

# Gestion des interférences pour une meilleure couverture des futurs réseaux cellulaires à forte densité de stations de base

MOHAMAD YOUNES, YVES LOUET

IETR UMR CNRS 6164, CentraleSupélec Rennes Campus, 35576 Cesson-Sevigné, France

{mohamad.younes, Yves.Louet}@centralesupelec.fr

**Résumé** - La maximisation de la couverture constitue un objectif clé pour répondre aux exigences des futurs réseaux cellulaires. Dans ce contexte, la gestion des interférences joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la couverture des futurs réseaux cellulaires à forte densité de stations de base (BSs). En effet, la performance de la couverture est étroitement liée à la gestion des interférences et sera dégradée si les interférences ne sont pas gérées. Dans ce contexte, nous proposons deux solutions pour réduire les interférences, consistant à utiliser l'approche de beamforming d'une part, et à utiliser l'approche de coopération intercellulaire d'une autre part où les BSs de la zone de coopération utilisent la transmission simultanée via la technique de MB-SFN (Multicast Broadcast - Single Frequency Network). Ainsi, cet article part d'un scénario de déploiement de BSs à forte densité, et se concentre sur l'étude et la comparaison de la couverture de ces deux approches, tout en considérant que les BSs sont distribuées de manière aléatoire et indépendante selon le Poisson Point Processus (PPP) au lieu du modèle hexagonal traditionnel. Une attention particulière est ainsi portée sur l'évaluation de l'impact de certains paramètres sur la probabilité de couverture dans une variété de condition du système.

**Abstract** - Coverage maximization is a key objective in order to meet the requirements of future cellular networks. In this context, interference management plays a key role in the coverage optimization of future cellular networks with a high density of base stations (BSs). Indeed, coverage performance is closely related to interference management and will be degraded if the interference is not managed. In this context, we propose two solutions to reduce interference, consisting of using the beamforming approach on the one hand, and using the inter-cell cooperation approach on the other hand where the BSs in the cooperation area use simultaneous transmission via the MB-SFN (Multicast Broadcast - Single Frequency Network) technique. Thus, this paper starts from a high-density BSs deployment scenario, and focuses on the study and comparison of the coverage of these two approaches, while considering that the BSs are randomly and independently distributed according to the Poisson Point Process (PPP) instead of the traditional hexagonal model. Particular attention is paid to the evaluation of the impact of some parameters on the coverage probability under a variety of system conditions.

## 1 Introduction

Les réseaux cellulaires de cinquième génération (5G) doivent être conçus pour répondre aux demandes croissantes de services de communication, parmi lesquelles l'accès aux très haut débits, un nombre très important d'équipements connectés, de faibles latences, de larges couvertures radio et des meilleures efficacités spectrales et énergétiques [1] - [3]. Ces objectifs peuvent être atteints en combinant une variété de nouvelles technologies 5G, telles que le déploiement massif de petites cellules, l'utilisation de réseaux d'antennes directionnelles et la transmission en mode broadcast avec coopération intercellulaire [1] - [4].

La topologie du réseau, c'est-à-dire la densité et l'emplacement des BSs, est un sujet qui a été très largement discuté dans la littérature. Cependant, la plus grande partie de ces études est menée dans le contexte des réseaux traditionnels où la topologie du réseau est basée sur des modèles à treillis hexagonaux. Il est néanmoins essentiel de noter que dans le cas de futurs réseaux mobiles (5G – et 6G à venir), les méthodes hexagonales ne sont plus adaptées car elles ne conviennent pas aux scénarios urbains où la densité d'utilisateurs varie considérablement [5]. C'est pourquoi la géométrie stochastique a été présentée comme une solution prometteuse ces dernières années pour l'analyse des futurs réseaux cellulaires à petites cellules [4]. Notons que dans le cas de la géométrie stochastique, les emplacements des BSs sont généralement modélisés selon PPP. Ainsi, les travaux de [2] [4] ont montrés que la modélisation du réseau cellulaire selon PPP permet de représenter des situations quasi réalistes. Dans ce contexte, nous considérons l'approche de PPP pour

modéliser de manière aléatoire et indépendante la position des BSs au lieu du traditionnel modèle hexagonal.

Il est important de noter que même si le déploiement massif de BSs est considéré comme l'une des technologies clés dans la réussite des réseaux 5G pour satisfaire les besoins en termes de couverture et de capacité du réseau [7], il est désormais largement admis que le déploiement de BSs à forte densité s'accompagne des défis posés par la gestion de l'interférence [8] [9] [10]. En effet, avec l'augmentation prévue du nombre de BSs, les effets d'interférence deviennent plus forts, rendant difficile la prévision de la couverture des futurs réseaux cellulaires à forte densité de BSs [8] [9]. Plusieurs travaux ont été menés pour analyser la couverture avec et sans gestion de la coordination des interférences [3] [6] [8] [9] [10]. Notre article s'est donc concentré sur l'optimisation de la couverture en mettant l'accent sur la gestion des interférences via deux solutions prometteuses pour répondre aux besoins des réseaux sans fil 5G et au-delà. La première solution consiste à utiliser la technique de beamforming en déployant un certain nombre d'antennes par secteur [11]. La deuxième solution consiste à étudier le mécanisme de coopération intercellulaire via la technique MB-SFN [6] [12]. Notons que ces deux solutions représentent une opportunité dans la 5G pour répondre à la consommation massive de services multimédia dans un futur proche. À la connaissance des auteurs, très peu d'études sont menées sur la gestion des interférences pour optimiser la probabilité de couverture en comparant ces deux approches, en particulier, dans le scénario où les BSs à forte densité sont distribuées suivant PPP.

Le reste du document est organisé comme suit. Dans la section II, nous présentons le modèle du système. La section

III présente le SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) et la probabilité de couverture en mode unicast (sans beamforming et avec beamforming) et broadcast. Dans la section IV, des résultats numériques et de simulation sont présentés pour étudier l'impact de plusieurs paramètres du système sur la performance de la probabilité de couverture. Enfin, les conclusions sont tirées dans la section V.

## 2 Modèle de système

Dans notre étude, nous utilisons l'approche de PPP pour modéliser la répartition des BSs dans une zone carrée. Ainsi, nous considérons des BSs à trois secteurs (de largeur  $120^\circ$  chacun) avec des antennes appariées capables d'utiliser le beamforming unicast (avec un certain nombre d'antennes par secteur). La performance de couverture du réseau est ainsi évaluée avec une transmission en mode unicast (avec et sans beamforming) et broadcast, tout en considérant que toutes les BSs transmettent des signaux OFDM à la même puissance et utilisent une même fréquence porteuse et une même largeur de bande système.

Considérant un utilisateur situé à une distance  $r_g$  d'une certaine BS, la puissance du signal reçu par l'utilisateur peut être exprimée en fonction de l'exposant d'affaiblissement  $\alpha$  sur le trajet, du facteur de fading  $h$  et du paramètre de shadowing  $e^\chi$ , comme suit :

$$P_{rx} = P_{tx} \kappa r_g^{-\alpha} h e^\chi G(\theta), \quad (1)$$

où :

- $P_{tx}$  est la puissance de transmission de la BS,
- $\kappa$  est le coefficient d'atténuation et  $\alpha$  est l'exposant d'affaiblissement du trajet,
- $h$  est une variable aléatoire (v.a.) distribuée de manière exponentielle avec une moyenne unitaire,
- $\chi$  est une v.a. qui suit une loi normale avec une moyenne nulle et une variance  $\sigma^2$  et
- $G(\theta)$  est le gain de l'antenne dans la direction  $\theta$  [13].

Le shadowing est modélisé comme une v.a. log-normale  $y \sim e^\chi$  où  $\chi \sim N(0, \sigma^2)$  est composé de deux parties :

$$\chi = \chi_i + \chi_c, \quad (2)$$

où  $\chi_c$  est la partie corrélée tenant en compte des obstacles proches du récepteur et  $\chi_i$  est la partie non corrélée prenant en compte des obstacles indépendants pour chaque BS. On peut ainsi exprimer le shadowing  $y$  comme suit :

$$y = e^{\chi_i + \chi_c}. \quad (3)$$

Notons que le shadowing est généralement caractérisé en termes d'écart-type de sa dispersion  $\sigma_{dB}$  (en dB) =  $\frac{10}{\sigma \ln(10)}$ .

Ainsi, la variance de la somme de ces 2 v.a. normales indépendantes peut être exprimée par  $\sigma^2 = \sigma_c^2 + \sigma_i^2$ . Dans le reste de l'article, on considère  $\sigma_c^2 = \sigma_i^2 = \frac{\sigma^2}{2}$  [13]. En prenant en compte maintenant les effets du canal, nous pouvons ainsi exprimer la puissance du signal reçu d'une certaine station de base BS  $i$  comme suit :

$$P_{rx} = P_{tx} \kappa r_{g,i}^{-\alpha} e^{\chi_c} e^{\chi_i} h_i G(\theta) = P_{tx} \kappa r_i^{-\alpha} e^{\chi_c} h_i G(\theta), \quad (4)$$

où  $r_i = e^{-\frac{\chi_i}{\alpha}} r_{g,i}$  est la modification de la distance  $r_{g,i}$  qui peut être vue comme une modification de l'emplacement original de la BS.

## 3 Probabilités de couverture des solutions proposés

Nous discutons dans cette section la probabilité de couverture en mode unicast (avec et sans beamforming) et

broadcast, en liaison descendante, pour un utilisateur placé au centre de la zone d'étude. Notons que cet utilisateur est comme un utilisateur type, c.à.d. comme référence pour tous les utilisateurs.

L'optimisation de la probabilité de couverture d'un réseau cellulaire est l'un des principaux problèmes du réseau cellulaire 5G. L'objectif consiste à répondre aux exigences de la qualité de service imposée par le fournisseur de service. Notons que la probabilité de couverture est uniquement liée au SINR reçu qui dépend lui-même des coefficients aléatoires du canal (incluant les effets d'affaiblissement sur le trajet, le shadowing et le fading) et des paramètres du système et de la distribution aléatoire des BSs. Ainsi, la probabilité de couverture est définie comme la probabilité que le SINR (noté par  $\gamma$  dans le reste du document) soit supérieur à un seuil prédéfini  $\gamma_{target}$  :

$$\eta = P\{\gamma \geq \gamma_{target}\}, \quad (5)$$

où  $\gamma$  est exprimé comme le rapport entre la puissance utile reçue  $P_r$  et somme de la puissance des interférences  $I_r$  et du bruit  $P_N$  :

$$\gamma = \frac{P_r}{I_r + P_N}. \quad (6)$$

Dans le mode unicast, seule la BS de service fournit une puissance de signal utile ( $P_{s,UC}$ ) et toutes les autres cellules génèrent des interférences. Ainsi, la puissance du signal reçu  $P_{s,UC}$  est calculée selon la BS de service. En ce qui concerne la puissance d'interférence, elle se décompose en deux parties. La première  $I_{s,UC}$  est liée aux secteurs d'interférences de la BS de service à trois secteurs. La seconde  $I_{i \in \psi / i \neq s, UC}$  est liée aux autres BSs appartenant à la zone d'étude. Par conséquent, le SINR reçu par un utilisateur en mode unicast peut être exprimé par :

$$\gamma_{UC} = \frac{P_{s,UC}}{I_{s,UC} + I_{i \in \psi / i \neq s, UC} + P_N}, \quad (7)$$

avec :

$$P_{s,UC} = P_{tx} \kappa r_s^{-\alpha} e^{\chi_c} h_s G(\theta_{s,t}), \quad (8)$$

et :

$$I_{s,UC} = P_{tx} \kappa r_s^{-\alpha} e^{\chi_c} h_s \sum_{j=1, j \neq t}^3 G(\theta_{s,j}), \quad (9)$$

$$I_{j \in \psi / i \neq s, UC} = P_{tx} \kappa e^{\chi_c} \sum_{i \in \psi / i \neq s} r_i^{-\alpha} h_i \sum_{j=1}^3 G(\theta_{i,j}), \quad (10)$$

où :

- le sous-index  $s$  désigne la BS de service,
- le sous-index  $t$  désigne le secteur de service de la BS de service,
- le sous-index  $j$  désigne les secteurs d'interférences de la BS de service ( $j \neq t$ ),
- $\psi$  est l'ensemble de toutes les BSs distribuées suivant PPP.

Pour le mode unicast avec beamforming, nous utilisons un réseau linéaire uniforme composé d'un certain nombre d'antennes par secteur - noté  $M$  dans la suite. D'une façon similaire, le SINR en mode unicast avec beamforming est exprimé par :

$$\gamma_{UC}^{Beamf} = \frac{P_{s,UC}^{Beamf}}{I_{s,UC}^{Beamf} + I_{i \in \psi / i \neq s, UC}^{Beamf} + P_N}, \quad (11)$$

avec :

$$P_{s,UC}^{Beamf} = M P_{tx} \kappa r_s^{-\alpha} e^{\chi_c} h_s G(\theta_{s,t}), \quad (12)$$

et :

$$I_{s,UC}^{Beamf} = P_{tx} \kappa r_s^{-\alpha} e^{\chi_c} h_s \sum_{j=1, j \neq t}^3 A(\theta_{s,j}), \quad (13)$$

$$I_{i \in \psi / i \neq s, UC}^{Beamf} = P_{tx} \kappa e^{\chi_c} \sum_{i \in \psi / i \neq s} r_i^{-\alpha} h_i \sum_{j=1}^3 A(\theta_{i,j}), \quad (14)$$

où  $A(\theta)$  est le gain du réseau pour un secteur dans la direction  $\theta$  [11].

Discutons maintenant le cas de la transmission broadcast.

Nous nous intéressons à la technique MB-SFN qui a été introduite dans LTE Rel-9 du 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Dans une zone SFN, tous les émetteurs envoient le même contenu en même temps et sur la même fréquence, tout en maintenant une synchronisation entre eux afin que la puissance reçue de tous les émetteurs puisse être exploitée de manière constructive par le récepteur [6] [12]. Ainsi, toutes les BSs de la zone SFN contribuent à la puissance reçue et génèrent une puissance d'interférence ( $I_{BC}$ ) provenant des signaux retardés. Considérant un réseau à fréquence unique composé d'un certain nombre de stations de base  $N_{BS}$ , nous pouvons ainsi exprimer le SINR en mode broadcast  $SINR_{BC}$  comme suit :

$$SINR_{BC} = \frac{P_{BC}}{I_{BC} + P_N}, \quad (15)$$

avec :

$$P_{BC} = P_{tx} e^{\chi_c \kappa} \sum_{i=1}^{N_{BS}} \delta_i r_i^{-\alpha} h_i \sum_{j=1}^3 G(\theta_{i,j}), \quad (16)$$

$$I_{BC} = P_{tx} e^{\chi_c \kappa} \sum_{i=1}^{N_{BS}} (1 - \delta_i) r_i^{-\alpha} h_i \sum_{j=1}^3 G(\theta_{i,j}), \quad (17)$$

où :

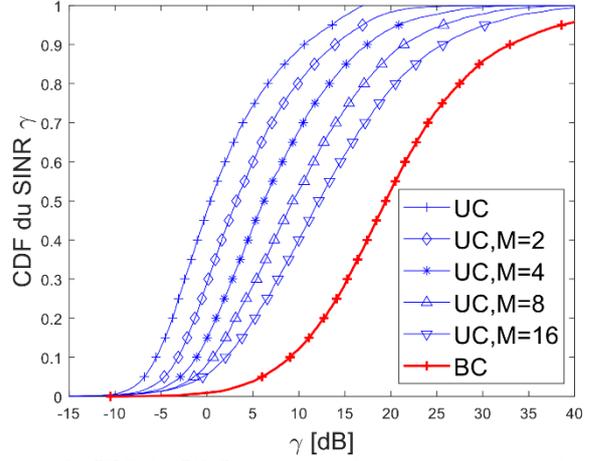
- $N_{BS}$  désigne le nombre de cellules participant à la transmission dans la zone SFN,
- $\delta_i$  est la fonction de poids dénotant le taux de la puissance reçue considéré comme utile (calculé selon [6] en fonction du délai de propagation dans la zone SFN).

## 4 Résultats de simulations et discussions

Dans cette section, des évaluations numériques sont réalisées pour une variété des conditions du système. La zone de service choisie est un carré de 400 km de côté, où nous localisons les BSs en suivant un PPP avec une certaine densité  $\lambda$ . Nous comparons dans cette section les performances des modes unicast et broadcast, en supposant que toutes les BSs émettent à la même puissance, sur la même fréquence porteuse ( $f_c = 2$  GHz) et sur la même largeur de bande du système ( $\omega = 5$  MHz). Les simulations sont effectuées dans les conditions de la norme 3GPP [13] ; nous considérons ainsi les paramètres suivants :  $\kappa = 0.0295$ ,  $\alpha = 3.76$ ,  $\sigma_{dB} = 10$  dB et  $P_N = -98$  dBm. Enfin, nous calculons la fonction de poids  $\delta_i$  avec une durée de symbole utile de 66,7  $\mu$ s et une durée d'intervalle de garde de 16,67  $\mu$ s.

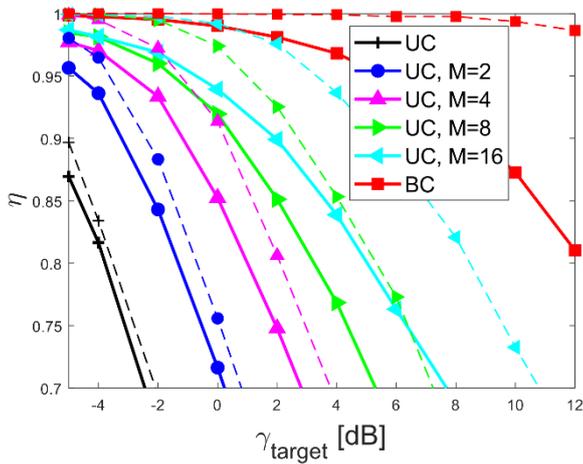
Nous nous intéressons dans un premier temps à analyser et à comparer le SINR du côté de l'utilisateur lorsque les BSs transmettent en mode unicast (avec et sans beamforming) et broadcast. Pour ce faire, nous générons  $10^4$  simulations de Monte Carlo où chacune correspond à une nouvelle distribution aléatoire des emplacements des BSs. Puis, nous calculons pour chaque simulation le SINR en mode unicast et broadcast. La figure 1 illustre le résultat de simulation du CDF (Fonction de distribution cumulative) du SINR en mode unicast (avec et sans beamforming) et broadcast, pour  $P_{tx} = 0.5$  W,  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup> et différentes valeurs de M. On peut clairement observer que l'emplacement des BSs a un impact significatif sur la qualité de la réception, ce qui est montré par la variation de SINR ( $\gamma$ ) entre -15 dB et 40 dB. On peut également observer que l'utilisation de beamforming apporte un large gain de performance en termes de SINR par rapport au mode unicast classique (à base d'une seule antenne par secteur). Ainsi, nous remarquons que la transmission en mode broadcast est plus efficace qu'en mode unicast, même en utilisant la technique de beamforming avec 16 antennes par secteur. Ce résultat montre clairement l'intérêt de la technique

MB-SFN pour réduire efficacement les interférences totales.



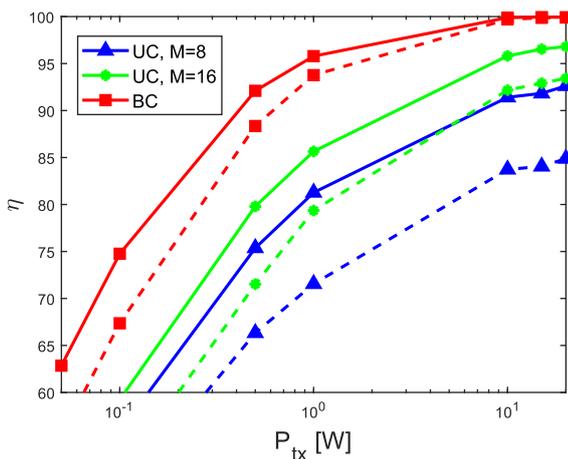
**Figure 1.** CDF du SINR pour un utilisateur servi en mode unicast (UC) et en mode broadcast (BC), avec  $P_{tx} = 0.5$  W et  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup>.

Nous nous intéressons maintenant à l'analyse de la probabilité de couverture  $\eta$  via les modes de transmission unicast (avec et sans beamforming) et broadcast, pour une variété de conditions du système. Notons que  $\eta$  correspond précisément à la fraction d'utilisateurs qui vont atteindre un SINR supérieur à une certaine valeur seuil  $\gamma_{target}$ . La figure 2 illustre la probabilité de couverture  $\eta$  en fonction de  $\gamma_{target}$  pour une puissance de transmission  $P_{tx} = 0.5$  W et pour deux valeurs de densité de BSs ( $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup> et 2 BS/km<sup>2</sup>). On remarque que  $\eta$  diminue lorsqu'on augmente  $\gamma_{target}$ . Plus précisément, il y a moins d'utilisateurs qui peuvent accéder au service en raison de l'augmentation des interférences. Cette figure montre que la transmission en mode unicast classique (sans beamforming) offre la plus faible couverture alors que le mode broadcast offre la meilleure couverture sur toute la gamme de  $\gamma_{target}$ . De plus, cette même figure montre que l'utilisation de beamforming apporte un large gain de couverture par rapport au mode unicast classique. Par exemple, pour  $\gamma_{target} = 2$  dB et  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup>, on peut obtenir une couverture de 75% pour M = 4, de 85% pour M = 8, ou même de 90% pour M = 16. Il est important de noter qu'en augmentant la densité de BSs de 0.5 BS/km<sup>2</sup> à 2 BS/km<sup>2</sup>, la probabilité de couverture s'améliore très légèrement en mode unicast classique (sans beamforming) en raison de l'augmentation des interférences dues à la présence d'un plus grand nombre de BSs dans la zone d'étude. Néanmoins, une amélioration significative de couverture est obtenue (en augmentant la densité de BSs) avec en particulier les deux solutions mises en œuvre : unicast avec beamforming et broadcast. Par exemple, comparons la couverture dans les deux cas avec  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup> et  $\lambda = 2$  BS/km<sup>2</sup> (avec  $\gamma_{target} = 2$  dB). On remarque que à  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup>, il est possible d'assurer une couverture de 90% (en mode unicast avec beamforming où M = 16) et de 98% (en mode broadcast). Ainsi, lorsqu'on augmente la densité à 2 BS/km<sup>2</sup>, on peut clairement observer l'amélioration de la probabilité de couverture où on atteint 94% (en mode unicast avec beamforming où M = 16) et 100% (en mode broadcast).



**Figure 2.** Probabilité de couverture en mode unicast (avec et sans beamforming) et broadcast en fonction de SINR target, pour une puissance de transmission  $P_{tx} = 0.5$  W et deux valeurs de densité de BS(s)  $\lambda = 0.5$  BS/km<sup>2</sup> (ligne continu) et 2 BS/km<sup>2</sup> (ligne discontinu).

Les résultats de la figure 2 sont liés à un niveau de puissance de transmission  $P_{tx} = 0.5$  W. La question du choix de  $P_{tx}$  et son impact sur la probabilité de couverture se pose. Nous étudions sur la Figure 3 la probabilité de couverture en faisant varier  $P_{tx}$  de 0.05 W à 10 W, pour  $\lambda = 0.25$  BS/km<sup>2</sup> et deux valeurs de SINR target  $\gamma_{target} = 2$  dB (ligne continu) et 4 dB (ligne discontinu). On peut remarquer de nouveau que la transmission broadcast affiche la meilleure couverture et cela quelle que soit la valeur de  $P_{tx}$ . On peut également tirer de ce résultat qu'il est possible de prédire la puissance  $P_{tx}$  nécessaire pour assurer une certaine probabilité de couverture. Par exemple, pour assurer une couverture de 90% en mode broadcast avec  $\lambda = 0.25$  BS/km<sup>2</sup> la puissance minimale nécessaire est de 0.4 W lorsque le SINR target est fixé à  $\gamma_{target} = 2$  dB.



**Figure 3.** Probabilité de couverture mode unicast (avec beamforming, pour  $M = 8$  et 16) et broadcast en fonction de la puissance de transmission des BSs, pour une densité de BSs  $\lambda = 0.25$  BS/km<sup>2</sup> et deux valeurs de SINR target  $\gamma_{target} = 2$  dB (ligne continu) et 4 dB (ligne discontinu).

## 5 Conclusion

L'optimisation de la probabilité de couverture est l'un des principaux enjeux des réseaux cellulaires et cela sera d'autant

plus vrai dans le contexte des réseaux 5G à forte densité de BSs. Ainsi, pour atteindre cet objectif, la gestion des interférences représente un défi majeur. Dans ce contexte, cet article se concentre sur une stratégie conjointe permettant de réduire les interférences d'une part et d'améliorer la qualité de signal reçu d'une autre part. Deux approches ont été mises en œuvre : l'approche de beamforming en mode unicast et la transmission synchronisée via la technique MB-SFN. Ainsi, la performance de la couverture en liaison descendante a été évaluée dans ces conditions, en considérant que les BSs sont distribuées suivant PPP au lieu du modèle de grille traditionnel. Dans toutes les conditions étudiées, on constate que le mode broadcast est plus performant que l'unicast en termes de probabilité de couverture, même en utilisant la technique de beamforming avec 16 antennes et cela est valable quel que soit la densité de BSs et la puissance de transmission des BSs.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet collaboratif français "Covera5Ge" soutenu par la DGA et dont les partenaires sont CentraleSupélec, ENENSYS Technologies et Siradel.

## Références

- [1] Chen, J., Ge, X. and Ni, Q., 2019. Coverage and handoff analysis of 5G fractal small cell networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(2), pp.1263-1276.
- [2] He, A., Wang, L., et al., 2015. Massive MIMO in K-tier heterogeneous cellular networks: Coverage and rate. In *2015 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM)*, pp. 1-6.
- [3] Ouamri, M.A., Azni, M. and Oteşteanu, M.E., 2021. Coverage analysis in two-tier 5G Hetnet based on stochastic geometry with interference coordination strategy. *Wireless Personal Communications*, 121(4), pp.3213-3222.
- [4] Wang, X., Turgut, E. and Gursoy, M.C., 2019. Coverage in downlink heterogeneous mmWave cellular networks with user-centric small cell deployment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), pp.3513-3533.
- [5] Liu, L., Zhou, Y., et al., 2018. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference-aware CoMP. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(1), pp.503-517.
- [6] Ligeti, A., 1999. Coverage probability estimation in single frequency networks in presence of correlated useful and interfering components. *IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324)*, vol. 4, pp. 2408-2412.
- [7] Papazafeiropoulos, A., Kourtessis, P., et al. 2020. Performance analysis of cell-free massive MIMO systems: A stochastic geometry approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4), pp.3523-3537.
- [8] Chen, J., Bin, F., Ge, X., Li, Q. and Wang, C.X., 2017. A dual-directional path-loss model in 5G wireless fractal small cell networks. In *2017 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)*, pp. 1-6.
- [9] Liu, W., Li, L., et al., 2021. Joint interference alignment and probabilistic caching in MIMO small-cell networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(9), pp.9400-9407.
- [10] Garcia, V., Lebedev, N. and Gorce, J.M., 2011. Capacity outage probability for multi-cell processing under Rayleigh fading. *IEEE Communications Letters*, 15(8), pp.801-803.
- [11] Vu, T.T., Decreusefond, L. and Martins, P., 2014. An analytical model for evaluating outage and handover probability of cellular wireless networks. *Wireless personal communications*, 74(4), pp.1117-1127
- [12] Garro, E., Fuentes, et al. 2020. 5G mixed mode: NR multicast-broadcast services. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 66(2), pp.390-403.
- [13] 3GPP, 2018. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); RF system scenarios. TR 36.942. Version 15.0.0.