDF marginale, on obtient :

$$P_{eb}^{\text{QPSK}} = \int_{\mathbb{R}^-} \int_{\mathbb{R}} f_{\hat{X}|x=d+jd}(\hat{x}_I, \hat{x}_Q) d\hat{x}_I d\hat{x}_Q \\ = F_{\hat{X}_Q|x=d+jd}(\hat{x}_Q = 0) \quad (23)$$

Enfin, le rapport $\frac{E_b}{N_0}$ apparaît dans la CDF via les paramètres ρ et σ_r , qui dépendent de $\frac{\sigma_n^2}{|x|^2}$. Pour la modulation QPSK, $|x|^2 = 2d^2$ avec $d = \sqrt{E_b}$, la moitié de la distance minimale entre symboles. Ainsi, $\frac{\sigma_n^2}{|x|^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^{-1}$.

5 Simulation sur modèle CDL (3GPP)

Les résultats présentés sur la Figure 3 basés sur les modèles CDL (Cluster Delay Line) du 3GPP [1] confirment l'exactitude de la PEB théorique obtenue (cohérence parfaite entre courbes théoriques et simulations de Monte-Carlo). Les résultats sont présentés ici pour une QPSK sur une modulation OFDM à 102 sous-porteuses espacées de 15 kHz avec une porteuse à 3,5 GHz. Le modèle utilisé est le CDL-C adapté aux scénarios non ligne de vue avec un étalement temporel de 100 ns. Le nombre d'AP considéré est de 2, avec une répartition uniforme de la puissance ($\mu_k = \frac{1}{K_{BS}}$). Dans ce scénario, l'un des AP subit un blocage partiel défini (dans la légende, « BlkClust={indices} ») selon les caractéristiques géométriques du canal. Les dégradations de performance observées en fonction des *clusters* bloqués dépendent directement de la puissance apportée par chacun d'eux. Ainsi, le blocage des *clusters* {6, 7, 8}, correspondant à une puissance combinée de -6,1 dB par rapport au

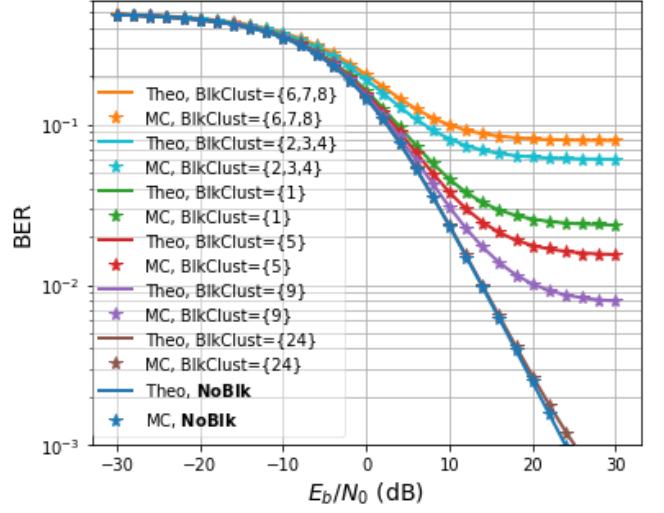


FIGURE 3 : Courbes TEB théoriques et simulées avec deux BS pour différentes configurations de blocage (CDL-C)

trajet direct, impacte fortement les performances, tandis que le blocage du 24^e *cluster* reste imperceptible, sa contribution en puissance étant de -22,8 dB. Les expressions théoriques établies permettent de prédire avec précision ce comportement.

6 Conclusion

Cet article présente une étude théorique des performances des systèmes DAS en environnement de blocage. De nouvelles expressions du PEB sont établies pour le cas d'un blocage soudain et partiel des canaux. Les résultats obtenus, parfaitement validés par simulation, permettent d'évaluer l'impact précis de différents scénarios de blocage, mais également l'amélioration liée à l'utilisation de multiples AP.

Références

- [1] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP) : Technical Specification Group Radio Access Network. TR 38.901, 3GPP, 2019.
- [2] Jeffrey G. ANDREWS *et al.* : Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems. 65(1):403–430, 2017.
- [3] Dazhen GU : On the quotient of centralized and non-centralized complex Gaussian random variables. *J. Res.*, 125, 2020.
- [4] Robert W. HEATH *et al.* : An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE J. of Sel. Top. in Signal Process.*, 10(3):436–453, 2016.
- [5] Yang LI et Qian HE : On the ratio of two correlated complex Gaussian random variables. 23:2172–2176, 2019.
- [6] Shuyue XU *et al.* : Blockage-resilient hybrid transceiver optimization for mmWave communications. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 23(4):2994–3008, 2024.

$$P_{eb}^{\text{QPSK}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\sum_{x_i \in \mathcal{S}_1^0} \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^+} f_{\hat{X}|x_i} d\hat{x}_I d\hat{x}_Q + \sum_{x_i \in \mathcal{S}_1^1} \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^-} f_{\hat{X}|x_i} d\hat{x}_I d\hat{x}_Q \right) + \frac{1}{2} \left(\sum_{x_i \in \mathcal{S}_2^0} \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^+} \int_{\mathbb{R}} f_{\hat{X}|x_i} d\hat{x}_I d\hat{x}_Q + \sum_{x_i \in \mathcal{S}_2^1} \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^-} \int_{\mathbb{R}} f_{\hat{X}|x_i} d\hat{x}_I d\hat{x}_Q \right) \right] \quad (22)$$