

## Outils mathématiques fondamentaux des réseaux de télécommunication 5G

*Rafalinirina H. S.<sup>1</sup>, Andriamanalina A. N.<sup>2</sup>, Randriamitantoa P. A.<sup>3</sup>*

Laboratoire de Recherche Télécommunication, Automatique, Signal et Images

(LR-T.A.S.I.)

Ecole Doctorale en Science et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation

(ED – STII)

Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

*<sup>1</sup>sandrahaingomalala@gmail.com,<sup>2</sup>andonirinabe@gmail.com,<sup>3</sup>rpauguste@gmail.com*

### Résumé

Ces dix dernières années ont été marquées par l'augmentation massive de l'utilisation des dispositifs de communication sans fil. Cela est marqué par la croissance spectaculaire de l'utilisation des smartphones, tablettes, laptops et divers autres appareils sans fils. Ainsi, la hausse des demandes pour une communication sans fils plus fiable et plus rapide a entraîné l'étude de développement d'une nouvelle génération de communication mobile, c'est là que naît la cinquième génération de réseaux de communication sans fils ou 5G. Dans cet article, nous nous concentrons dans les outils mathématiques fondamentaux autour des réseaux de télécommunication 5G.

**Mots clés :** Hetnet, Iot, Massive MIMO, Ondes millimétriques, 5G.

### Abstract

The past decade has witnessed a massive

increase in the use of wireless communication devices. This is marked by the dramatic growth in the use of smartphones, tablets, laptops, and various other wireless devices. The rise in demands for a more reliable and fast wireless communication has led to the development of a new generation of mobile communication. This is where the fifth generation of wireless or 5G communication networks is born. In this article, we focus on fundamental mathematical tools around 5G telecommunication networks.

**Keywords:** Hetnet, Iot, Massive MIMO, Millimeter Waves, 5G

### 1. Introduction

L'objectif est que la capacité de communication pour le réseau 5G doit être largement supérieure à celle de la quatrième génération. On parle par exemple de débits supérieurs à 10 Gbit/s, de latences inférieures à une milliseconde et d'autonomie pouvant

atteindre plusieurs années. Pour ce faire dans les réseaux de télécommunication 5G, nous nous appuierons sur les concepts d'Hetnet, d'IoT ou Internet of Things ou Internet des Objets, de Massive MIMO et d'Ondes millimétriques.

## 2. Modèles de réseaux sans fil

### 2.1. Géométrie Stochastique

Les modèles de géométrie stochastique sont des modèles assumant les positions des nœuds ou la structure du réseau pour être aléatoire, en raison de l'imprévisibilité des utilisateurs dans les réseaux sans fil.

### 2.2. Processus ponctuels

Un processus ponctuel est défini comme un type de processus aléatoire utilisé pour décrire une collection de points, dont chacun est localisé dans le temps et dans l'espace géographique. Il existe plusieurs classes de processus ponctuel telles que les Processus Ponctuels de Poisson ou PPP, les Processus Ponctuels Déterminantaux (DPP) et les Ponctuels de Ginibre ou GPP.

#### 2.2.1. Processus Ponctuels de Poisson

Le Processus Ponctuel de Poisson est un processus de point simple  $N$  tel que le nombre de points  $N(A)$  dans n'importe quel secteur délimité par la région  $A$  qui est une variable aléatoire de Poisson. La distribution de

probabilité du nombre  $N(A)$  de points isolés tombant dans une région  $A$  est donnée par:

$$P(N(A) = k) = \frac{(\mu(A))^k e^{-\mu(A)}}{k!} \quad (1)$$

où  $\mu(A)$  est la mesure de la région  $A$

#### 2.2.2. Processus Ponctuels Déterminantaux

C'est un processus stochastique noté  $\Phi$  avec une distribution de probabilité caractérisée comme un déterminant de certaines fonctions et est défini par une fonction de densité de joint donnée par :

$$\rho_n(x_1, \dots, x_n) = \det \left[ K(x_i, x_j)_{1 \leq i, j \leq n} \right] \quad (2)$$

Pour chaque  $n \geq 1$  et  $x_1, \dots, x_n \in S$ , où  $S$  est un ensemble Borel  $S \subset \mathbb{R}^2$

#### 2.2.3. Processus Ponctuels de Ginibre

Le Processus de point Ginibre ou GPP [1] appartient à la classe de DPP et il est plus régulier que le PPP.

Le noyau de GPP est défini comme

$$K(x, y) = \rho e^{\pi \rho x \bar{y}} e^{-\frac{\pi \rho}{2}(|x|^2 |y|^2)}, x, y \in \mathbb{R}^2 \quad (3)$$

$\rho > 0$  est la densité de GPP.

## 2.3. Modèle de canal de propagation

### 2.3.1. Modèle de Rayleigh

Un canal de Rayleigh est un canal destiné aux évanouissements causés par des multi-trajets combinés à une absence de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur ou Non Line Of Sight (NLOS) et où la moyenne de la réponse impulsionnelle du canal est considérée comme nulle. La densité de

probabilité de l'évanouissement est définie par [2]:

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} e^{(-\frac{\alpha^2}{\Omega})} \quad (4)$$

### 2.3.2.Modèle de Rice

Un canal de Rice est un modèle utilisé pour un environnement de propagation intégrant une forte visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur combiné avec plusieurs séries de trajet. Pour un canal de Rice, la densité de probabilité de l'évanouissement est définie par [2] :

$$f(x) = \frac{2(K_R+1)x}{\Omega} \exp(-K_R - \frac{(K_R+1)x^2}{\Omega}) I_0(2\sqrt{\frac{K_R(K_R+1)}{\Omega}} x) \quad (5)$$

Avec  $x \geq 0$

Le paramètre  $K_R$  appelé paramètre de Rice est défini par [2] :

$$K_R = \frac{x_d^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

Où  $x_d$  est la composante du trajet directe avec la puissance de la composante des trajets multivoies  $2\sigma^2$ .

## 2.4.Principaux paramètres de performance de système

### 2.4.1.Rapport Signal sur Bruit

Le rapport signal sur bruit ou Signal-to-Noise Ratio (SNR) est une mesure de la performance d'une transmission obtenue à travers le niveau du rapport signal sur bruit reçu à la réception. Il est défini par :

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (7)$$

où  $P_S$  et  $P_N$  représentent respectivement la puissance exprimée en Watt (W) du signal émis et du bruit qui affecte la transmission.

### 2.4.2.Probabilité de couverture et de coupure

La probabilité de coupure  $P_{out}$  est la probabilité que le SNR d'un canal est inférieur ou égal à un seuil dépendant du réseau. Elle est défini par :

$$P_{out} = P(SNR \leq t) \quad (8)$$

La probabilité de couverture  $P_c$  est la probabilité que le SNR soit supérieur au seuil SNR:

$$P_c = P(SNR > t) = 1 - P_{out} \quad (9)$$

### 2.4.3.Capacité de canal

Dans le cas de canal point à point, l'interférence créée par d'autres émetteurs est considérée comme du bruit. Lorsque le bruit est traité comme gaussien, la loi de la capacité du canal Shannon est alors déterminée par celle du SNR à travers la formule de Shannon (en bits par seconde):

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (10)$$

Où B est la bande passante du canal en Hertz.

### 2.4.4.Capacité d'Ergodic

La capacité d'Ergodic est définie comme la moyenne de la capacité instantanée d'un canal de bruit blanc additif de Gauss, qui peut être exprimé par :

$$C = \mathbb{E}[B \log(1 + SINR)] = \int_{t=0}^{\infty} \mathbb{P}[B \log(1 + SINR) > t] dt$$

$$= \int_{t=0}^{\infty} \mathbb{P}[SINR > e^{t/B} - 1] dt] \quad (11)$$

### 2.4.5. Rendement moyen réalisable

On définit le rendement moyen réalisable par :

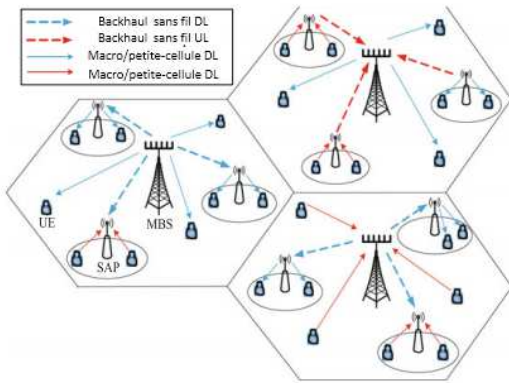
$$\bar{R}(\theta) = \mathbb{E}[B \log(1 + SINR) \mid SINR > \theta] \quad (12)$$

Où  $\theta$  est le seuil SNR. Le débit moyen possible est défini sous l'état d'une transmission réussie.

## 3. Réseaux Hétérogènes

Une approche possible pour augmenter la capacité du réseau mobile consiste à densifier son déploiement en utilisant un grand nombre de cellules couvrant de petites surfaces dit « small cells ». L'ensemble forme le réseau hétérogène [3].

### 3.1. Topologie réseau hétérogène



**Figure 01:** Un réseau hétérogène [3]

La figure 01 représente un réseau hétérogène de petites cellules à deux niveaux qui se composent de MBS (Station de base macrocellule), SAP (Point d'accès petites cellules) et UE (Equipement utilisateur). Le

tableau 1.01 présente un résumé des différentes notations utilisées.

Notation	Définition
$R_m^{DL}, R_s^{DL}, R_b^{DL}$	taux DL macrocellules, petites cellules, Backhaul
$R_m^{UL}, R_s^{UL}, R_b^{UL}$	taux UL macrocellules, petites cellules, Backhaul
$P_{mt}, P_{st}, P_{ut}$	puissance de transmission pour MBS, SAP, UE
$P_{mb}, P_{sb}$	Puissance transmission Backhaul pour MBS, pour SAP
$P_{mc}, P_{sc}$	Consommation électrique du circuit analogique aux macrocellules, aux petites cellules
$P_{me}, P_{se}, P_{ue}$	Puissance de codage par bit sur macrocellules, sur petites cellules, sur backhaul.
$P_{md}, P_{sd}, P_{ud}$	Puissance de décodage par bit sur macrocellules, sur petites cellules, sur backhaul
$M_m, M_s$	Nombre d'antennes d'émission par MBS, par SAP
$K_m, K_s, K_b$	UEs servis par macrocellule, par petites cellules, SAP par MBS sur backhaul
$S_D, S_B$	Shadowing sur le lien d'accès radio, sur backhaul sans fil
$\lambda_m, \lambda_s, \lambda_u$	densités spatiales de MBS, de SAP, de UE
$\tau_m, \tau_s, \tau_b$	Fraction du temps dans DL pour macrocellules, pour petites cellules, pour backhaul
$\zeta_b, \alpha$	Fraction de la bande passante pour le backhaul, coefficient de path loss

**Tableau 1.01:** Résumé des notations

Le rapport de dimensionnalité MIMO pour le traitement linéaire des macrocellules, petites cellules et backhaul est désigné respectivement par :

$$\beta_m = \frac{K_m}{M_m}, \beta_s = \frac{K_s}{M_s}, \beta_b = \frac{K_b M_s}{M_m}$$

### 3.2. Taux et efficacité énergétique

Le taux de liaison descendante sur une macrocellule est donné par :

$$R_m^{DL} = (1 - \zeta_b) \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\sigma^2 z}}{z \ln 2} (1 - e^{-z v_m^D}) \exp\left(\frac{-2\pi^2 \tilde{\lambda}_u P_{ut}^\delta \mathbb{E}[S_D^\delta] z^\delta}{\alpha \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)}\right) * \exp(-\tau_m a_m \mathcal{C}_{\alpha, K_m}(z P_{mt}, t) \left(\frac{z P_{mt}}{K_m}\right)^\delta - \tau_s a_s \mathcal{C}_{\alpha, K_s}\left(\frac{z P_{st}}{K_s}\right)^\delta) f L_m(t) dt dz \quad (13)$$

où  $\delta = \frac{2}{\alpha}$ ,  $a_m = \lambda_m \pi \mathbb{E}[S_D^\delta]$ ,  $a_s = \lambda_s \pi \mathbb{E}[S_D^\delta]$ ,  $\tilde{\lambda}_u = (1 - \tau_m) \lambda_m K_m + (1 - \tau_s) \lambda_s K_s$ , tels que  $v_m^D$ ,  $f L_m(t)$ , et  $\mathcal{C}_{\alpha, K}(z, t)$  sont donnés par :

$$v_m^D = \frac{P_{mt}(1 - \beta_m)(G_m)^\frac{\alpha}{2}}{\beta_m \Gamma(1 + \frac{\alpha}{2})} \quad (14)$$

$$f L_m(t) = G_m \delta x^{\delta-1} \exp(-G_m x^\delta), \quad x \geq 0 \quad (15)$$

$$\mathcal{C}_{\alpha, K}(z, t) = \sum_{n=1}^K \frac{2}{\alpha} \binom{K}{n} [B(1; K - n + \frac{2}{\alpha}, n - \frac{2}{\alpha}) - B((1 + \frac{s}{tK})^{-1}; K - n + \frac{2}{\alpha}, n - \frac{2}{\alpha})] \quad (16)$$

Avec  $G_m = a_m + a_s \left(\frac{P_{st}}{P_{mt}}\right)^\delta$ , et

$B(x; y, z) = \int_0^x t^{y-1} (1-t)^{z-1} dt$  est la fonction bêta incomplète

Le taux de liaison montante sur une macrocellule est donné par :

$$R_m^{UL} = (1 - \zeta_b) \int_0^\infty \frac{\left(1 - e^{-\frac{z v_m^U}{t}}\right)}{z e^{\sigma^2 z} \ln 2} \exp\{-\tilde{\lambda}_u \pi \mathbb{E}[S_D^\delta]\} \int_0^\infty \frac{1 - e^{-G_m u}}{1 + \frac{z^{-1} u^\frac{1}{\delta}}}{P_{ut}} du \frac{\Gamma(1 + \delta) \delta \pi^2 z^\delta}{\sin(\delta \pi)} \left[ \frac{\tau_m a_m P_{mt}^\delta \prod_{i=1}^{K_m-1} (i + \delta)}{\Gamma(K_m) K_m^\delta} + \frac{\tau_s a_s P_{st}^\delta \prod_{i=1}^{K_s-1} (i + \delta)}{\Gamma(K_s) K_s^\delta} \right] j L_m(t) dt dz \quad (17)$$

avec  $v_m^U = (1 - \beta_m) M_m P_{mt}$

Le taux de liaison descendante sur une petite cellule est donné par :

$$R_s^{DL} = \int_0^\infty \frac{(1 - \zeta_b)}{z e^{\sigma^2 z} \ln 2} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{z P_{st} t^{-1}}{K_s}\right)^{\Delta_s}}\right) \exp\left(\frac{-2\pi^2 \tilde{\lambda}_u P_{ut}^\frac{2}{\alpha} \mathbb{E}\left[S_D^\frac{2}{\alpha}\right] z^\frac{\delta 2}{\alpha}}{\sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)}\right) * \exp\left(-\tau_s a_s \mathcal{C}_{\alpha, K_s}(z P_{st}, t) \left(\frac{z P_{st}}{K_s}\right)^\delta - \tau_m a_m \mathcal{C}_{\alpha, K_m}(z P_{st}, t) \left(\frac{z P_{mt}}{K_m}\right)^\delta\right) f L_s(t) dt dz \quad (18)$$

Où  $\Delta_s = M_s - K_s + 1$  et  $f L_s(t)$  est donné par :

$$f L_s(t) = G_s \delta x^{\delta-1} \exp(-G_s x^\delta), \quad x \geq 0 \quad (19)$$

$$\text{avec } G_s = a_s + a_m (P_{mt}/P_{st})^\delta \quad (20)$$

Le taux de liaison montante sur une petite cellule est donné par :

$$R_s^{UL} = (1 - \frac{1}{ze^{\sigma^2 z \ln 2}} \left[ 1 - \int_0^\infty \frac{fL_s(t)dt}{(1+zP_{utt}t^{-1})^{\Delta_s}} \right] \exp\{-\tilde{\lambda}_u \pi \mathbb{E}[S_D^\delta]\} \int_0^\infty \frac{1-e^{-G_s u}}{1+\frac{z^{-1}u^\delta}{P_{ut}}} du \zeta_b) \int_0^\infty \frac{\Gamma(1+\delta)\delta\pi^2 z^\delta}{\sin(\delta\pi)} - \left[ \frac{\tau_m a_m P_{mt}^\delta \prod_{i=1}^{K_m-1}(i+\delta)}{\Gamma(K_m)K_m^\delta} + \frac{\tau_s a_s P_{st}^\delta \prod_{i=1}^{S-1}(i+\delta)}{\Gamma(K_s)K_s^\delta} \right] dz \quad (21)$$

Le taux de liaison descendante sur le backhaul sans fil est donné par :

$$R_b^{DL} = \frac{\zeta_b M_s}{K_s} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\sigma^2 z}}{z \ln 2} (1 - e^{-zv_b^D}) \exp(-\tau_b a_b \mathcal{C}_{\alpha, K_b} M_s (zP_{mb}, t) \left(\frac{zP_{mb}}{K_b M_s}\right)^\delta) * \exp\left(\frac{\Gamma(1+\delta)\delta\pi^2 z^\delta P_{sb}^\delta}{\sin(\delta\pi)\Gamma(M_s)M_s^\delta} \mathbb{E}[S_B^\delta] (1 - \tau_b) \lambda_s \prod_{i=1}^{M_s-1}(i + \delta)\right) fL_b(t) dt dz \quad (22)$$

où  $a_b = \lambda_m \pi \mathbb{E}[S_B^\delta]$ ,  $fL_b(t)$  et  $v_b^D$  sont donnés par :

$$fL_b(t) = a_b \delta t^{\delta-1} \exp(a_b t^\delta), t > 0 \quad (23)$$

$$v_b^D = \frac{P_{mb}(1-\beta_b)a_b^\delta}{\beta_b \Gamma(1+1/\delta)} \quad (24)$$

Le taux de liaison montante sur le backhaul sans fil est donné par:

$$R_b^{UL} = \frac{\zeta_b M_s}{K_s} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\sigma^2 z}}{z \ln 2} (1 - e^{-\frac{zv_b^U}{t}}) \exp(-\frac{\tau_b a_b \Gamma(1 + \delta) \delta \pi^2 z^\delta P_{mb}^\delta \prod_{i=1}^{K_b M_s - 1} (i + \delta)}{\sin(\delta \pi) (M_s K_b)^\delta \Gamma(M_s K_b)}) * \exp\{(1 - \tau_b) \binom{M_s}{n} \left(\frac{zu^{-\frac{1}{\delta} P_{sb}}}{M_s}\right)^n (1 - e^{-a_b u}) \int_0^\infty \frac{du}{\left(1 + \frac{zu^{-\frac{1}{\delta} P_{sb}}}{M_s}\right)^{M_s}} \} fL_b(t) dt dz \quad (25)$$

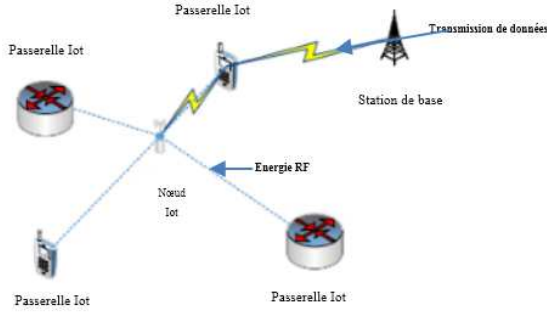
$$\text{où } v_b^U = (1 - \beta_b) M_m P_{sb} \quad (26)$$

#### 4. Internet of Things (IoT)

De nos jours, presque tous les appareils de notre vie quotidienne sont capables d'une certaine forme de calcul et de communication. Il est prédit que les dispositifs interagissent entre eux partageant des objectifs communs à travers un réseau appelé Internet of Things.

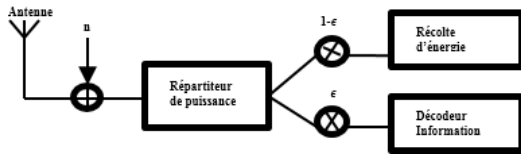
##### 4.1. Modèles de réseau IoT

Soit un réseau IoT composé de passerelles IoT et des nœuds IoT comme le montre la figure 1.02. On suppose que les passerelles transmettent à la même puissance  $P_G$  et chaque nœud est associé à sa passerelle la plus proche.



**Figure 1.02 :** Architecture de réseau IoT

Les nœuds effectuent une transmission de données et une récolte d'énergie RF simultanément, comme le montre la figure 1.03. Après le fractionnement de puissance, la partie des signaux RF séparés par le récepteur d'information est désignée par  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ), et celle de la récolte d'énergie est  $1 - \epsilon$ . Le bruit blanc gaussien introduit par l'antenne de réception  $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ . La récolte d'énergie a une efficacité de conversion  $\eta$ .



**Figure 1.03 :** Modèle de réseau Iot

#### 4.1.1. Récolte d'énergie d'un nœud IoT

Cette récolte d'énergie est définie par :

$$P_H = \eta(1 - \epsilon) \sum_k P_G Q_k^{-\alpha/2} \quad (27)$$

Où  $Q_k \sim \text{gamma}(k, \frac{1}{\rho})$ ,  $\rho > 0$  désigne la densité de GPP

#### 4.1.2. SNR d'un nœud IoT

Le SNR d'un nœud IoT connectant à sa passerelle est donné par :

$$SNR = \frac{\epsilon P_G \{\min_k Q_k\}^{-\alpha/2}}{\epsilon (\sum_k \epsilon P_G Q_k^{-\alpha/2} - P_G \{\min_k Q_k\}^{-\alpha/2})} \quad (28)$$

Avec  $P_G \{\min_k Q_k\}^{-\alpha/2}$  la puissance reçue d'une passerelle marquée vers un nœud IoT.

#### 4.1.3. Consommation d'énergie à chaque nœud

La consommation d'énergie à chaque nœud est donnée par :

$$P_D = P_O + C_{TX} \{\min_k Q_k\}^{\alpha/2} \quad (29)$$

$P_O$  désigne la dépense de puissance opérationnelle statique et  $C_{TX}$  désigne le coefficient constant de proportionnalité de la puissance d'émission RF.

### 5. Massive MIMO

MIMO massif ou Massive MIMO est une forme du système MIMO multi-utilisateurs où les stations de bases et le nombre d'utilisateurs sont très nombreux. Massive MIMO est une technologie du futur qui fournira des réseaux large bande plus sécurisé, robuste, efficace.

#### 5.1. Modèle de canal pour les antennes ULA

On utilise le modèle classique [4] du canal à trajets multiples. Le modèle du canal est défini par :

$$h_{lk}^{(j)} = \frac{B_{lk}^{(j)}}{\sqrt{P}} \sum_{p=1}^P a(\theta_{lkp}^{(j)}) e^{i\varphi_{lkp}^{(j)}}. \quad (30)$$

Où  $P$  est le nombre de chemins indépendant et identiquement distribué (i.i.d.),  $e^{i\varphi_{lkp}^{(j)}}$  est la phase aléatoire i.i.d., et  $a(\theta)$  représente le vecteur de direction de la route en provenance de l'angle d'arrivée  $\theta$  :

$$a(\theta) \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-\frac{j2\pi D}{\lambda} \cos(\theta)} \\ \vdots \\ e^{-\frac{j2\pi(M-1)D}{\lambda} \cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal et  $D$

l'espacement d'antenne.  $B_{lk}^{(j)}$  est le coefficient de perte de trajet

$$B_{lk}^{(j)} = \sqrt{\frac{\alpha}{d_{lk}^{(j)\gamma}}} \quad (32)$$

$\gamma$  dénote l'exposant d'atténuation,  $d_{lk}^{(j)}$  est la distance géographique entre l'utilisateur et la  $j$ -ième station de base et  $\alpha$  est une constante.

### 5.2. Modèle du vecteur de réponse d'un chemin élémentaire d'un réseau aléatoire

Dans ce cas, un chemin élémentaire avec un angle  $\theta$  peut être représenté par le vecteur de réponse tel que :

$$a(\theta) \triangleq \begin{bmatrix} e^{-\frac{j2\pi d_1}{\lambda} \cos(\theta)} \\ \vdots \\ e^{-\frac{j2\pi d_M}{\lambda} \cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (33)$$

où la position de la  $m$ -ième antenne ( $1 \leq m \leq M$ ),  $d_m$ , suit une distribution uniforme, i.e.,  $d_m \sim U(0, D)$ .

## 6. Modèles de système à bande millimétrique

Le réseau de chaque opérateur  $\Phi_m$  se compose de BS dont les emplacements sont modélisés à l'aide d'un processus de point de Poisson (PPP) avec une intensité  $\lambda_m$  et des utilisateurs dont les emplacements sont

répartis comme indépendants PPP avec intensité  $\lambda_m^u$ . Les BS de chaque opérateur peuvent transmettre avec la puissance  $P_m$ . On désigne le spectre total par  $B$  et on suppose que le  $m$ -ième opérateur détient une licence pour un spectre orthogonal de  $B_m$  bande passante qu'il peut partager avec d'autres.

Une probabilité qu'un lien soit LOS soit dépendante de  $x$  et indépendante des types d'autres liens et est donnée par [5], [6] :

$$p(x) = \exp(-\beta x) \quad (34)$$

### 6.1. Puissance effective

La bande passante disponible  $W_n$  à chaque opérateur est  $B$  et l'opérateur interférant est  $Q_n = \{1, 2, \dots, M\}$ . La puissance effective reçue d'un BS  $B_{mj}$  à l'UE est donnée par :

$$P_{mj} = P_{mj}^{avg} G(\theta_{mj}) \quad (35)$$

### 6.2. Diagramme de rayonnement

On suppose que les BS de chaque opérateur sont équipées d'une antenne orientable ayant un diagramme de rayonnement donné [5]

$$G(\theta) = \begin{cases} G_1 & |\theta| < \theta_b \\ G_2 & \text{autrement} \end{cases} \quad (36)$$

Ici  $G_1 \gg G_2$  et  $\theta_b$  désignent une demi-largeur de faisceau.

### 6.3. Puissance moyenne reçue

La puissance moyenne reçue provenant du  $B_{mj}$  à UE0 sans gain d'antenne est donnée par :

$$P_{mj}^{avg} = P_m l_{s_{mj}}(x_{mj}) \quad (37)$$

### 6.4. Puissance effective reçue de cette BS

L'opérateur auquel l'utilisateur UE0 s'associe est  $k$  et l'indice de la BS de service par  $i$ . Étant



donné que la BS de service aligne son antenne avec l'utilisateur de sorte que l'angle  $\theta_{ki}$  entre l'antenne BS de service et la direction de l'utilisateur soit  $0^\circ$  et que la puissance effective reçue de cette BS est

$$P_{ki} = P_k h_{ki} l_{s_{ki}}(x_{ki}) G(0) = P_k h_{ki} l_{s_{ki}}(x_{ki}) G_1 \quad (38)$$

Pour chaque BS  $B_{mj}$  interférant pour  $m \in Q_k$ , l'angle  $\theta_{mj}$  est supposé être uniformément réparti entre  $-\pi$  et  $\pi$ .

## 7. Conclusion

Nous avons étudié les outils mathématiques fondamentaux des réseaux de télécommunication 5G. On a fait une introduction à la connaissance de la géométrie stochastique, des processus ponctuels et des modèles de canaux utilisés dans l'analyse pour différents composants dans les réseaux 5G. En outre, les définitions de quelques mesures de performance sont brièvement abordées. On s'est également concentré sur la modélisation et l'analyse de l'information simultanée et du transfert d'énergie dans Internet of Things (IoT). On a souligné des propriétés fondamentales des chaînes de massifs MIMO et également des ondes millimétriques.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] N. Deng, W. Zhou, and M. Haenggi «*The*

*ginibre point process as a model for wireless networks with repulsion*, » *Wireless Communications, IEEE Transactions*, Jan 2015.

[2] K. M. R. S. A. Mohamed, « *Digital Communication over Fading Channels – A Unified Approach to Performance Analysis* », 1st ed. Wiley 2000.

[3] Howard H. Yang Tony Q.S. Quek, « *Massive MIMO Meets Small Cell Backhaul and Cooperation* », Springer, August 15, 2016

[4] A. F. Molisch, « *Wireless communications* », Wiley, 2010.

[5] Bai and R. W. Heath Jr. « *Coverage and rate analysis for millimeter wave cellular networks*, » *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 2, pp. 1100–1114, Feb. 2015

[6] T. Bai, R. Vaze, and R. Heath, « *Analysis of blockage effects on urban cellular networks*, » *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 9, pp. 5070–5083, Sept. 2014.