

Réduction de l'impact de l'effet Doppler dans un système OFDM grâce au « massive MIMO »

Alexis BAZIN¹, Bruno JAHAN¹, Maryline HÉLARD²

¹Orange Labs

4 rue du Clos Courtel, 35512 Cesson-Sévigné, France

²Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes (IETR)

20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7, France

alexis.bazin@orange.com, bruno.jahan@orange.com

maryline.helard@insa-rennes.fr

Résumé – Pour faire face à l'émergence de nouveaux besoins, le développement de la cinquième génération de standards pour la téléphonie mobile (5G) doit prendre en compte de nouvelles contraintes. Parmi celles-ci, la qualité de service pour les communications à forte vitesse, par exemple pour les trains et les voitures, doit être améliorée. Une forte mobilité crée des interférences liées à l'effet Doppler et celles-ci peuvent sévèrement affecter les performances des systèmes. Dans ce papier, l'impact de l'effet Doppler sur un système « massive MIMO » est étudié pour la voie montante. Les résultats obtenus montrent que les techniques « massive MIMO » permettent de réduire considérablement les interférences liées à la mobilité et ainsi d'avoir des performances similaires à ceux d'un système sans mobilité.

Abstract – In order to face the emergence of new needs, the development of the fifth generation of mobile networks (5G) has to take into account new constraints. Among them, the quality of service for high mobility communications, for examples trains and cars, should be improved. A high mobility creates interference related to the Doppler effect, which can severely damage the performance of the systems. In this paper, the impact of the Doppler effect on an uplink massive MIMO system is studied. The obtained results show that massive MIMO techniques allow for substantially reducing the interference due to the mobility and thus for having performance similar to a system without mobility.

1 Introduction

La cinquième génération de standards pour la téléphonie mobile (5G) est actuellement en plein développement et la plupart des études montre que de nouveaux scénarios doivent être pris en compte. Parmi ces études, beaucoup parlent de scénarios avec mobilité (V2V et V2x dans [1]) où la vitesse des utilisateurs peut atteindre des valeurs élevées (jusqu'à 500 km/h selon [2]). Pour une modulation multiporteuse, de telles valeurs de vitesse induisent la création d'interférences provoquées par l'effet Doppler. Celles-ci peuvent sérieusement impacter les performances des systèmes et par conséquent, des solutions doivent être trouvées pour contrecarrer l'impact de l'effet Doppler.

L'augmentation du nombre d'antennes sur la station de base (BS) pour créer des systèmes dits « massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) » a de nombreux avantages et est une des tendances pour le développement de la 5G [3]. Ce papier se focalise sur la voie montante où plusieurs études ont montré comment les systèmes « massive MIMO » permettent d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) et de réduire les interférences multi-utilisateurs [5]. Bien que certaines études prennent en compte l'effet Doppler pour des systèmes MIMO avec un faible nombre d'antennes de réception [6], aucune n'a

encore été menée sur l'incidence de l'effet Doppler lorsque le nombre d'antennes augmente fortement. Ainsi, l'impact de l'effet Doppler sur un système « massive MIMO » est étudié dans ce papier.

La description du système réalisée dans la partie 2 permet de modéliser l'effet Doppler. En s'appuyant sur ce modèle, l'étude effectuée dans la partie 3 évalue son impact sur les performances du système en termes de taux d'erreurs binaire (TEB). De plus, l'effet de l'augmentation du nombre d'antennes de réception sur les interférences dues à l'effet Doppler est analysé. Des simulations sont effectuées dans la partie 4 afin de confirmer cette analyse et permettent de conclure dans la dernière partie.

2 Modélisation du système

Afin d'évaluer l'impact de l'effet Doppler sur les performances des systèmes « massive MIMO » pour la voie montante, une communication entre un utilisateur mobile équipé d'une seule antenne et une BS avec N_r antennes est considérée dans ce papier. Du côté de l'émetteur, la modulation « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » (OFDM) est utilisée de par sa forte intégration dans les systèmes actuels. Le nombre

de sous-porteuses est modélisé par M et le temps symbole est représenté par la variable T_0 , ce qui donne un temps d'échantillonnage égal à T_0/M . Ainsi, en considérant l'indice temporel k , le signal temporel transmis en bande de base est modélisé par :

$$s[k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} c[m] e^{j2\pi \frac{m}{M} k}, \quad (1)$$

$c[m]$ étant la donnée complexe portée par la sous-porteuse d'indice m .

Le canal de propagation est un canal multi-trajets constitué de L_h trajets. Ainsi, $h_l^{n_r}[k]$ correspond au $l^{\text{ème}}$ trajet de la réponse impulsionnelle du canal entre l'émetteur et l'antenne de réception d'indice n_r , avec $n_r \in [0, N_r - 1]$. En présence de mobilité au niveau de l'émetteur, cette variable dépend de l'indice temporel k et sa variation temporelle est liée à la fréquence Doppler maximale notée f_D^{max} dans ce papier. Les antennes de réception sont supposées suffisamment espacées de manière à ce que $h_l^{n_r}[k]$ et $h_l^{n'_r}[k]$ soient considérées comme deux variables indépendantes si $n_r \neq n'_r$. Par conséquent, le signal temporel reçu en bande de base sur l'antenne d'indice n_r est donné par :

$$r^{n_r}[k] = \sum_{l=0}^{L_h-1} s[k-l] h_l^{n_r}[k] + \eta^{n_r}[k], \quad (2)$$

avec $\eta^{n_r}[k]$ la composante temporelle du bruit sur l'antenne n_r .

Les signaux sont démodulés au niveau de chaque antenne de réception. Pour la suite, l'analyse se centre sur une seule sous-porteuse d'indice m_0 et la notation $c_p = c[m_0 + p]$ est définie ainsi que les ensembles mathématiques suivants :

$$\Omega_p = \{p \in \mathbb{Z} \mid c_p \neq 0\}, \quad (3)$$

définissant l'ensemble des sous-porteuses utiles et

$$\Omega_p^* = \Omega_p \setminus \{0\}, \quad (4)$$

définissant l'ensemble des sous-porteuses utiles privé de la sous-porteuse d'indice m_0 . La variance des données portées par les sous-porteuses utiles $c_{p \in \Omega_p}$ est représentée par σ_c^2 . Après démodulation, la donnée reçue par l'antenne n_r est :

$$\begin{aligned} y^{n_r} &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{k=0}^{M-1} r^{n_r}[k] e^{-j2\pi \frac{m_0}{M} k} \\ &= \sum_{p \in \Omega_p} H_p^{n_r} c_p + b^{n_r}, \end{aligned} \quad (5)$$

avec b^{n_r} la composante fréquentielle du bruit sur l'antenne n_r de variance σ_b^2 et $H_p^{n_r}$ définie de la manière suivante :

$$H_p^{n_r} = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{L_h-1} \sum_{k=0}^{M-1} h_l^{n_r}[k] e^{j2\pi \frac{p}{M} k} e^{-j2\pi \frac{m_0+p}{M} l}. \quad (6)$$

$H_0^{n_r}$ représente la composante utile du canal entre l'émetteur et l'antenne n_r permettant la réception de la donnée c_0 . Inversement, $H_p^{n_r}$ représente les composantes du canal conduisant

aux interférences entre sous-porteuses provenant des données $c_{p \in \Omega_p^*}$. Il peut être vu que ces interférences sont dues à la variation temporelle du canal, autrement dit à l'effet Doppler et sont donc directement liées à la valeur de f_D^{max} . Ainsi, si le canal est statique ($f_D^{max} = 0$ Hz), alors $H_p^{n_r} = 0$. Pour la suite, les vecteurs représentatifs du canal sont définis de la manière suivante :

$$\mathbf{H}_p = [H_p^0 \quad H_p^1 \quad \dots \quad H_p^{N_r-1}]^T, \quad (7)$$

avec $p \in \Omega_p$ et où $(\cdot)^T$ décrit la matrice transposée. Le vecteur de bruit est donné par :

$$\mathbf{b} = [b^0 \quad b^1 \quad \dots \quad b^{N_r-1}]^T, \quad (8)$$

et le vecteur des données reçues avant égalisation est représenté par :

$$\mathbf{y} = [y^0 \quad y^1 \quad \dots \quad y^{N_r-1}]^T. \quad (9)$$

Dans ce papier, la technique de combinaison « Maximum Ratio Combining » (MRC) est utilisée, celle-ci étant optimale dans le cas simple utilisateur [4] tout en étant relativement peu complexe. La connaissance du canal de propagation au niveau du récepteur est nécessaire pour appliquer cette technique et, par soucis de simplicité, une estimation parfaite du canal est considérée. Cette supposition peut se justifier puisque les interférences liées aux erreurs d'estimation du canal sont réduites dans un système « massive MIMO » [5]. Par conséquent, la donnée reçue après égalisation MRC est :

$$\begin{aligned} \hat{c}_0 &= \frac{(\mathbf{H}_0)^H}{\|\mathbf{H}_0\|^2} \mathbf{y} \\ &= c_0 + \underbrace{\sum_{p \in \Omega_p^*} \frac{(\mathbf{H}_0)^H \cdot \mathbf{H}_p}{\|\mathbf{H}_0\|^2} c_p}_{I_{Doppler}} + \underbrace{\frac{(\mathbf{H}_0)^H \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{H}_0\|^2}}_{b_{noise}}, \end{aligned} \quad (10)$$

où $(\cdot)^H$ représente la transposée conjuguée d'une matrice et $\|\cdot\|$ la norme euclidienne d'une matrice.

La modélisation du système énoncée dans cette partie ainsi que les notations associées dans le domaine fréquentiel sont représentés dans la figure 1 qui met en avant les interférences entre sous-porteuses liées à l'effet Doppler.

3 Impact de l'effet Doppler

À partir de la modélisation du système dans la partie précédente, il est possible de mettre en avant l'impact de l'effet Doppler sur les performances du système en termes de TEB, ainsi que les conséquences de l'augmentation du nombre d'antennes en réception.

Dans l'équation (10), la variable b_{noise} représente la composante de bruit en réception directement liée au SNR $\rho = \sigma_c^2 / \sigma_b^2$. Un des effets bien connu du « massive MIMO » est d'augmenter le rapport signal sur bruit équivalent du système ρ_{eq} tel que $\rho_{eq} = N_r \rho$ [7]. Par ailleurs, la variable $I_{Doppler}$ représente la composante des interférences provoquées par l'effet Doppler, est liée à f_D^{max} et est indépendante du SNR ρ .

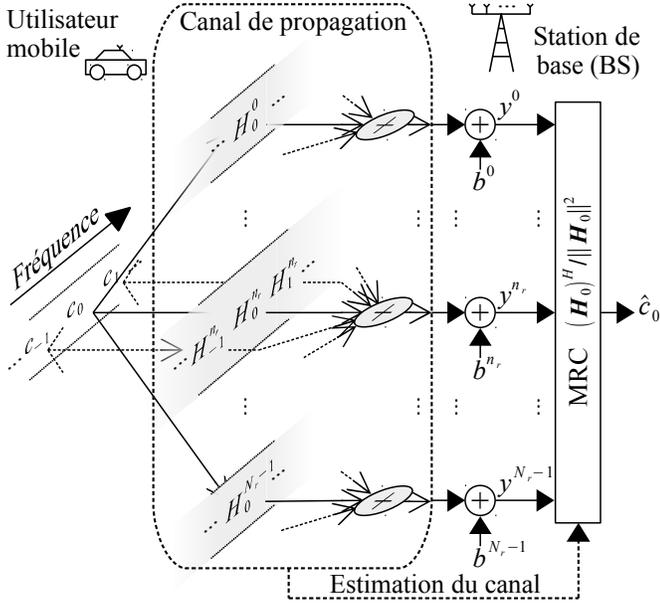


FIGURE 1 – Modélisation du système « massive MIMO » avec mobilité dans le domaine fréquentiel.

Ainsi, lorsque ρ_{eq} est suffisamment faible, la composante $I_{Doppler}$ est négligeable devant le bruit b_{noise} et la donnée reçue devient :

$$\hat{c}_0 \approx c_0 + b_{noise}. \quad (11)$$

Les performances du système en termes de TEB sont alors équivalentes à celles d'un système statique et donc sans effet Doppler. En revanche, lorsque ρ_{eq} devient grand, les performances du système sont limitées par $I_{Doppler}$ et lorsque ρ_{eq} tend vers l'infini la donnée reçue est :

$$\hat{c}_0 = c_0 + I_{Doppler}. \quad (12)$$

Par conséquent, en s'intéressant au TEB du système, l'effet Doppler induit la création d'un "plancher d'erreur" qui est d'autant plus haut que la vitesse de l'utilisateur est grande.

La puissance des interférences liées à l'effet Doppler est donnée par :

$$\begin{aligned} P_{Doppler} &= \frac{\sum_{p \in \Omega_p^*} |(\mathbf{H}_0)^H \mathbf{H}_p|^2}{\|\mathbf{H}_0\|^4} \sigma_c^2 \\ &= \frac{\sum_{p \in \Omega_p^*} |\sum_{n_r=0}^{N_r-1} (H_0^{n_r})^* H_p^{n_r}|^2}{(\sum_{n_r=0}^{N_r-1} |H_0^{n_r}|^2)^2} \sigma_c^2, \end{aligned} \quad (13)$$

où $(\cdot)^*$ représente la valeur conjuguée d'un nombre complexe et $|\cdot|$ représente sa norme. $P_{Doppler}$ dépend donc de la variable N_r . Afin d'évaluer l'influence du nombre d'antennes de réception sur cette puissance, la valeur moyenne de $P_{Doppler}$ est calculée en fonction de N_r en utilisant l'équation (13) et en fixant $\sigma_c^2 = 1$. Les variables $H_{p \in \Omega_p}^{n_r}$ sont quant à elles calculées grâce à l'équation (6). Étant dépendantes du canal de propagation $h_l^{n_r}[k]$ et des paramètres du système, ces variables sont déterminées pour le cas général d'un canal simple trajet ($L_h = 1$) dont l'amplitude suit une loi de type Rayleigh. Ses variations

temporelles sont telles que $f_D^{max} = 2000 \text{ Hz}$, correspondant à une vitesse de 360 km/h pour une fréquence centrale de 6 GHz. De plus, des paramètres typiques d'une configuration 4G « Long Term Evolution » (LTE) sont choisis : $T_0 = 66,7 \mu s$ et $M = 1024$ sous-porteuses. Cette puissance $P_{Doppler}$ ainsi que les variations du SNR équivalent ρ_{eq} lorsque $\rho = 10 \text{ dB}$ sont représentés sur la Figure 2 en fonction de N_r . Ces résultats

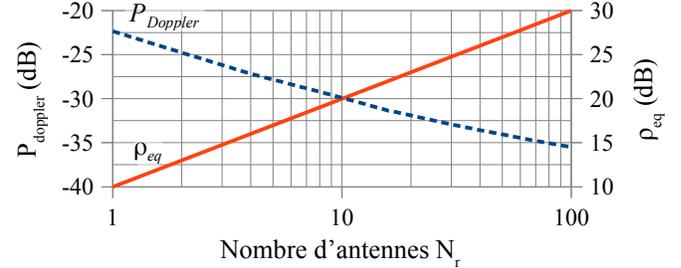


FIGURE 2 – Puissance des interférences liées à l'effet Doppler et SNR équivalent en fonction de N_r .

tats montrent qu'en plus d'augmenter le SNR équivalent, l'augmentation de N_r permet la diminution de $P_{Doppler}$. Par conséquent, la valeur du plancher d'erreur diminue avec l'augmentation du nombre d'antennes.

La fréquence Doppler maximale équivalente est ici représentée par $(f_D^{max})_{eq}$ et est définie de sorte que la valeur du plancher d'erreur du système « massive MIMO » considéré soit la même que celle d'un système « Single Input Single Output (SISO) » avec une fréquence Doppler maximale égale à $(f_D^{max})_{eq}$. $(f_D^{max})_{eq}$ est alors inférieure à f_D^{max} .

4 Performances sur un canal EVA

En vue de confirmer et d'évaluer les résultats précédents, le système est simulé sur un canal de propagation « Extended Vehicular A » (EVA) défini dans [8, 9] pour des communications LTE véhiculaires. Une constellation 16QAM est choisie et les paramètres système LTE sont repris.

Dans un premier temps, le TEB du système est calculé pour des valeurs de N_r allant de 1 à 32 antennes. La fréquence Doppler maximale est arbitrairement haute afin de visualiser l'impact de l'effet Doppler, c'est à dire $f_D^{max} = 3000 \text{ Hz}$. Pour avoir un ordre d'idée, cela correspond à une vitesse de 540 km/h pour une fréquence centrale de 6 GHz. Les résultats sont donnés en fonction du rapport signal sur bruit équivalent ρ_{eq} sur la figure 3.

Pour de faibles valeurs de N_r (1, 2 et 4 antennes), le plancher d'erreur pressenti dans la partie précédente est visible ce qui confirme notre analyse quant à l'impact de l'effet Doppler sur les performances du système en termes de TEB. De plus, ce plancher d'erreur diminue avec l'augmentation du nombre d'antennes de réception validant les résultats de la partie précédente concernant l'influence de N_r sur les interférences liées à l'effet Doppler. Par conséquent, plus la valeur de N_r aug-

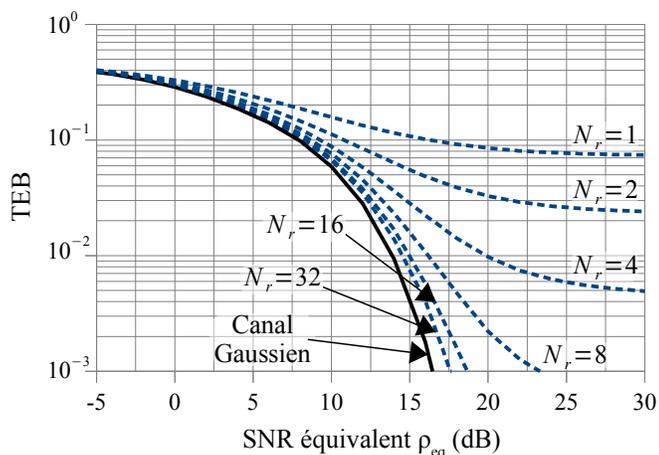


FIGURE 3 – TEB en fonction du SNR équivalent pour un canal EVA avec $f_D^{max} = 3000 \text{ Hz}$ et un nombre d'antennes de réception N_r allant de 1 à 32 antennes.

mente, plus les performances du système se rapprochent des performances sur un canal Gaussien.

L'étude de l'impact de l'effet Doppler sur les performances du système en termes de TEB se réduit donc à l'analyse de la valeur du plancher d'erreur. Ainsi, cette valeur est calculée en fonction du nombre d'antennes sur la BS et de la fréquence Doppler maximale. Les simulations donnent les résultats de la figure 4. Ces résultats montrent que l'augmentation

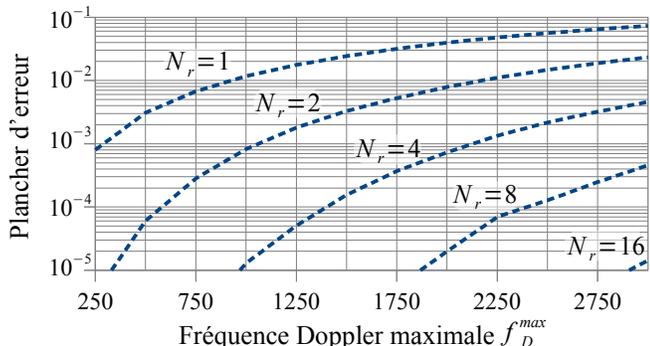


FIGURE 4 – Valeur du plancher d'erreur en fonction de la fréquence Doppler maximale f_D^{max} pour différentes valeurs du nombre d'antennes de réception N_r .

du nombre d'antennes de réception permet une réduction drastique de l'impact de l'effet Doppler. Par exemple, avec $N_r = 4$ antennes et $f_D^{max} = 3000 \text{ Hz}$, la valeur du plancher d'erreur est la même que pour un système SISO ($N_r = 1$ antenne) avec $f_D^{max} = 600 \text{ Hz}$, soit une fréquence Doppler maximale équivalente $(f_D^{max})_{eq} \approx f_D^{max} / 5$. Un système « massive MIMO » prend généralement en compte une dizaine d'antennes. Dans ce contexte, le plancher d'erreur sera inférieur à 10^{-5} même pour de très fortes valeurs de f_D^{max} . L'impact de l'effet Doppler est alors réduit au point que les performances de ce système sont similaires à celles d'un système statique.

5 Conclusion

L'étude menée dans ce papier est centrée sur l'impact de l'effet Doppler induit par la mobilité d'un utilisateur sur la voie montante d'un système « massive MIMO ». En termes de taux d'erreurs binaire, cette analyse montre que l'effet Doppler induit la création d'un plancher d'erreur dont la valeur diminue avec l'augmentation du nombre d'antennes sur la station de base. Les résultats de simulation montrent que cette réduction est drastique. Avec une dizaine d'antennes, les performances en termes de taux d'erreurs binaire sont alors similaires à un système sans mobilité. Outre leurs nombreux avantages connus, les systèmes « massive MIMO » peuvent également être utilisés pour améliorer les performances des communications 5G à forte mobilité.

Références

- [1] F. Schaich, B. Sayrac, M. Schubert, H. Lin, K. Pedersen, M. Shaat, G. Wunder et A. Georgakopoulos, "FANTASTIC 5g : 5g - PPP Project on 5g Air Interface Below 6GHz", Rap. Tech., disponibilité : www.fantastic5g.eu.
- [2] "IMT Vision Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", ITU-R, Rap. Tech. M.2083-0, Sep. 2015, disponibilité : www.itu.int.
- [3] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson et T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems", *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.
- [4] T. Eng, N. Kong et L.B. Milstein, "Comparison of diversity combining techniques for Rayleigh-fading channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 9, pp. 1117-1129, Sep. 1996.
- [5] T. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [6] S. Serbetli, "Doppler compensation for mobile OFDM systems with multiple receive antennas", *2012 19th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, Nov. 2012.
- [7] H.Q. Ngo, E. Larsson, et T. Marzetta, "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, Avr. 2013.
- [8] "User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception", 3GPP, Rap. Tech. TS 36.101, disponibilité : www.3gpp.org.
- [9] "Base Station (BS) Radio Transmission and Reception", 3GPP, Rap. Tech. TS 36.104, disponibilité : www.3gpp.org.