

Modélisation de la probabilité de couverture et de l'efficacité énergétique d'un réseau 5G HetNet

Randriamiadana Z.A¹, Randriamitantsoa P. A², Randriamitantsoa A. A.³

Laboratoire de Recherche Télécommunication, Automatique, Signal et Images (LR-TASI)

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII)

Équipe d'Accueil Doctorale Télécommunication, Automatique, Signal et Images (EAD-TASI)

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

¹ aarlovah@yahoo.fr, ² rpauguste@gmail.com, ³ andriau23@gmail.com

Résumé

La 5G est la prochaine génération de réseaux de téléphonie mobile. Elle viendra compléter la 4G, et à terme elle remplacera la 2G, 3G mais aussi la 4G. La 5G sera naturellement disponible sur nos smartphones, mais elle profitera également aux objets connectés, à l'automobile ainsi qu'aux réseaux domestiques. A l'image des premières box 4G, comme Bouygues Telecom et Orange, la 5G sera proposée pour notre réseau fixe. La 5G répond ainsi à plusieurs problématiques : l'augmentation des débits, nécessaire pour les nouveaux usages numériques, la réduction de la latence mais aussi la densification du réseau. La 5G aura donc une capacité supérieure à la 4G, ce qui sera particulièrement utile pour les zones denses comme les centres villes, les aéroports, les campus universitaires ou encore les stades.

Abstract

5G is the next generation of cell phone networks. It will complement 4G, and will eventually replace 2G, 3G but also 4G. 5G will of course be available on our smartphones, but it will also benefit connected objects, the automobile and home networks. Like the first 4G boxes, such as Bouygues Telecom and Orange, 5G will be offered for our fixed network. 5G thus responds to several issues: the increase in speeds, necessary for new digital uses, the reduction of latency but also the densification of the network. 5G will therefore have a higher capacity than 4G, which will be particularly useful for dense areas such as city centers, airports, university campuses or stadiums.

Keywords: 5G, HetNet, QoS, Small Cells

Mot clés : 5G, HetNet, QoS, petites cellules

1. Technique de densification de réseau

1.1. Modèle du système

Soit un réseau HetNet, à deux niveaux, composé de $c_m \in C_m$ cellules macro et de $c_f \in C_f$ cellules femto, illustré par la figure 1.42. Le cellule femto est un type de cellule dont les zones de couverture sont surtout les intérieurs, ou indoor, des bâtiments ou immeubles.

La Figure 1 et le Tableau 1 représentent, respectivement l'architecture de réseau HetNet et les différences entre les types de station de base (SB).

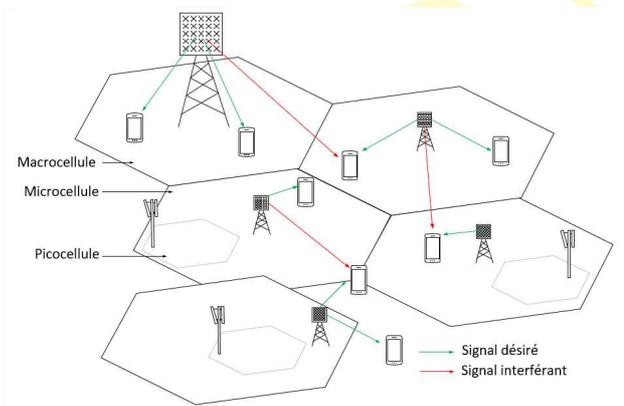


Figure 1 : Illustration d'un réseau HetNet

Tableau 1 : Différence entre les types de SB

Station de base (SB)	Puissance de transmission	Couverture
Macro	46 dBm	Quelques kilomètres
Pico et Micro	23-30 dBm	< 300m
Femto	< 23 dBm	< 50m
Relais	30 dBm	300m

Les stations de base macro-cellulaire SB_m , équipées de N_{tm} antennes, sont positionnées au centre de chaque cellule macro et offrent des services dans une région géographique, notée M , définie par un disque circulaire de rayon R_m et de surface $|M| = \pi R_m^2$.

Chaque station de base femto-cellulaire est équipée de N_{tf} antennes et tous les utilisateurs dans le réseau cellulaire sont équipés d'une seule antenne. Pour un intervalle de temps/fréquence donné, chaque cellule macro et chaque cellule femto utilise leurs antennes pour servir respectivement les U_m et les U_f utilisateurs, à condition que :

$$1 \leq U_m \leq N_{tm} \quad (1)$$

et que

$$1 \leq U_f \leq N_{tf}. \quad (2)$$

Et que tous les utilisateurs U_f se trouvent tous à l'intérieur des bâtiments.

Quand le processus de planification des services est en cours, les utilisateurs à servir sont sélectionnés dans un ensemble d'utilisateurs actifs U_{ma} et U_{fa} de chaque cellule macro et femto, et d'un ensemble d'utilisateurs U_m et U_f , respectivement des cellules macro et femto [1]. A savoir que chaque utilisateur peut subir le phénomène d'interférence inter-cellulaire.

1.2. Modèle du canal de transmission

Le canal de transmission correspondant au signal désiré, d'une station de base de la cellule S_{m0} vers l'utilisateur $u \in \{0, 1, \dots, U_m - 1\}$ est noté par :

$$h_u \in \mathbb{C}^{N_{tm} \times 1} \quad (3)$$

La direction de tous les vecteurs du canal est représentée par :

$$\tilde{h}_u \triangleq \frac{h_u}{\|h_u\|} \quad (4)$$

Et la matrice \tilde{H} du canal, de taille $U_m \times N_{tm}$ est donné par :

$$\tilde{H} = [\tilde{h}_0, \tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_{U_m - 1}]^H \quad (5)$$

L'interférence entre canal du $u^{i\text{ème}}$ utilisateur et de la $S_f^{i\text{ème}}$ station de base est :

$$g_{u,s,m} \in \mathbb{C}^{N_{tm} \times U_m} \quad (6)$$

Et dans le cas où un seul utilisateur est servi :

$$U_m = N_{tm} = 1 \quad (7)$$

Les canaux correspondant à l'utilisateur U_{m0} est noté par h_0 , $g_{i,f}$ et $g_{i,m}$, qui représentent respectivement le canal désiré entre la station de base S_{m0} et l'utilisateur u_0 , le canal d'interférence entre le $u^{i\text{ème}}$ utilisateur et le $i^{i\text{ème}}$ station de base femto, et enfin le canal d'interférence entre le $u^{i\text{ème}}$ utilisateur et le $i^{i\text{ème}}$ station de base macro.

Soit $S \in \mathbb{C}^{N_{tm} \times U_m} = s_u |_{1 \leq u \leq U_m}$ la matrice de précodage de la station de base S_{m0} et $F_i \in \mathbb{C}^{N_{tf} \times U_f} = [f_{u,i}] |_{1 \leq u \leq U_f}$ la matrice de précodage de la

station de base femto F_i pour servir $1 \leq U_f \leq S_{m0}$ utilisateurs. La puissance du signal transmis s'affaiblit à cause de divers effets liés à la propagation.

2. Estimation de la couverture de réseau dans une architecture HetNet

Dans le cas de l'utilisation de la précodage ZF et pour le cas d'une transmission de signal, la matrice de précodage M est choisie comme étant la colonne normalisée de la pseudo-inverse $\tilde{M}^H (\tilde{M} \tilde{M}^H)^{-1} \in \mathbb{C}^{N_{tm} \times U_m}$.

Similairement, au niveau des femtocellules, les colonnes de la matrice de précodage F_i est égale aux colonnes normalisées de $F_i^H (\tilde{M} \tilde{M}^H)^{-1} \in \mathbb{C}^{N_{tm} \times U_m}$, où la direction de canal entre la station de base F_i vers ces utilisateurs est représentée par $\tilde{f}_j^H = [\tilde{f}_{0,j}, \tilde{f}_{1,j}, \dots, \tilde{f}_{U_f-1,j}]$.

2.1. Estimation de la couverture de réseau dans les petites cellules

Soit la cellule femto de référence F_0 située à une distance D de la macrocellule de référence B_0 .

Durant un intervalle de signal donné, le signal reçu par l'utilisateur u_0 situé au niveau de la cellule femto, à une distance maximale d_{\max} de la station de base F_0 est donné par [2] :

$$y_{u_0} = \underbrace{\sqrt{\frac{P_f}{U_f}} d_{\max}^{-\frac{\alpha_f}{2}} f_0^H F_0 X_{0,f}}_a \quad (8)$$

$$+ \underbrace{\sqrt{\frac{P_f}{U_f}} \sum_{F_i \in \Pi_{F_0}} |X_{0,i}|^{-\frac{\alpha_f}{2}} f_{i,f}^H F_i X_{i,f}}_b$$

$$+ \underbrace{\sqrt{\frac{P_m}{U_f}} D^{-\frac{\alpha_m}{2}} f_{0,m}^H S X_0 + n}_c$$

Avec a représentant le signal désiré

b représentant l'interférence inter-cellulaire

c représentant l'interférence entre les cellules

$x_0 \in \mathbb{C}^{U_m \times 1}$ et $x_{i,f} \in \mathbb{C}^{U_f \times 1}$ représentant les symboles de données normalisées transmises pour l'utilisateur de la cellule macro M_0 vers l'utilisateur u_0

$X_{0,i}$ représentant l'emplacement de la $i^{\text{ème}}$ femto-cellule

En négligeant le bruit, le rapport signal sur interférence reçu, pour l'utilisateur u_0 est donné par :

SIR_f

$$= \frac{\frac{P_f}{U_f} d_{\max}^{-\frac{\alpha_f}{2}} |F_0 X_{0,0}|^2}{\frac{P_m}{U_m} D^{-\alpha_m} \|f_{0,m}^H F\|^2 + \frac{P_m}{U_m} \sum_{F_i \in \Pi_{F_0}} \|f_{i,f}^H M_i\|^2 |X_{0,i}|^2}$$

L'utilisateur u_0 peut décoder le signal à partir du SIR_f qui est au moins égal à son SIR_T désiré.

Posons :

$$P_f = \frac{P_m}{P_f} D^{-\alpha_m} \quad (9)$$

Et

$$Q_f = d_{\max}^{\alpha_f} U_f \quad (10)$$

Et soit :

$$\kappa = \frac{P_f Q_f T}{U_f} \quad (11)$$

$\frac{\kappa}{\kappa+1} \in [0,1]$ caractérise la puissance relative de l'interférence de la cellule.

Et il est à savoir que :

- Au fur et à mesure que κ augmente, $\frac{\kappa}{\kappa+1}$ augmente, et l'utilisateur u_0 subit progressivement une faible couverture à cause de l'augmentation de l'interférence cellulaire.
- Inversement, quand la valeur de $\kappa \rightarrow \infty$, le rapport signal sur interférence SIR_f est limité par l'interférence venant des cellules femto voisines.
- A cause de l'interférence entre cellules, aucun utilisateur avec une distance de $D \leq D_f$ mètres de la station de base M_0 ne peut satisfaire la qualité de service (QoS) requise.
- Au fur et à mesure que $D > D_f$, un utilisateur dans la cellule femto peut tolérer l'interférence venant des transmissions des deux cellules et de la transmission des points d'accès. Le rayon de la cellule femto non couvert est estimé par la suite.

Aucune station de base de la cellule femto F_0 , avec $D \leq D_f$ mètres de la station de base macro M_0 ne peut satisfaire la qualité de service requise ϵ , tel que :

$$D_f = \left[\frac{\frac{d_{\max}^{-\alpha} P_f U_f}{T \frac{P_f}{U_f}}}{\left(\frac{\mathcal{J}^{-1}(\epsilon; N_{sm} - U_{tf} + 1, U_m)}{1 - \mathcal{J}^{-1}(\epsilon; N_{tf} - U_f + 1, U_m)} \right)} \right]^{\frac{1}{\alpha_m}} \quad (12)$$

Telle que la fonction inverse $\mathcal{J}^{-1}(y; a, b) \triangleq x$ est définie comme la valeur de x pour que $\mathcal{J}_x(a, b) = y$, avec $\mathcal{J}_x(a, b)$ représentant la fonction beta incomplète régularisée.

La propriété de couverture, pour un utilisateur, en présence d'une interférence entre les macrocellule et une interférence intra-cellulaire au niveau des petites cellules est donnée par :

$$P_{\text{couv},f}(\lambda_f, \lambda_m, T) \quad (13)$$

$$= \sum_{u=0}^{N_{tf}-U_f} \frac{(Q_f T)^k}{k!} \sum_{j=0}^u \binom{u}{j} \frac{d^j}{d\theta^j} \left(1 + \frac{\mathcal{P}_f \theta^{-U_m}}{K_m} \frac{d^{(u-j)}}{d\theta^{(u-j)}} e^{-\lambda_f C_f \theta^{\delta_f}} \right)$$

$$\text{Avec } \delta_f = \frac{2}{\alpha_f}$$

$$\theta = Q_f T$$

$$C_f = \pi \delta_f U_f^{-\delta_f} \sum_u^{U_f-1} \binom{U_f}{u} B(u + \delta_f, U_f - u - \delta_f) \quad (14)$$

$$\text{Avec } B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \text{ est la fonction beta d'Euler}$$

A partir de l'expression de la probabilité de couverture, on peut déduire la valeur de réutilisation maximale de la réutilisation de l'espace à partir des antennes massives MIMO utilisées par les cellules

femto quand elles partagent le spectre avec une cellule de transmission.

La densité maximale de contention des femtocellules satisfaisant à la contrainte de qualité de service est exprimée et donnée par :

$$\mathcal{D}_f^*(D) = \arg \max \lambda_f(D) \quad (15)$$

Sous la condition que :

$$\mathbb{P}(\text{SIR}_f \geq T) \geq 1 - \epsilon \quad (16)$$

Dans le cas d'une cellule macro, la densité maximale de contention $\mathcal{D}_m^*(D)$ à une distance D de la cellule macro M_0 , qui vérifie l'équation (15) est donné par :

$$\mathcal{D}_f^*(D) \quad (17)$$

$$= \frac{1}{C_f (Q_f T)^{\delta_f}} \left[\frac{\epsilon - \mathcal{J}_{\frac{\kappa}{\kappa+1}}(N_{tf} - U_f + 1, U_m)}{\mathcal{G}_f - \mathcal{J}_{\frac{\kappa}{\kappa+1}}(N_{tf} - U_f + 1, U_m)} \right]$$

A noter que n'importe où dans le réseau, pour $U_f = N_{tf}$, on a $\mathcal{G}_f = 1$

2.2. Estimation de la couverture de réseau dans les petites cellules

Le signal reçu par l'utilisateur u_0 , situé à une distance D de la cellule macro, est donné par :

$$y_{u_0} \quad (18)$$

$$= \sqrt{\frac{P_m}{U_m}} D^{-\frac{\alpha_m}{2}} h_0^H S x_0$$

$$+ \sqrt{\frac{P_f}{U_f}} \sum_{F_i \in \Pi_f} g_{i,f}^H F_i |X_{0,i}|^{-\frac{\alpha_f}{2}} x_{i,f} + n$$

Avec $|X_{0,i}|$ représentant la distance entre la cellule femtocell F_i interférant à l'utilisateur u_{m0}
 En ignorant l'existence du bruit, la probabilité de couverture de l'utilisateur mobile u_{m0} est donné par :

$$P_{\text{couverture},m} = \mathbb{P}[\text{SIR}_m \geq T] \quad (19)$$

$$= \mathbb{P} \left[\frac{|h_0^H f_u|^2}{\frac{1}{U_f} \sum_{F_i \in \Pi_f} \|g_{0,i}^H F_i\|^2 |X_{0,i}|^{-\alpha_f}} \geq Q_f T \right]$$

Avec $Q_f = U_m \frac{P_f}{P_m} D^{\alpha_m}$

La densité maximale de contention $D_f^*(D)$ avec laquelle l'équation (18) satisfait la probabilité contrainte de coupure $\mathbb{P}(\text{SIR}_c \geq T) \geq 1 - \epsilon$ d'un utilisateur situé dans une cellule, est donné par :

$$D_f^*(D) = \frac{\epsilon G_m}{C_f (Q_f T)^{\delta_f}} \quad (20)$$

Avec :

$$G_m = \left[1 + \sum_{j=1}^{N_{tm} - U_m} \frac{1}{j!} \prod_{u=0}^{j-1} (k - \delta_f) \right]^{-1} \quad (21)$$

A noter que G_m peut-être limité à :

$$\begin{aligned} (N_{tm} - U_m + 1)^{\delta_f} &\leq G_m & (22) \\ &\leq \Gamma(1 \\ &\quad - \delta_f)(N_{tm} - U_m + 1)^{\delta_f} \end{aligned}$$

Avec $\Gamma(a, b)$ la fonction gamma d'Euler

Et le rayon de couverture de la cellule est donné par :

$$R_m = \left(\frac{P_m}{TU_m P_f} \right)^{\frac{1}{\alpha_m}} \left(\frac{\epsilon G_m}{\lambda_f C_f} \right)^{\frac{1}{\delta_f \alpha_m}} \quad (23)$$

Et comme le rayon de couverture R_m varie en fonction de $\left(\frac{P_m}{P_f} \right)^{\frac{1}{\alpha_m}}$, pour augmenter le rayon de la cellule par un facteur de k nécessite l'augmentation de P_m par $10 \alpha_m \log_{10} k$ décibels relatifs à P_f .

3. Estimation du débit de transmission

3.1. Débit de transmission dans les cellules macro

3.1.1 Débit en voie montante

La puissance totale d'interférence venant en provenance des cellules femto vers la station de base de la cellule macro, pour une transmission liaison montante, est donné par :

$$\begin{aligned} I_m^{DL} & \quad (24) \\ &= \sum_{c_f \in C_f} \min \left\{ \frac{\kappa}{g(c_f, 0)}, P_1 \right\} g(c_f, 0) H(c_f, 0) \\ &\leq \kappa \sum_{c_f \in C_f} H(c_f, 0) \end{aligned}$$

Avec C_f l'ensemble des femtocellules

c_f l'indice représentant une femtocellule

P_1 une valeur fixe du seuil maximal de puissance

κ valeur de puissance à atteindre

$H(.)$ le coefficient de puissance à évanouissement lent

$g(.)$ La distance entre canaux

Soit un codage aléatoire Gaussien, le débit instantané pour un utilisateur u_m au niveau de la macrocellule, en considérant que l'utilisateur u_m figure dans la liste des programmés des utilisateurs à servir, est donné par :

$$D_{u_m} = \log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)}{1 + I_m^{UL}} \right) \quad (25)$$

La statistique de la variable aléatoire \mathcal{H} dépend de l'algorithme d'allocation de ressource (ordonnement) utilisé par le macrocellule, pour la transmission en liaison montante (UL). Dans le cas de l'algorithme Round-Robin, on a :

$$\mathcal{H} = H(u_f, 0) \quad (26)$$

Dans le cas d'un algorithme d'ordonnement équitable (PFS), on a :

$$\mathcal{H} = \max\{H(m, 0)\} \quad m \in \mathcal{M} \quad (27)$$

Avec \mathcal{M} l'ensemble des positions des stations mobiles macrocellulaires

Dans les deux types d'algorithme, la statistique de \mathcal{H} est indépendante de l'indice u_m de l'utilisateur. Par conséquent, on peut dire que le débit, donné par l'équation (25), dépend seulement de u_m à partir de l'emplacement dépendant du coefficient de gain de trajet $g(u_m, 0)$.

Comme chaque utilisateur est servi pour une fraction $\frac{1}{U_m}$ de la tranche, en l'additionnant à toutes les populations de la macrocellule, on obtient la valeur du débit total moyen, en liaison montante, donnée par :

$$D_{u_m}^{UL} = \frac{1}{U_m} \sum_{u_m \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)P_0}{1 + I_m^{UL}} \right) \right] \quad (28)$$

Et la limite inférieure du débit est donnée par :

$$\nabla D_{u_m}^{UL} = \frac{1}{U_m} \sum_{u_m \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)P_0}{1 + I_m^{UL}} \right) \right] \quad (29)$$

3.1.2 Débit en voie descendante

Dans le cas d'une liaison descendante, la puissance totale de l'interférence venant de toutes les cellules femto vers la station de base macro cellulaire se trouvant dans u_m est donnée par :

$$\begin{aligned} I_m^{DL} & \quad (30) \\ &= \sum_{c_s \in C_s} \min \left\{ \frac{\kappa}{g(c_s, u_f)}, P_1 \right\} g(c_s, u_f) H(c_s, u_f) \\ &\leq \kappa \sum_{c_s \in C_s} H(c_s, u_f) \end{aligned}$$

Ce qui veut dire que le débit instantané pour un utilisateur u_m , d'une cellule macro alloué en liaison descendante, est donné par :

$$D_{u_m} = \log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)P_0}{1 + I_m^{DL}} \right) \quad (31)$$

Telle que la statistique de \mathcal{H} dépend de l'algorithme utilisé.

En additionnant le long de toute la population des utilisateurs macro cellulaires, le débit total moyen, en liaison descendante, dans une cellule macro, est donné par :

$$D_{u_m}^{DL} = \frac{1}{U} \sum_{u_m \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)P_0}{1 + I_m^{DL}} \right) \right] \quad (32)$$

Et la limite inférieure du débit est donné par :

$$\nabla D_{u_m}^{DL} = \frac{1}{U_m} \sum_{u_m \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \mathcal{H} \frac{g(u_m, 0)P_0}{1 + I_m^{DL}} \right) \right] \quad (33)$$

3.1.1. Débit de transmission dans les cellules micro

3.2.1 Débit en voie montante

Le niveau d'interférence entre différents niveaux de cellule femto, interférence femto-femto, pour une communication en liaison montante de l'utilisateur u_f , est donné par :

$$\begin{aligned} I_f^{UL} &= \sum_{c'_f \in C_s: c'_f \neq c_f} \min \left\{ \frac{\kappa}{g(c'_f, 0)}, P_1 \right\} g(c_f, c'_f) H(c_f, c'_f) \\ &\leq \kappa \sum_{c'_f \in C_s: c'_f \neq c_f} \frac{g(c'_f, c_f)}{g(c'_f, 0)} H(c_f, c'_f) \end{aligned} \quad (34)$$

En plus, la cellule femto c_f reçoit les interférences venant de l'utilisateur u_m d'une cellule macro, en liaison montante.

En tenant compte du fait que les utilisateurs d'une cellule macro, sont ordonnancés, pour une même fraction de temps, la somme des débits d'une cellule femto, se trouvant dans une cellule macro, pour une liaison montante, est donnée par :

$$\begin{aligned} D_{u_f}^{UL} &= \sum_{c_f \in C_f} \frac{1}{U_m} \sum_{u_f \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \frac{\min \left\{ \frac{\kappa}{g(c_f, 0)}, P_1 \right\}}{1 + I_f^{UL} + g(c_f, u_f)H(c_f, u_f)P_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

Notant que, dans ce cas, d'une manière indépendante de l'ordonnancement de l'utilisateur u_m d'une cellule macro, en liaison montante, les cellules femto se trouvant à une distance proche de la station de base macro cellulaire sont forcées d'utiliser une faible puissance de transmission P_1 , c'est-à-dire :

$$P_1 \gg \frac{\kappa}{g(c_f, 0)} \quad (36)$$

Ceci, dans le but de garantir un niveau d'interférence κ , vers la station de base. Par conséquent, le débit de cette cellule, pour une tranche de liaison montante dans une cellule macro, peut être très faible, dépendant de la perte de support w .

3.2.2 Débit en voie descendante

L'interférence intra-cellulaire, pour une cellule femto c_f , dans le cas d'une communication en voie descendante, dépend de l'ordonnement de l'utilisateur u_m d'une cellule macro, et est donnée par :

$$I_f^{DL}(u_m) = \quad (37)$$

$$\sum_{c'_f \in C_s: c'_f \neq c_f} \min \left\{ \frac{\kappa}{g(c'_f, u_m)}, P_1 \right\} g(c'_f, c_f) H(c_f, c'_f) \\ \leq \kappa \sum_{c'_f \in C_s: c'_f \neq c_f} \frac{g(c_f, c'_f)}{g(c'_f, u_m)} H(c_f, c'_f) \quad (38)$$

En plus, la cellule femto c_f subit des interférences venant de la station de base macro. Sur ce, le débit total dans une cellule femto, pour la communication en liaison descendante, est donné par :

$$D_{u_f}^{DL} \quad (39)$$

$$= \sum_{c_f \in C_s} \frac{1}{u_m} \sum_{u_m \in U_m} \mathbb{E} \left[\log \left(1 + \frac{\min \left\{ \frac{\kappa}{g(c_f, u_m)}, P_1 \right\} g(c_f, 0) H(c_f, 0) P_0}{1 + I_f^{DL}(u_m) + g(c_f, 0) H(c_f, 0) P_0} \right) \right] T_c = \frac{L}{l} \quad (40)$$

On peut remarquer que la puissance de transmission d'une cellule femto c_f dépend de l'utilisateur u_m , d'une cellule macro alloué, pour une liaison descendante. Comme les utilisateurs dans les cellules macro, sont alloués d'une fraction de temps égale, le

temps pour $\frac{\kappa}{g(c_f, u_m)}$ est inférieur au pic de la puissance de transmission P_1 qui est égal à la fraction de l'utilisateur u_m d'une macrocellule de façon à ce que $g(c_f, u_m) > \frac{\kappa}{P_1}$.

Pour chaque cellule femto c_f et pour un ensemble donné des emplacements des utilisateurs macro cellulaires U_m , on peut définir la probabilité avec laquelle le femtocell c_f est obligé de réduire sa puissance de transmission en utilisant une règle de contrôle de puissance.

4. Estimation de la vitesse de transmission de données dans un réseau HetNet

4.1 Temps de communication requis

Soit $T_c(L, X, V)$, la durée de transmission requis pour transmettre un paquet de données de taille L bytes, à un utilisateur situé à une position X de la cellule. Et V la vitesse de transmission de la station mobile.

Si l'utilisateur a la possibilité de communiquer avec un débit de communication fixe de l bytes/sec, le temps de communication est donné par :

$$T_c = \frac{L}{l} \quad (40)$$

Et le débit maximal qu'un utilisateur peut utiliser pour communiquer avec la station de base SB, d'une cellule $c_s \in C_s$, est donné par :

$$\begin{aligned}
D(X; c_s) &:= 1 \left\{ \left| X - \left(c_s L - \frac{L_c}{2} \right) \right| \leq d_0 \right\} \\
&+ 1 \left\{ \left| X - \left(c_s L_c - \frac{L_c}{2} \right) \right| \right. \\
&> d_0 \left. \right\} d_0^\beta \left| X \right. \\
&\left. - \left(c_s L_c - \frac{L_c}{2} \right) \right|^{-\beta}
\end{aligned} \quad (41)$$

Avec $\beta \geq 1$ représentant le facteur de la perte de trajet

d_0 représentant une petite distance jusqu'à laquelle il n'y a pas de perte de propagation

L_c représentant la longueur de la cellule

La distance d_0 est minimum, si l'utilisateur est situé sur la frontière d'une cellule, et augmente au fur et à mesure que l'utilisateur s'éloigne du centre de la cellule. L'emplacement des utilisateurs, en service, varie selon l'équation (41), c'est-à-dire :

$$X(t) = X + Vt \quad (42)$$

A un moment t , et si l'utilisateur se trouve dans une cellule c_s , c'est-à-dire :

$$X(t) \in [(c_s - 1)L_c, M] \quad (43)$$

Alors, il communique avec la station de base de la $c_s^{\text{ième}}$ cellule. Par conséquent, l'utilisateur reçoit des services, de la station de base, avec un débit de communication variant en fonction du temps t , qui est donné par :

$$\begin{aligned}
D(t; X, V) &:= P \bar{D}(X(t); c_s) \quad \text{si } t \\
&\in \left[\frac{(c_s - 1)L_c - X}{V}, \frac{c_s L_c - X}{V} \right]
\end{aligned} \quad (44)$$

Nous considérons maintenant le cas d'un utilisateur, dont la communication a commencé dans la première cellule c_s^1 , c'est-à-dire que $X \in [0, L_c]$.

Le temps nécessaire T_c pour transférer L bytes d'information, doit vérifier l'équation :

$$L = \int_0^{T_c} D(t; X, V) dt \quad (45)$$

Soit $g(l)$ le nombre de bytes transféré quand le mobile traverse un intervalle de $[0, l_c]$, tel que :

$$g(l_c) := \int_0^{l_c} P \bar{D}(Vt; 1) dt \quad (46)$$

$$g(l_c) = P \int_0^{l_c} \bar{D}(l_c'; l_c) \frac{dl_c'}{V} \quad (47)$$

On suppose que $L_c > 2d_0$, c'est-à-dire que la taille optimale d'une cellule doit être supérieure à $2d_0$.

Alors, on a :

$$\begin{aligned}
g(L_c) &= \frac{P d_0^\beta}{V} \int_0^{\frac{L_c}{2-d_0}} \left(\frac{L_c}{2} - l_c \right)^{-\beta} dl_c \\
&+ \frac{P d_0^\beta}{V} \int_{\frac{L_c}{2+d_0}}^{L_c} \left(l_c \right. \\
&\left. - \frac{L_c}{2} \right)^{-\beta} dl_c + \frac{2P d_0}{V}
\end{aligned} \quad (48)$$

Pour toute petite cellule c_s , le nombre de bytes transmis quand l'utilisateur traverse le $c_s^{\text{ième}}$ cellule est donné, en posant $l_c = X + Vt - (c_s - 1)L$, on aura :

$$g(L_c) = \int_{\frac{(c_s-1)L_c-X}{V}}^{\frac{c_s L_c-X}{V}} D(t; X, V) dt \quad (49)$$

$$= \int_{\frac{(c_s-1)L_c-X}{V}}^{\frac{c_s L_c-X}{V}} P \bar{D}(X + Vt; c_s) dt \quad (50)$$

$$g(L_c) = \frac{P}{V} \int_0^{L_c} \bar{D}(l_c; 1) dl \quad (51)$$

Par conséquent, la transmission de données devient indépendante de c_s .

Posons maintenant SBc la migration d'une station de base à une autre et supposant que l_n bytes de données seront dédiés à la station de base SBc, en ne tenant pas compte de la cellule dans laquelle se situe l'utilisateur, mais en considérant que $g(L_c) - l_n$ bytes de données seront transmis, à partir de la station de base micro-cellulaire, pour une journée, alors, le temps requis pour la transmission de données, est divisés en trois catégories :

- Le temps pris au niveau de la cellule initiale, donné par :

$$C_i = (L_c - X)/V \quad (52)$$

- Le temps pris pour traverser complètement C cellules, donné par :

$$C = C(L, X, V) := \left\lceil \frac{(L - (g(L) - g(X)))}{g(L) - l_n} \right\rceil \quad (53)$$

- Le temps pris dans la cellule, incluant la fin de l'appel, c'est-à-dire le temps nécessaire pour communiquer les L_r bytes restantes, tel que :

$$L_r = L - (g(L_c) - g(X)) - C(g(L_c) - l_n) \quad (54)$$

En plus, on peut prendre un appel si, le nombre de bytes $g(L_c)$ transférable, en changeant de cellule, est plus grand que le nombre de bytes l_n requis par la station de base.

A partir de l'équation (54), le temps nécessaire pour communiquer L bytes de données, est donné par :

$$T_c(L, X, V) = \begin{cases} \frac{1}{V} \arg \inf_{l_c \in [X, L_c]} \{ (g(l_c) - g(X)) \geq L \\ \infty \end{cases} \quad (55)$$

$$\left\{ \frac{L_c - X}{V} + C \frac{L_c}{V} + \frac{1}{V} \arg \inf_{l_c \in [X, L_c]} \{ (g(l_c) - l \right.$$

On peut voir que g est une fonction continue et monotoniquement croissante, alors g^{-1} existe.

Donc l'équation (55) devient :

$$T_c(L, X, V) \quad (56)$$

$$= \begin{cases} \frac{g^{-1}(L + g(X); V) - X}{V} & \text{si } L \\ \infty \\ \frac{(L_c - X) + CL_c + g^{-1}(L_r + l_n; V)}{V} \end{cases}$$

Avec :

$$g^{-1}(l; v) = \quad (57)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_c}{2} (1 - e^{-\frac{lv}{Pd_0}}) \\ \frac{L_c}{2} + \frac{2d_0^2 e^{-2} \frac{lv}{Pd_0}}{L_c} \\ \frac{L_c}{2} + \frac{lv}{P} - d_0 \log\left(\frac{L_c}{2d_0}\right) - d_0 \\ \frac{L_c}{2} - \left(\frac{lv(\beta-1)}{Pd_0^\beta} + \left(\frac{L_c}{2}\right)^{-\beta+1}\right)^{\beta-1} \\ \frac{L_c}{2} + \left(\frac{2\beta d_0^{-\beta+1}}{\beta-1} - \frac{lv(\beta-1)}{Pd_0^\beta} - \left(\frac{L_c}{2}\right)^{-\beta+1}\right)^{\beta-1} \\ \frac{L_c}{2} + \frac{d_0^\beta}{\beta-1} \left(\frac{lv(\beta-1)}{Pd_0^\beta} + \left(\frac{L_c}{2}\right)^{-\beta+1} - d_0^{-\beta+1} \beta\right) \end{array} \right.$$

Dans les réseaux micro-cellulaires, un utilisateur traverse un grand nombre de petites cellules en recevant des services. Alors, le temps de communication peut être estimé comme étant le produit du nombre de cellules C_s par le temps pris pour traverser chaque cellule c_{si} , $i = [1..C_s]$. C'est-à-dire que :

$$T_c(L, X, V) \approx C_s \times c_s \quad (58)$$

$$T_c(L, X, V) \approx \frac{L}{(g(L_c) - L_r)} \quad (59)$$

$$\times \frac{L_c}{V} \quad \text{quand } g(L) > L_r$$

4.2. Vitesse maximale de déplacement supportée par le système

Le temps de communication, T_c , se termine seulement lorsque le nombre de bytes $g(L_c)$ transféré par cellule est strictement plus grand que le

nombre de bytes l_n requis par la station de base. Le système ne peut pas supporter une vitesse pour laquelle le temps de communication est infini [3].

Le temps de communication est fini, avec une probabilité 1, si et seulement si :

$$\Pr(l_n > g(L_c)) = P_{n,v}(Vl_n > \eta(L_c)) = 0 \quad (60)$$

Avec $\eta(L_c) := Vg(L_c)$

A noter que η est seulement une fonction de P et L . Par conséquent, cette probabilité dépend seulement de la vitesse V , de la taille de la cellule L_c et de la puissance de transmission P . A cause de l'atténuation de trajet, pour n'importe quelle valeur fixe de P , $\eta(L_c)$ augmente en fonction de L_c pour être saturé, c'est-à-dire pour $\beta > 1$.

Alors, pour tout L_c , quand $\beta > 1$, on a :

$$\eta(L_c) \leq \eta_\infty := \lim_{L_c \rightarrow \infty} \eta(L_c) < \infty \quad (61)$$

Avec L_c la taille d'une cellule

Comme $\Pr(l_n > g(L_c)) = P_{n,v}(Vl_n > \eta(L_c))$, alors il existe alors une cellule de taille L_c avec une probabilité $P_{n,v}(Vl_n > \eta(L_c)) = 0$ si et seulement si

$$\Pr(V > \frac{\eta_\infty}{l_n}) = 0 \quad (62)$$

Par conséquent, pour une puissance de transmission P , donnée, le système peut supporter tout déplacement avec une vitesse strictement inférieure à la vitesse maximale V_{max} . C'est-à-dire :

$$V_{lim} < V_{max} \quad (63)$$

Avec

$$V_{max} = \frac{\eta_{\infty}}{l_n} \quad (64)$$

$$V_{max} = \frac{2Pd_0\beta}{\beta - 1} \quad (65)$$

En conséquence, on considère seulement le profil de vitesse de déplacement qui satisfait la probabilité :

$$P_{n,v}(V < V_{max}) = 1 \quad (66)$$

Avec $V_{max} < V_{lim}(P)$

5. Efficacité énergétique

Le canal de propagation du signal est représenté en bande de base par $h_{u,0}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ et $h_{u,s}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ pour la station de base de cellules macro et le $s^{ième}$ station de base au niveau des cellules micro, respectivement [4]. Le signal reçu par l'utilisateur u est donné par :

$$y_u = h_{u,0}^H x_0 + \sum_{s=1}^S h_{u,s}^H x_s + n_u \quad (67)$$

Avec x_0, x_s représentant les signaux transmis au niveau de la station de base du cellule macro SB_{ma} et le $s^{ième}$ station de base des cellules micro SB_{mi} , respectivement

$n_u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_u^2)$ représentant le bruit gaussien à valeurs complexes circulaire de moyenne nulle et de variance σ_u^2 , mesuré en mW.

Les symboles d'informations qui sont transmis de la SB_{Mj} et de la $i^{ième}$ SB_{Si} vers l'utilisateur u sont notés, respectivement, par $x_{u,0}$ et $x_{u,s}$ provenant des dictionnaires gaussiens indépendants avec puissance

unitaire, c'est-à-dire : $x_{u,s} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ pour $s \in [0, S]$.

Ces symboles d'informations seront multipliés par des vecteurs de formation de faisceaux $w_{u,0} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ et $w_{u,s} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ tel que $w_{u,s} \neq 0$.

Le signal transmis vers les SB_{Si} est donné par [68] :

$$y_s = \sum_u^U w_{u,s} x_{u,s} \quad s \in [0, S] \quad (68)$$

Afin de minimiser l'énergie consommée par les stations de base, en garantissant une QoS élevée [5], il est donc nécessaire de résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\underset{w_{u,s} \forall u,s}{\text{minimiser}} P_{\text{dynamique}} + P_{\text{statique}} \quad (69)$$

A une condition que :

$$\log_2(1 + \text{SINR}_u) \geq \gamma_q \quad \forall u \quad (70)$$

$$\sum_{u=1}^U w_{u,s}^H Q_{s,cp} w_{u,s} \leq q_{s,p_c} \quad \forall s, p_c \quad (71)$$

Le taux d'information que les utilisateurs doivent recevoir en parallèle est donné par :

$$T_i = \log_2(1 + \text{SINR}_u) \geq \gamma_q, \quad (72)$$

Avec γ_q la Qualité de Service à atteindre

Le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR_u) de l'utilisateur u , est donné par :

$$\text{SINR}_u \quad (73)$$

$$= \frac{|h_{u,0}^H w_{u,0}|^2 + \sum_{s=1}^S |h_{u,j}^H w_{u,j}|^2}{\sum_{t=1, t \neq u}^U (|h_{u,0}^H w_{t,0}|^2 + \sum_{s=1}^S |h_{u,j}^H w_{t,j}|^2) + \nu}$$

La consommation d'énergie par sous-porteuse est donné par :

$$P_c = P_{\text{dynamique}} + P_{\text{statique}} \quad (74)$$

Tel que :

$$P_{\text{dynamique}} = p_0 \sum_{u=1}^U \|w_{u,0}\|^2 \quad (75)$$

$$+ \sum_{s=1}^S p_s \sum_{u=1}^U \|w_{u,s}\|^2$$

6. Résultats de simulation

La Figure 2 donne l'efficacité énergétique moyenne en fonction des types de stations de base déployés.

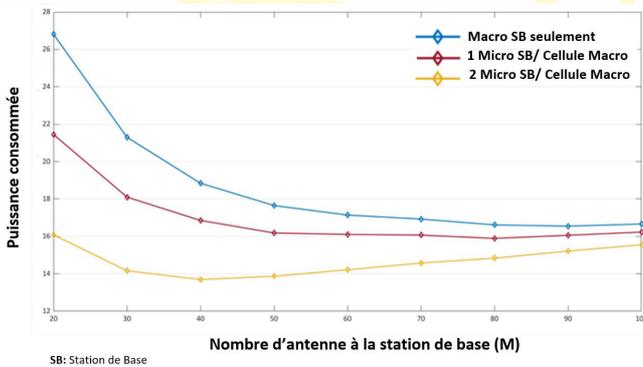


Figure 2 : Consommation énergétique moyenne d'une station de base micro

A partir de la figure 2, nous pouvons constater que la consommation d'énergie diminue en fonction du nombre de stations de base micro-cellulaire déployées.

7. Conclusion

Ce travail nous a permis de montrer que le déploiement des petites antennes permet d'améliorer les débits dans le sens descendant (antenne relais vers mobile) et dans le sens montant (mobile vers antenne relais). En fonction de la couverture initiale du réseau macro et des charges des réseaux, le déploiement des petites antennes permet aussi de favoriser l'efficacité énergétique d'un système de communication cellulaire.

8. Références

- [1] Emiline Graube, "INFOGRAPHIE- Comment fonctionnera le réseau mobile 5G", BFM, 2018
- [2] Anpalagan, A., Bennis, M., & Vannithamby, R, "Design and Deployment of Small Cell Networks". Cambridge University Press, 2015
- [3] 3GPP TR 36.897 V13.0.0, "Study on elevation beamforming/FullDimension (FD) MIMO for LTE", June 2015
- [4] Vincent W. S. Wong, Robert Schober, Derrick Wing Kwan Ng, Li-Chun Wang, "Key Technologies for 5G Wireless Systems", 2017
- [5] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems", IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, Apr. 2013