

## Optimisation de l'Efficacité Energétique et de l'Efficacité Spectrale des réseaux de télécommunication 5G

*Rafalinirina H. S.<sup>1</sup>, Randriamitantoa P. A.<sup>2</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>*rpauguste@gmail.com*

### Résumé

La consommation d'énergie de l'industrie des technologies de la communication et la pollution liée à l'énergie correspondante deviennent des préoccupations sociétales et économiques majeures. Cela a incité les milieux universitaires et l'industrie à une intense activité dans le nouveau domaine de recherche des réseaux cellulaires verts, récemment stimulé par le rapport SMART 2020 et le consortium Green Touch. Le but ultime est de concevoir de nouvelles architectures et technologies de réseau innovantes, nécessaires pour répondre à la croissance explosive de la demande de données cellulaires sans augmenter la consommation d'énergie. Dans cet article, nous nous concentrons dans l'optimisation des performances des réseaux de télécommunications 5G à travers les techniques MIMO et ondes millimétriques.

**Mots clés** : 5G, Efficacité Energétique, Efficacité Spectrale, Massive MIMO, Ondes millimétriques, 5G.

### Abstract

The energy consumption of the communications technology industry and related energy-related pollution are becoming major societal and economic concerns. This has spurred academic and industry activity in the new field of green cellular research, recently spurred by the SMART 2020 report and the Green Touch consortium. The ultimate goal is to design new architectures and innovative networking technologies needed to meet the explosive growth of cellular data demand without increasing power consumption. In this article, we focus on optimizing the performance of 5G telecommunications networks through MIMO and millimeter wave techniques

**Keywords:** 5G, Energy Efficiency, Spectral Efficiency, Massive MIMO, Millimeter Wave, 5G.

## 1. Introduction

Le marché exige que la capacité de ces réseaux soit plus élevée que celle de ces prédécesseurs. En utilisant un grand nombre d'antennes, Massive MIMO peut améliorer considérablement l'efficacité spectrale en exploitant largement les ressources spatiales disponibles. La migration vers des fréquences plus élevées pourrait libérer une grande quantité de bande passante disponible, pour soutenir la transmission à haut débit. En particulier, l'onde millimétrique peut être le candidat prometteur. Ainsi repose la nécessité d'étudier le fonctionnement des systèmes Massive MIMO à certains domaines de fréquences. Dans ce présent article, nous allons mettre en évidence des méthodes d'optimisation de l'Efficacité Energétique et de l'Efficacité Spectrale afin de garantir les exigences de performances pour les réseaux de télécommunications 5G. En premier lieu, des scénarios de communication entre station de base et équipement utilisateur dans les bandes des 700 Mhz seront abordés afin de faire le choix idéal du nombre d'antennes  $M$  à la station de base, du nombre  $K$  d'équipements utilisateurs actifs et de la puissance d'émission  $\rho$  de manière à couvrir uniformément un espace urbain dense et un grand bâtiment avec Efficacité Energétique optimale pour le

système. Un algorithme d'optimisation alternatif est utilisé afin de trouver les valeurs optimales  $M$ ,  $K$  et  $\rho$  dans un système à traitement linéaire ZF. Cet algorithme permet de maximiser l'Efficacité Energétique en optimisant  $M$ ,  $K$  et  $\rho$  séparément lorsque les deux autres sont fixes. L'optimum global peut être obtenu par une recherche exhaustive sur toutes les combinaisons de pair  $(K, M)$  et calcul de la répartition optimale de la puissance. On utilisera une méthode de Monte Carlo sur la base d'allocation de puissance et d'un modèle de consommation d'énergie pour le cas d'un système utilisant le traitement linéaire MRT/MRC. Les valeurs de  $K$  et  $M$  seront donc utilisés pour calculer les valeurs optimales globales d'Efficacité Energétique atteignables pour les systèmes à traitement linéaire ZF et MRT/MRC. En utilisant ces paramètres maximisant l'Efficacité Energétique, on trouvera également des résultats de capacité de trafic, de puissance d'émission totale et de puissance rayonnée par les antennes.

En second lieu, toujours dans le cas de communication entre station de base et équipements utilisateurs, l'objet de recherche mettra en évidence les systèmes à ondes millimétriques. Le travail visera à comparer différentes méthodes de précodages à savoir les précodages analogiques basés sur beamforming, des précodages hybrides basés sur l'algorithme Spatialement clairsemé et sur

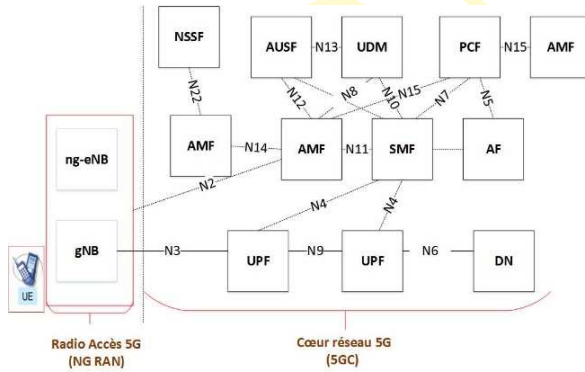
l'algorithme Annulation Interférence Successive. L'efficacité spectrale et l'Efficacité Energétique seront nos principales métriques de performance pour ce second travail d'optimisation.

## 2. Réseaux de télécommunications 5G

### 2.1. Architecture globale

L'architecture globale du réseau de télécommunications 5G se compose d'un accès Radio ou Next Generation RAN (NG-RAN) et d'un cœur réseau ou 5G Core (5GC) [1] [2].

La Figure 01 illustre cette architecture.



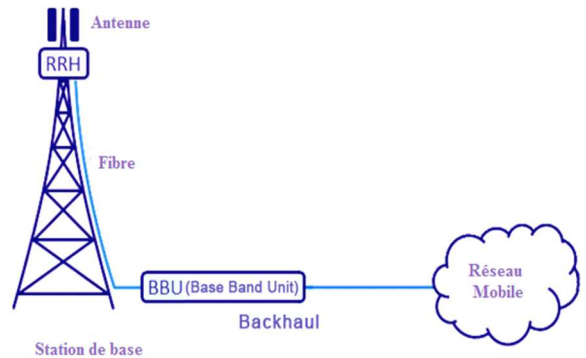
**Figure 01 :** Architecture 5G et interfaces entre entités

Les équipements utilisateurs ou User Equipment (UE) communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G.

Si la communication est en 5G, la station de base se nomme next Generation Node Base Station (gNB), si la communication est en 4G, la station de base est une station de base 4G eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G. La station de base se nomme Next Generation -eNb (ng-eNb) ou eLTE-eNB.

Notre domaine d'étude se situe au niveau des blocs en rouge illustrés à la Figure 01.

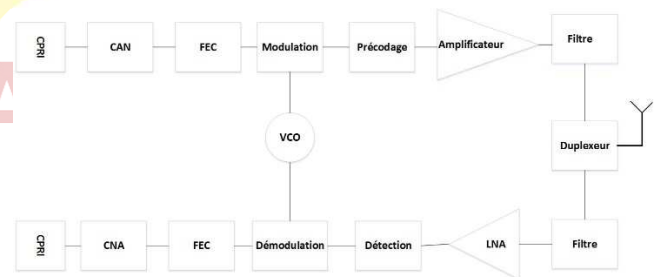
### 2.2. Diagramme en bloc de la station de base



**Figure 02 :** Architecture de la station de base

Une station de base radio illustrée à la Figure 02 peut être fonctionnellement [3] [4] séparée en :

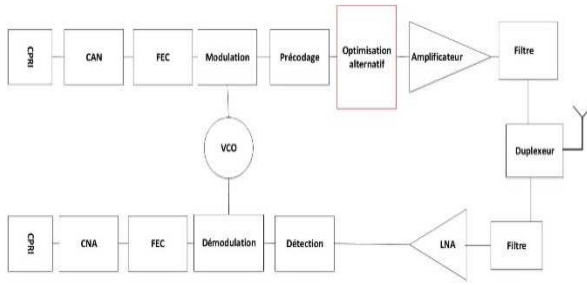
- BBU = baseband unit (unité de bande de base, parfois appelée unité numérique), qui génère et traite un signal RF numérisé en bande de base
- RRH = Remote Radio Head qui crée le signal RF d'émission analogique à partir du signal en bande de base et le transmet à l'antenne, numérise le signal de réception



**Figure 03 :** Diagramme en Bloc de RRH

## 3. Optimisation de l'Efficacité Energétique

On appelle Efficacité Energétique, le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour le faire fonctionner.



**Figure 04 :** Schéma synoptique RRH avec optimisation EE

A la différence de la **Figure 03**, on aperçoit à la **Figure 04** un bloc d'optimisation alternatif avant le bloc d'amplificateur de puissance afin de garantir une maximisation d'Efficacité Energétique pour le système multi-utilisateurs MIMO.

### 3.1. Modélisation des systèmes MU-MIMO

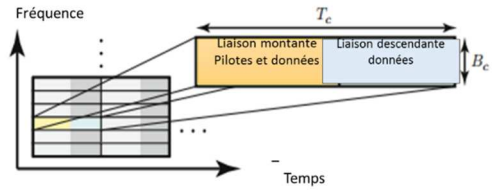
Le système MU-MIMO ou système multi-utilisateurs MIMO est un système à plusieurs utilisateurs utilisant la technologie MIMO. La station de base est équipée de  $M$  antennes et peut servir jusqu'à  $K$  utilisateurs tel que  $M \gg K$ .

Le système fonctionne en mode TDD ou Time-Division Duplexing utilisant un traitement linéaire en liaison montante et liaison descendante.

#### 3.1.1. Protocole TDD

Le protocole de transmission TDD est une technique permettant à un canal de télécommunication, utilisant une même ressource de transmission, de multiplexer dans le temps l'émission et la réception.

La **Figure 05** illustre le principe de ce protocole de transmission.



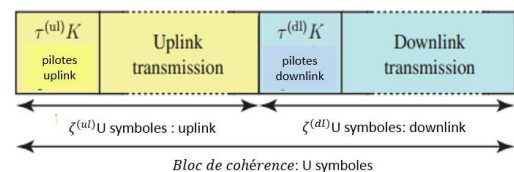
**Figure 05 :** Protocole de base de la transmission en mode TDD

La largeur de bande  $B_C$  est sélectionnée pour que celle-ci : soit plus petite ou égale à celle prévue pour la bande passante de cohérence entre les utilisateurs. Tandis que  $T_C$  est plus petit ou égal au temps de cohérence des canaux anticipés des utilisateurs.

Le nombre de symbole de transmission qui ajuste dans un intervalle de cohérence est donné par la formule  $U = B_C T_C$ , en se référant au théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon.

La fraction de transmission est une fraction spécifiée pour une transmission en liaison montante notée  $\zeta^{(ul)}$  ou en liaison descendante notée  $\zeta^{(dl)}$  de façon à ce que la somme  $\zeta^{(ul)} + \zeta^{(dl)} = 1$ .

Comme l'indique la **Figure 06**, la transmission sur la liaison montante a lieu en premier avec  $U\zeta^{(ul)}$  symboles. La liaison descendante ultérieure de la transmission est représentée par  $U\zeta^{(dl)}$  symboles.



**Figure 06 :** Protocole TDD

Le pilote de signalisation pour la liaison montante occupe  $\tau^{(ul)}K$  symboles et  $\tau^{(dl)}K$  pour la liaison descendante. Sur ce, il est remarqué que  $\tau^{(ul)}, \tau^{(dl)} \geq 1$  afin d'activer les séquences de pilotes orthogonaux parmi les UE [5], [6], [7].

Les pilotes de liaison montante permettent à la station de base d'estimer les canaux UE.

Les pilotes de liaison descendante laissent chaque UE évaluer son canal effectif et ses interférences variantes avec le précodage actuel.

### 3.1.2. Modélisation de l'emplacement des utilisateurs

La fonction de densité de distribution des utilisateurs est définie par :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(d_{max}^2 - d_{min}^2)} & d_{min} \leq \|x\| \leq d_{max} \\ 0 & \text{autres} \end{cases} \quad (1)$$

Les utilisateurs sont uniformément répartis dans une cellule circulaire de rayon maximale  $d_{max}$ . Notons  $d_{min}$  la distance minimale de l'emplacement d'un utilisateur par rapport à la station de base.

### 3.1.3. Modèle d'évanouissement de canal

Le système étant sous l'effet des phénomènes d'évanouissement ou fading à grande échelle en raison de la perte de trajet, de la dispersion et de l'ombrage à l'emplacement  $x_k$  du  $k^{ème}$  utilisateur.

L'affaiblissement moyen à une distance de référence  $d_0$  est égal à  $\overline{PL}(d_0)$ , l'affaiblissement moyen est donné par :

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) \left(\frac{d}{d_0}\right)^k \quad (2)$$

Avec  $k$  l'exposant de perte de trajet.

En décibel, l'affaiblissement est :

$$\overline{PL}(d)_{dB} = \overline{PL}(d_0)_{dB} + 10k \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

#### 3.1.3.1. Modélisation path loss dans un espace urbain dense

Dans un milieu urbain dense, la valeur de l'exposant  $k$  varie de 2 à 5. On a la modélisation de l'affaiblissement de propagation comme suit :

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) \left(\frac{d}{d_0}\right)^k \text{ pour } 2 < k < 5 \quad (4)$$

#### 3.1.3.2. Modélisation path loss dans un bâtiment

En prenant le cas d'un système à l'intérieur d'un grand bâtiment, la valeur de l'exposant  $k$  sera de 1,6. On a la modélisation de l'affaiblissement de propagation comme suit :

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) \left(\frac{d}{d_0}\right)^{1,6} \quad (5)$$

Dans ces deux cas de path loss à exposant de perte de trajet vu précédemment, posons

$$\overline{PL}(d) = l(x), \left(\frac{d}{d_0}\right) = \frac{1}{\|x\|^k}, \overline{PL}(d_0) = \bar{d}$$

Le fading à grande échelle peut être présenté généralement par la fonction  $l(.) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  et sera donc :

$$l(x) = \frac{\bar{d}}{\|x\|^k} \quad (6)$$

A noter que  $\bar{d} > 0$  règle l'atténuation de canal à la distance  $d_{min}$  et  $d_{min} \leq \|x\| \leq d_{max}$

L'atténuation inverse moyenne du canal, joue un rôle clé dans toutes les discussions ultérieures.

*Définition 4.07 :*

L'atténuation inverse moyenne de canal est définie par :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_x \left\{ (l(x))^{-1} \right\} & \quad (7) \\ & = \frac{d_{max}^{k+2} - d_{min}^{k+2}}{\bar{d} \left( 1 + \frac{k}{2} \right) (d_{max}^2 - d_{min}^2)} \end{aligned}$$

### 3.1.4. Modèle de canal et traitement linéaire

Les  $M$  antennes au niveau de la station de base sont suffisamment espacées pour que les composantes de canal entre les antennes de la station de base et les équipements utilisateurs à antenne unique ne soient pas corrélées.

#### 3.1.4.1. Modèle du canal

Le modèle du canal est caractérisé par le vecteur de canal  $h_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,M}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  ayant des entrées  $\{h_{k,n}\}$  décrivant le canal de propagation instantanée entre la  $n^{\text{ème}}$  antenne de la station de base et le  $k^{\text{ème}}$  UE. Nous supposons une distribution de Rayleigh à fading petite échelle telle que  $h_k \sim \mathcal{CN}(0_M, l(x_k) \mathbf{I}_M)$ , qui est un modèle valide pour les réseaux de grande et de petite taille.

#### 3.1.4.2. Traitement linéaire

Soit  $G = [g_1, g_2, \dots, g_K] \in \mathbb{C}^{M \times K}$  la matrice de combinaison linéaire en réception pour la

liaison montante. La colonne  $g_k$  étant affectée au  $k^{\text{ème}}$  UE.

On considère les traitements linéaires MRC et ZF pour la détection en liaison montante, ce qui donne :

$$G = \begin{cases} H \\ H(HH^H)^{-1} \end{cases} \begin{matrix} MRC \\ ZF \end{matrix} \quad (8)$$

où  $H = [h_1, h_2, \dots, h_K]$  contient tous les canaux utilisateur.

De même, nous considérons les précodages MRT et ZF pour la liaison descendante. Notant par  $V = [v_1, v_2, \dots, v_K] \in \mathbb{C}^{M \times K}$  la matrice de précodage, nous avons cela :

$$V = \begin{cases} H \\ H(HH^H)^{-1} \end{cases} \begin{matrix} MRT \\ ZF \end{matrix} \quad (9)$$

Il est naturel de définir  $V = G$  pour réduire la complexité de calcul.

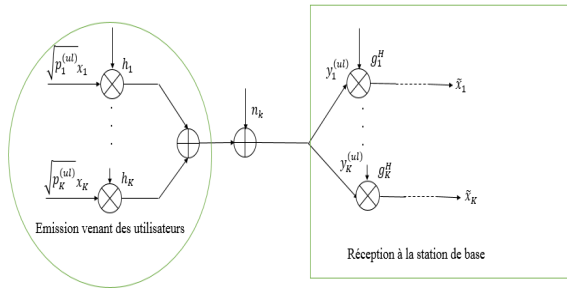
Bien que les systèmes conventionnels présentent une grande disparité entre les débits de pointes et les débits moyens, nous visons à concevoir le système de manière à garantir un débit brut uniforme  $\bar{R}$  (en bit / seconde) pour tout UE actif, dont  $\zeta^{(ul)} \bar{R}$  est le débit de liaison montante et  $\zeta^{(dl)} \bar{R}$  est celui de liaison descendante. Ceci est réalisé en combinant le traitement linéaire avec une allocation de puissance appropriée.

Selon les hypothèses des livres de codes gaussiens, du traitement linéaire et de la CSI parfaite, le débit de liaison montante pouvant être atteint (en bit / seconde) du  $k^{\text{ème}}$  UE s'exprime comme suit [8] :

$$R_k^{(ul)} = \zeta^{(ul)} \left( 1 - \frac{\tau^{(ul)}K}{U\zeta^{(ul)}} \right) \bar{R}_k^{(ul)} \quad (10)$$

où le facteur  $\left( 1 - \frac{\tau^{(ul)}K}{U\zeta^{(ul)}} \right)$  représente les frais généraux du pilote la fraction de transmission en liaison montante.

Un schéma fonctionnel de la transmission montante avec détection linéaire est fourni à la figure ci-dessous.



**Figure 07 :** Schéma fonctionnel d'une transmission en liaison montante avec détection linéaire dans un réseau multi-utilisateurs MIMO à une cellule

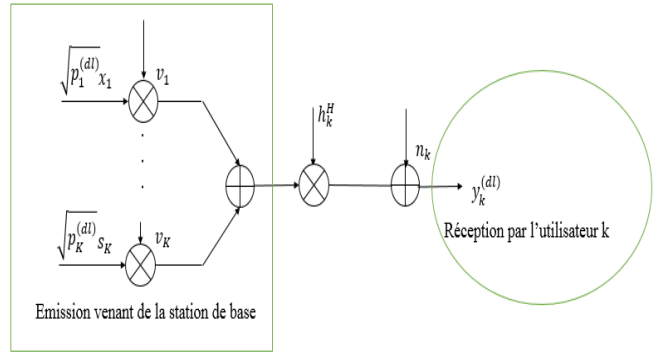
Où  $x_k$  est le symbole de transmission normalisé (avec  $E\{|x_k|^2\} = 1$ ) et  $p_k^{(ul)}$  la puissance de transmission de l'utilisateur k dans la cellule. Le matériel du récepteur à la station de base est contaminé par un bruit blanc additif, modélisé par le vecteur  $n_k \in \mathbb{C}^M$  qui suit une distribution gaussienne à symétrie circulaire de moyenne nulle avec une variance  $\sigma^2$ , d'où  $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 I_M)$ .  $h_k$  est le canal utilisateur pour le  $k^{\text{ème}}$  utilisateur,  $g_k^H$  est le vecteur de détection linéaire pour le  $k^{\text{ème}}$  utilisateur au niveau de la station de base et  $\tilde{x}_k$  le signal

détecté correspondant à l'utilisateur k pour  $k = 1, 2, \dots, K$ .

En outre, le débit brut de liaison montante (en bit / seconde) à partir du  $k^{\text{ème}}$  UE, où « brut » fait référence aux facteurs de frais généraux qui ne sont pas inclus, est exprimé par [8] :

$$\bar{R}_k^{(ul)} = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_k^{(ul)} |g_k^H h_k|^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K p_l^{(ul)} |g_k^H h_l|^2 + \sigma^2 \|g_k\|^2} \right) \quad (11)$$

Un schéma fonctionnel de la transmission en liaison descendante est fourni à la Figure 08.



**Figure 08 :** Schéma fonctionnel d'une transmission en liaison descendante avec précodage linéaire pour système MIMO dans une cellule

En supposant des répertoires gaussiens et CSI parfait, le débit de liaison descendante pouvant être atteint (en bit / seconde) du  $k^{\text{ème}}$  UE avec traitement linéaire est égal à [8] :

$$R_k^{(dl)} = \zeta^{(dl)} \left( 1 - \frac{\tau^{(dl)}K}{U\zeta^{(dl)}} \right) \bar{R}_k^{(dl)} \quad (12)$$

où  $(1 - \frac{\tau^{(dl)K}}{U\zeta^{(dl)}})$  représente la surcharge du pilote sur la liaison descendante et  $\bar{R}_k^{(dl)}$  est le débit brut (en bit / seconde) donné par :

$$\bar{R}_k^{(dl)} = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_k^{(dl)} \frac{|h_k^H v_k|^2}{\|v_k\|^2}}{\left( \sum_{l=1, l \neq k}^K p_l^{(dl)} \frac{|h_k^H v_k|^2}{\|v_k\|^2} + \sigma^2 \right)} \right) \quad (13)$$

### 3.1.5. Formulation de problème d’optimisation de l’Efficacité Energétique

L’EE totale des liaisons montante et descendante s’exprime par [8]:

$$EE = \frac{\sum_{k=1}^K (\mathbb{E}\{R_k^{(ul)}\} + \mathbb{E}\{R_k^{(dl)}\})}{P_{TX}^{(ul)} + P_{TX}^{(dl)} + P_{CP}} \quad (14)$$

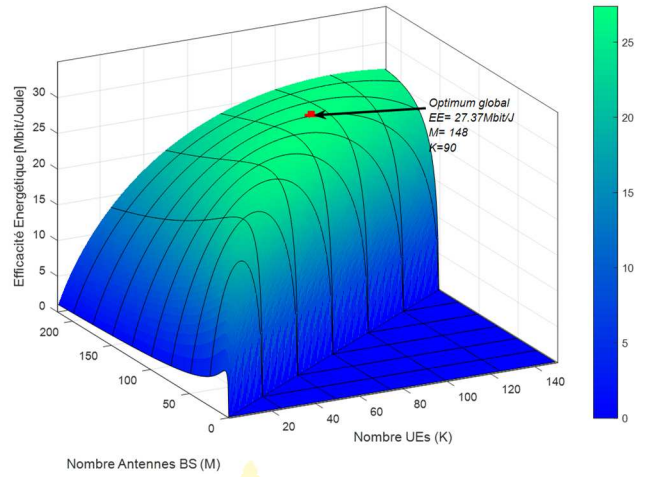
Où  $P_{TX}^{(ul)}$  et  $P_{TX}^{(dl)}$  les puissances des amplificateurs de puissances au niveau de la station de base et de UE respectivement.  $P_{CP}$  est la consommation totale de circuit.

### 3.1.6. Optimisation de l’Efficacité Energétique de système MU- MIMO dans un espace urbain dense

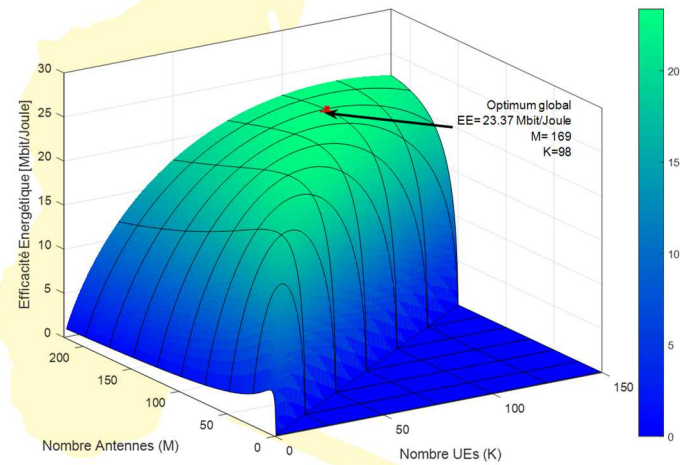
#### 3.1.6.1. Résultats optimisations EE en traitement

##### ZF et MRT/MRC en espace urbain dense

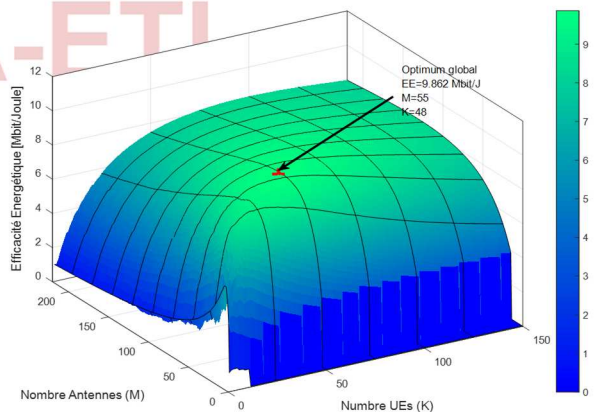
Le modèle de déploiement obtenu à la **Figure 09** montre l’ensemble des valeurs EE réalisables avec CSI parfait pour un traitement ZF avec différentes valeurs de  $M$  jusqu’à 220 et  $K$  jusqu’à 150.



**Figure 09 :** Optimum global en ZF à CSI parfait en urbain dense

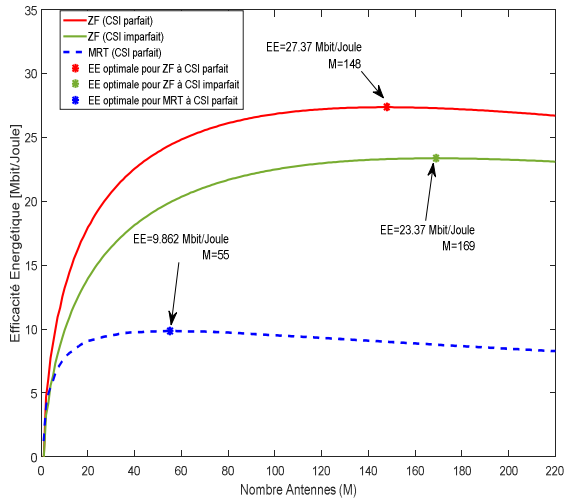


**Figure 10 :** Optimum global en traitement ZF à CSI imparfait en urbain dense



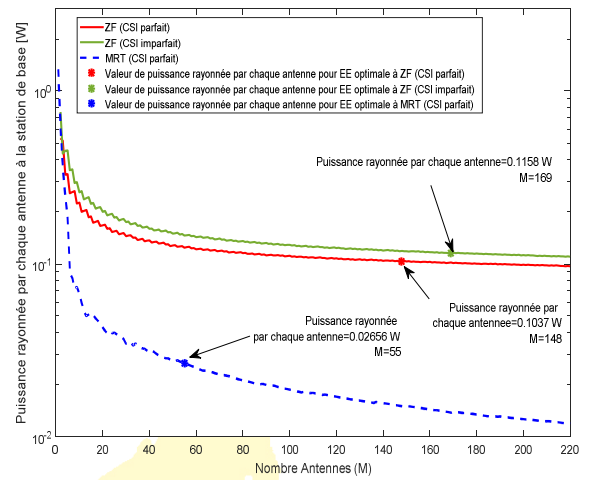
**Figure 11 :** Optimum global en traitement MRT/MRC à CSI parfait en urbain dense





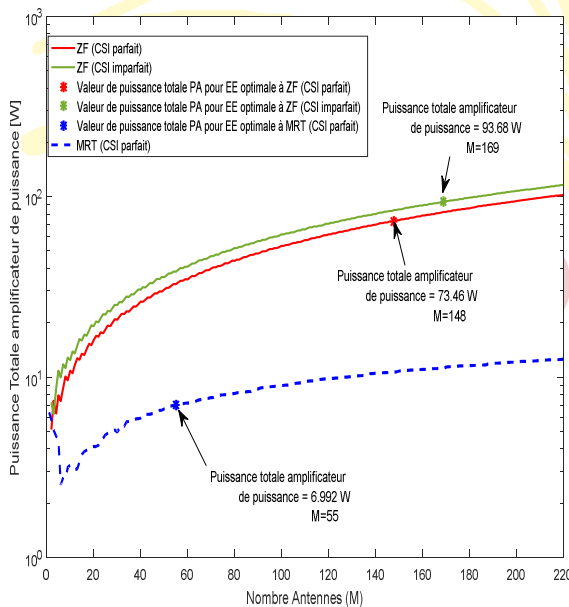
**Figure 12 :** Valeurs maximales de EE dans la plage de M pour les valeurs de K optimales pour chaque traitement en espace urbain dense

### 3.1.6.3. Résultats puissance rayonnée par chaque antenne à la station de base



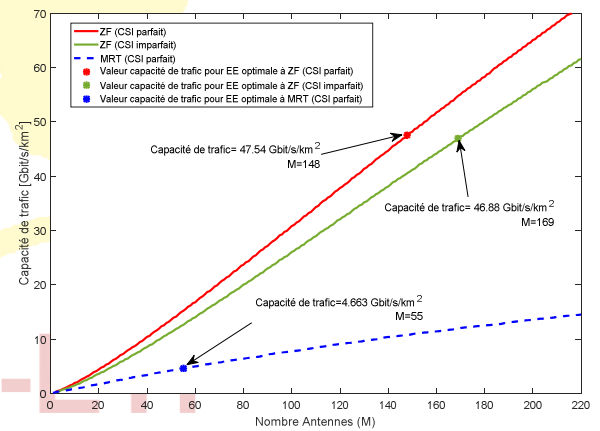
**Figure 14 :** Puissance rayonnée par chaque antenne à la station de base

### 3.1.6.2. Résultats puissance totale des amplificateurs de puissances en espace urbain



**Figure 13 :** Consommation totale d'énergie par les amplificateurs de puissance en espace urbain dense

### 3.1.6.4. Résultats Capacité de trafic dans le milieu urbain



**Figure 15 :** Capacité de trafic

### 3.1.7. Optimisation de l'efficacité Energétique de système MU- MIMO dans un bâtiment

Soit un système où l'environnement de communication est à l'intérieur d'un bâtiment ayant une surface  $S = \pi D^2$  avec  $D = 50 m$ . La

modélisation de l'affaiblissement de propagation des signaux diffère de celle utilisée dans l'environnement en espace urbain dense. On aura donc un fading à grande échelle avec un path loss à exposant de trajet égal à 1.6.

3.1.7.1. Résultats optimisations EE en traitement ZF et MRT/MRC dans un bâtiment

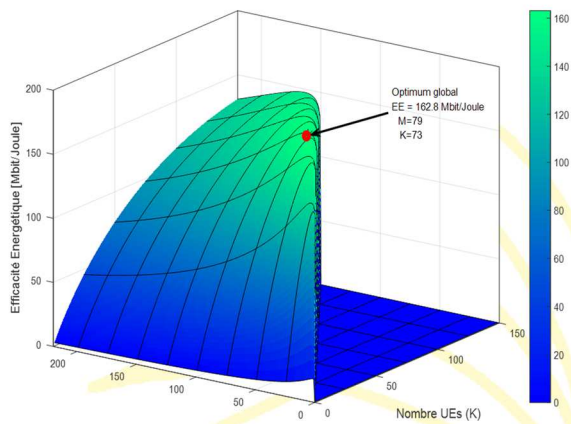


Figure 16 : Optimum global en traitement ZF à CSI parfait dans un bâtiment

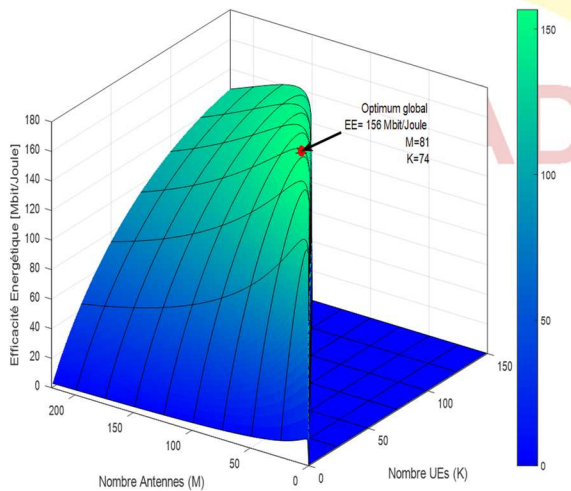


Figure 17 : Optimum global en traitement ZF à CSI imparfait dans un bâtiment

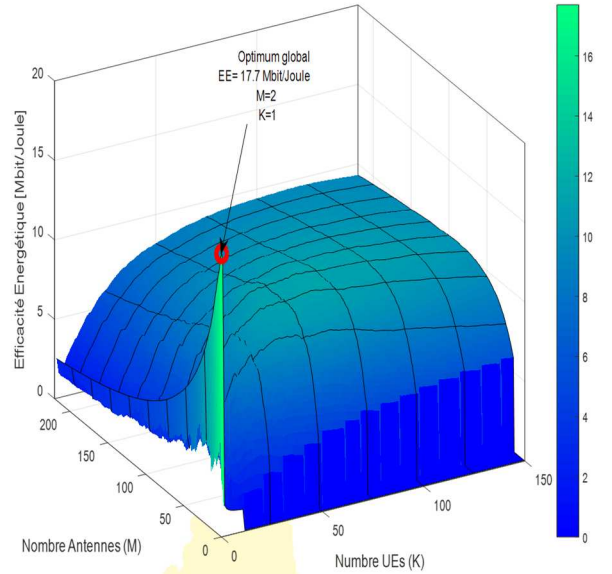


Figure 18 : Optimum global en traitement MRT/MRC à CSI parfait dans un bâtiment

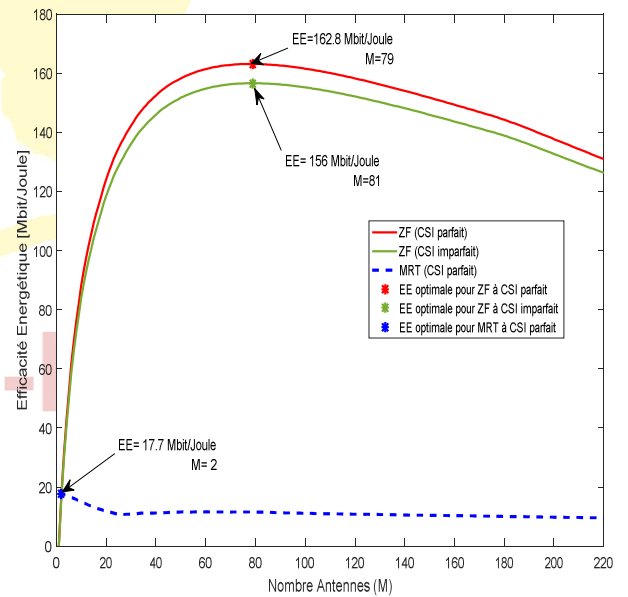


Figure 19 : Valeurs maximales de EE pour ZF à CSI parfait, ZF à CSI imparfait et MRT à CSI parfait pour chaque traitement dans un bâtiment

### 3.1.7.2. Résultats puissance totale PA dans un bâtiment

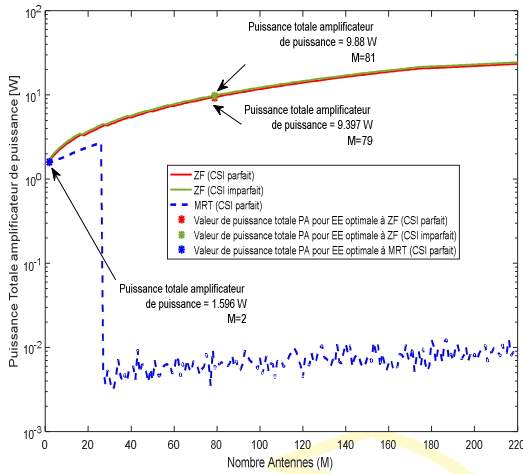


Figure 20 : Puissance totale des amplificateurs de puissance dans un bâtiment

### 3.1.7.3. Résultats puissance rayonnée par chaque antenne à la station de base

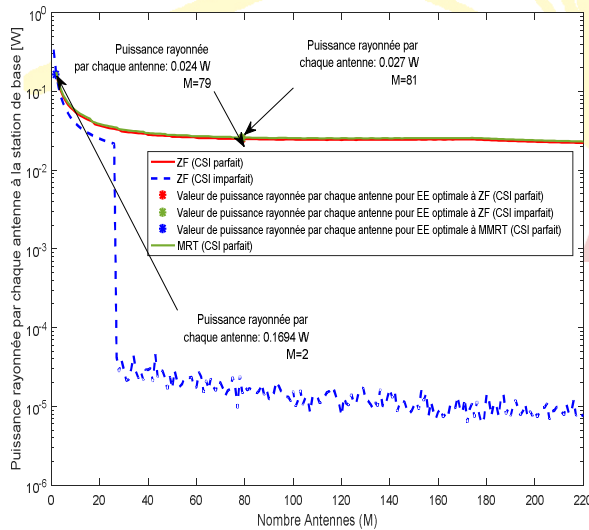


Figure 21 : Puissance rayonnée par chaque antenne à la station de base du bâtiment

### 3.1.7.4. Résultats Capacité de trafic dans un bâtiment

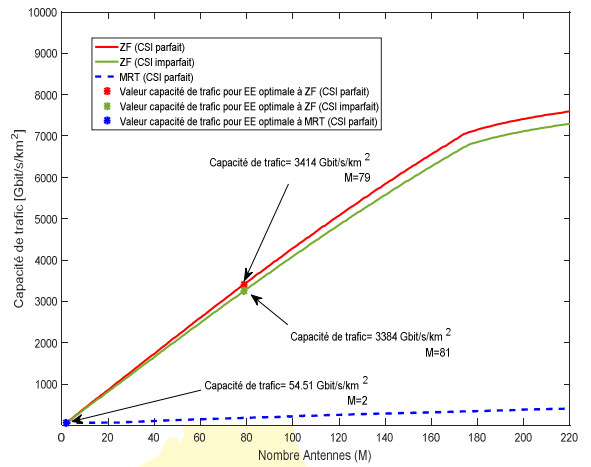


Figure 22 : Capacité de trafic dans un bâtiment

### 3.1.8. Optimisation de l'Effacité Energétique de système MU -MIMO multicellulaire dans un environnement urbain dense et dans une grande infrastructure

On considèrera un scénario multicellulaire symétrique illustré à la Figure 23 pour la simulation. La cellule du milieu sera notre domaine d'étude.

Les UE qui s'y trouvent sont placés suivant une distribution uniforme. Pour ce cas, nous ne considèrerons que les interférences qui proviennent des deux cellules les plus proches. On va prendre un scénario pour système à ZF. Dans la Figure 23, les cellules sont divisées en quatre clusters. Trois modèles différents de facteur de réutilisation pilote seront considérés : les mêmes pilotes dans toutes les cellules ( $\tau^{(ul)} = 1$ ); deux ensembles

orthogonaux de pilotes de ( $\tau^{(ul)} = 2$ ) dans cluster 1 et cluster 4 ; tous les groupes ont des pilotes orthogonaux différents ( $\tau^{(ul)} = 4$ ).

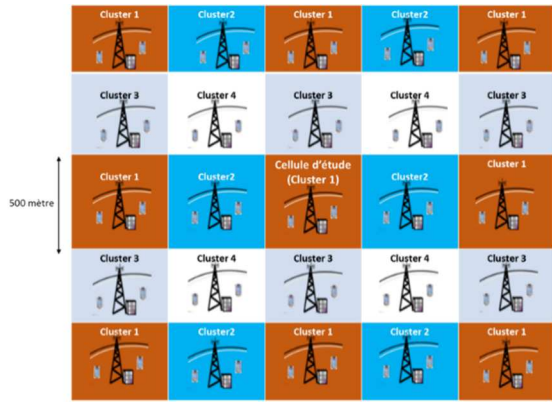


Figure 23 : Scénario multicellulaire

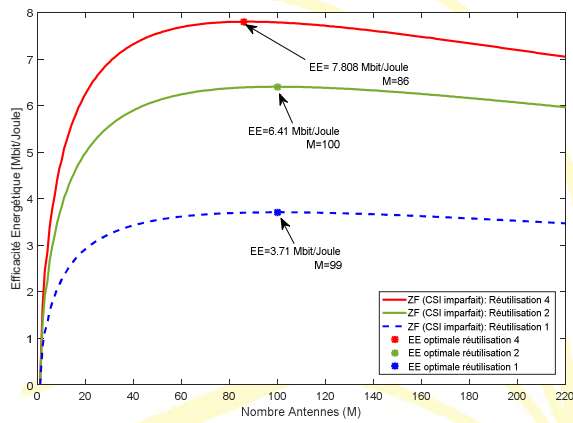


Figure 24 : EE maximales avec réutilisation pilote 1, 2, et 4, en espace urbain dense

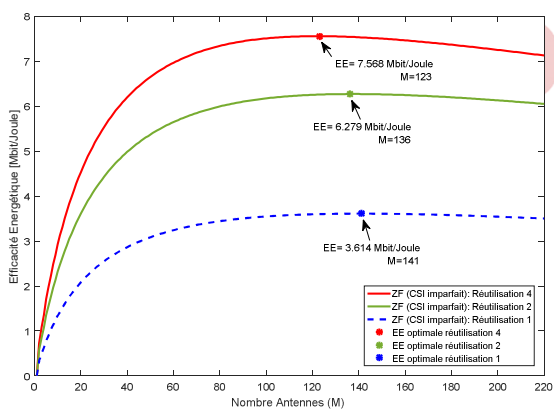


Figure 25 : EE maximales avec réutilisation pilote 1, 2, et 4, dans une grande infrastructure

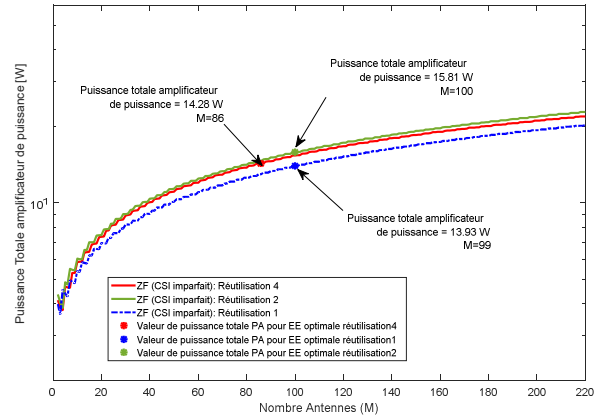


Figure 26 : Puissances totales PA en espace urbain dense

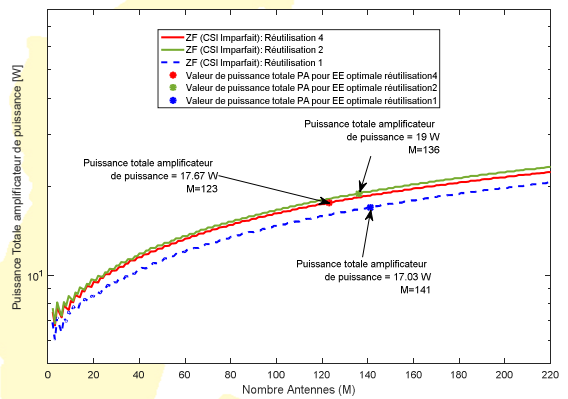


Figure 27 : Puissances totales PA dans une grande infrastructure

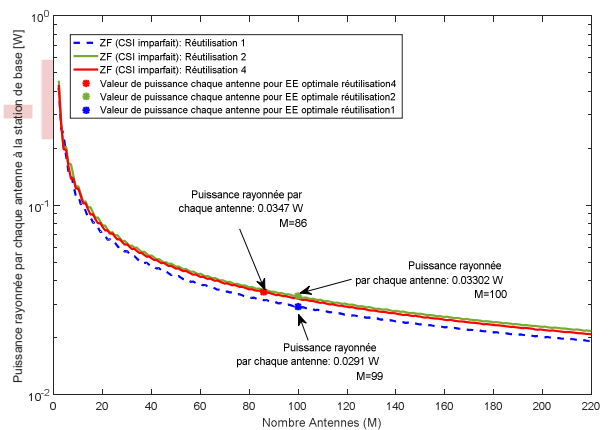
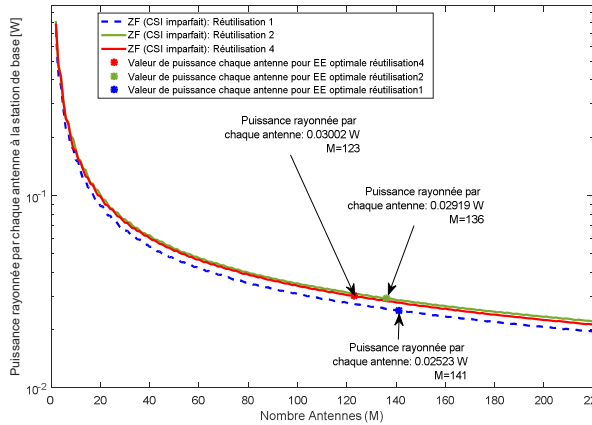
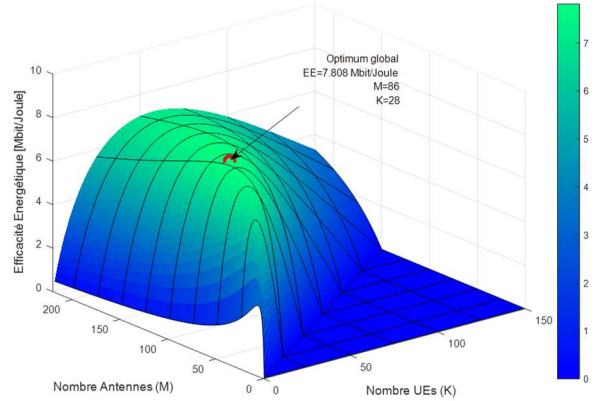


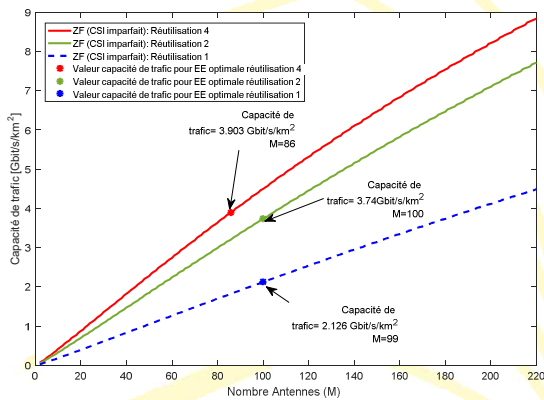
Figure 28 : Puissances rayonnées par chaque antenne de la station de base en espace urbain dense



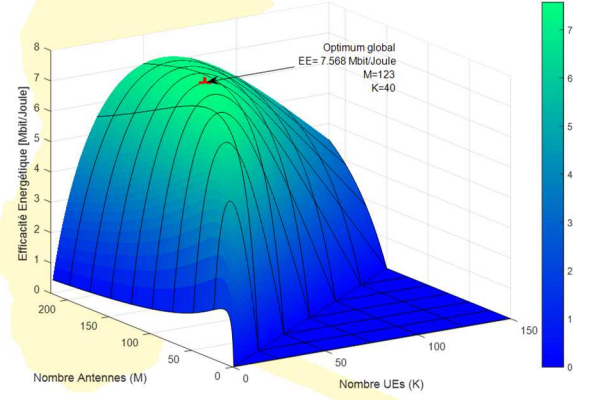
**Figure 29 :** Puissances rayonnées par chaque antenne de la station de base dans une grande infrastructure



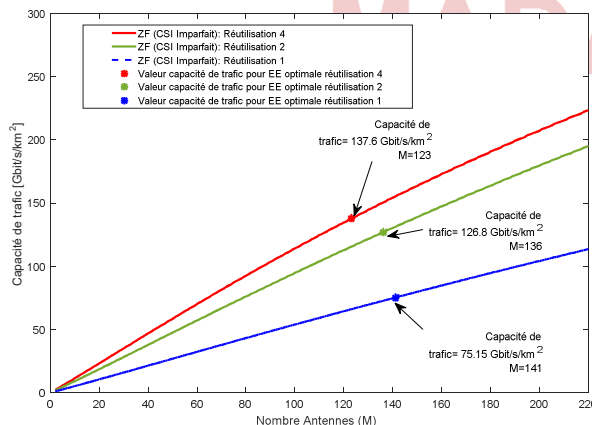
**Figure 32 :** Optimum global pour ZF avec réutilisation pilote 4 en scénario multicellulaire, en espace urbain dense



**Figure 30 :** Capacité de trafic dans un environnement urbain dense



**Figure 33 :** Optimum global pour ZF avec réutilisation pilote 4 en scénario multicellulaire, dans une grande infrastructure



**Figure 31 :** Capacité de trafic dans une grande infrastructure

### 3.2. Interprétations des résultats d'optimisation d'Efficacité Energétique dans les systèmes des bandes des 700 MHz

D'après les résultats obtenus en scénario monocellulaire, les systèmes à traitement linéaire ZF fournissent de meilleures Efficacités Energétiques et de capacités de trafic intéressantes par rapport au système à traitement MRT/MRC dans un milieu d'espace

urbain et surtout dans un bâtiment. Les valeurs optimales de EE en espace urbain dense sont obtenues avec un grand nombre d'antennes à la station de base voire 148 pour ZF à CSI parfait, 169 pour ZF à CSI imparfait et 55 pour MRT/MRC à CSI parfait. Cela dit qu'une configuration Massive MIMO garantirait une meilleure performance tout en ayant un système économe en énergie et un débit élevé pour les réseaux de télécommunications 5G. L'étude de scénario de communication dans un bâtiment nous a montré que EE optimale est fourni toujours par un grand nombre d'antennes pour ZF avec de très haut débit pouvant atteindre jusqu'à  $3414 \text{ Gbit/ s/km}^2$  pour ZF à CSI parfait mais avec seulement  $54.14 \text{ Gbit/ s/km}^2$  pour MRT/MRC à CSI parfait lorsque  $M=2$ .

D'après les résultats obtenus en scénario multicellulaire, On aperçoit que le facteur de réutilisation pilote le plus important ( $\tau^{(ul)} = 4$ ) donne la plus haute EE et la plus haute capacité de trafic. Cela montre qu'il est nécessaire d'atténuer activement la contamination pilote dans les systèmes multicellulaires. Cependant les résultats des optimums globaux fournis en scénario multicellulaire donnent des EE faibles par rapport à ceux fournis en scénario monocellulaire. Dans un espace urbain dense monocellulaire on a :  $M=169$ ,  $K=98$  et  $EE=23.37 \text{ Mbit/J}$  contre  $EE= 7.808 \text{ Mbit/J}$ ,  $M=86$  et  $K=28$ . Cela est dû aux interférences intercellulaires, qui obligent chaque cellule à

sacrifier certains degrés de liberté. Néanmoins, nous concluons que Massive MIMO est l'architecture EE optimal.

Bref, un système à traitement ZF est plus souhaitée pour les systèmes dans les bandes de 700 MHz avec une bande passante de 20 MHz pour les réseaux de télécommunications 5G si on veut atteindre les exigences en termes de performances pour ces réseaux cellulaires dans les scénarios monocellulaires et multicellulaires. Il s'avère important d'atténuer activement la contamination pilote pour des meilleurs résultats en scénario multicellulaire. Des besoins de nouveaux spectres se font entendre afin de garantir plus de débits, d'où l'exploitation de plus hautes fréquences : les ondes millimétriques.

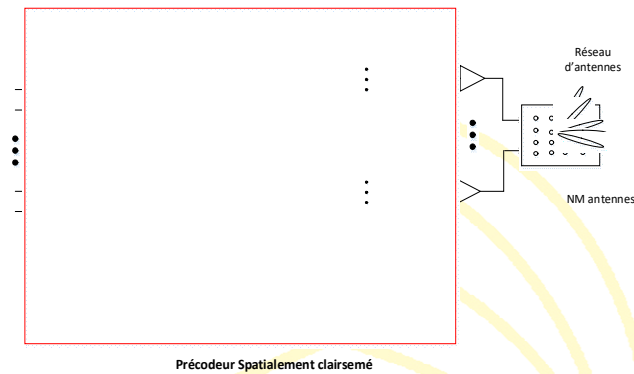
#### 4. Optimisation de l'Efficacité Spectrale

L'Efficacité Spectrale se définit comme étant le rapport entre le débit binaire (en bit/s) et la bande passante (en Hz).

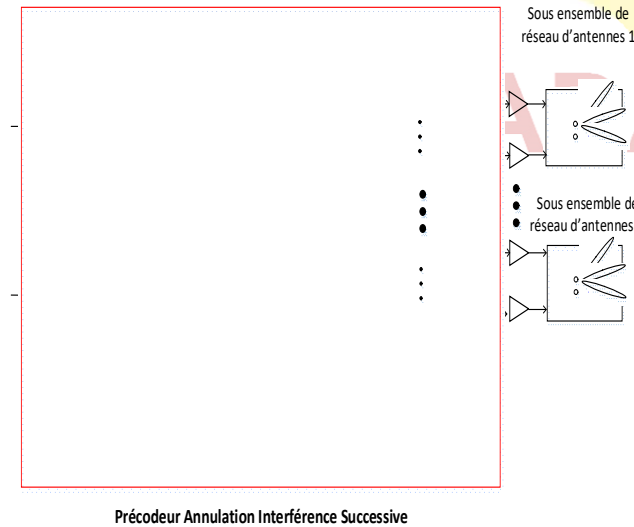
On a deux architectures de précodage hybride. La première est l'architecture à déphaseurs entièrement connectée, dans laquelle chaque chaîne RF est connectée à toutes les antennes de station de base via des déphaseurs. Il faut des milliers de déphaseurs pour réaliser le précodage analogique pour cette architecture. Chaque chaîne RF pilotera des centaines d'antennes à la station de base. La deuxième architecture est à déphaseurs partiellement connectée, chaque chaîne RF n'étant connectée

qu'à un sous-ensemble d'antennes de station de base. Cette architecture permet de réduire le nombre de déphaseurs requis. On étudiera ces deux architectures pour cette deuxième partie.

La **Figure 34** et la **Figure 35** représentent respectivement le diagramme de bloc de la structure de précodage hybride à déphaseurs entièrement connecté et à déphaseurs partiellement connecté.



**Figure 34 :** Diagramme de bloc de structure de précodage hybride à déphaseurs entièrement connecté en système mmWave Massive MIMO



**Figure 35 :** Diagramme de bloc de structure de précodage hybride à déphaseurs partiellement connecté en système mmWave Massive MIMO

**Figure 35 :** Diagramme de bloc de structure de précodage hybride à déphaseurs partiellement connecté en système mmWave Massive MIMO.

Deux algorithmes d'optimisation de précodages hybrides sont évoqués.

**Algorithme Précodage spatialement clairsemé**

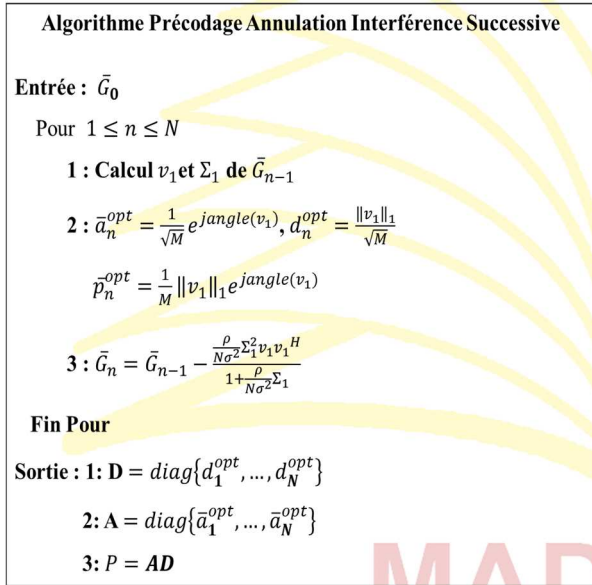
**Entrée :**  $P_{opt}$

- 1 :  $A =$  Matrice Vide
- 2 :  $P_{res} = P_{opt}$
- 3 : Pour  $i \leq N_t^{RF}$  faire
- 4 :  $\Psi = A_t^H P_{res}$
- 5 :  $k = \arg \max_{l=1, \dots, L} (\Psi \Psi^H)_{l,l}$
- 6 :  $A = [A | A_t^{(k)}]$
- 7 :  $D = (A^H A)^{-1} A^H P_{opt}$
- 8 :  $P_{res} = \frac{P_{opt} - AD}{\|P_{opt} - AD\|_F}$
- 9 : Fin Pour
- 10 :  $D = \frac{D}{\|AD\|_F}$
- 11 : retourne  $A, D$

**Figure 36 :** Algorithme spatialement clairsemé

L'algorithme de précodage spatialement clairsemé commence par trouver le vecteur  $a_t(\phi_{1,l}^t, \theta_{1,l}^t)$  selon lequel le précodage optimal a la projection maximale en calculant  $\Psi = A_t^H P_{res}$ . On calcule l'indice correspondant à cette valeur maximale. Il ajoute ensuite le vecteur colonne sélectionné  $a_t(\phi_{1,l}^t, \theta_{1,l}^t)$  au précodage RF  $A$ . Après avoir trouvé le vecteur dominant, on calcule la solution des moindres carrés en  $D$  étape 7, la contribution du vecteur sélectionné est enlevée à l'étape 8 et l'algorithme procède à la recherche de la

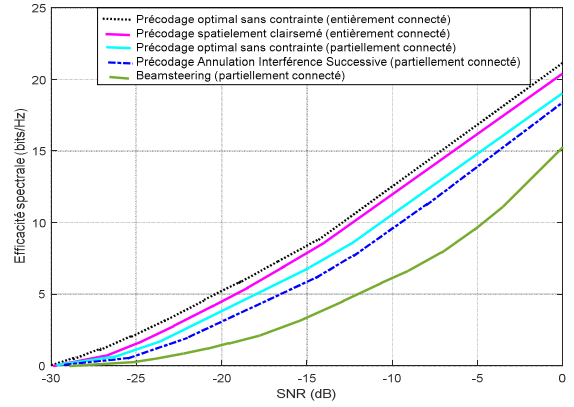
colonne sur laquelle la matrice de précodage résiduelle  $P_{res}$  a la plus grande projection. Le processus continue jusqu'à ce que tous les vecteurs de formation de faisceau RF aient été sélectionnés. A la fin des  $N_t^{RF}$  itérations, l'algorithme aurait construit une matrice de précodage RF  $N_t \times N_t^{RF} A$  et aurait trouvé le précodeur optimal  $N_t^{RF} \times N_s$  en bande de base  $D$  qui minimise  $\|P_{opt} - AD\|_F^2$ . L'étape 10 garantit que la contrainte de puissance d'émission est exactement satisfaite.



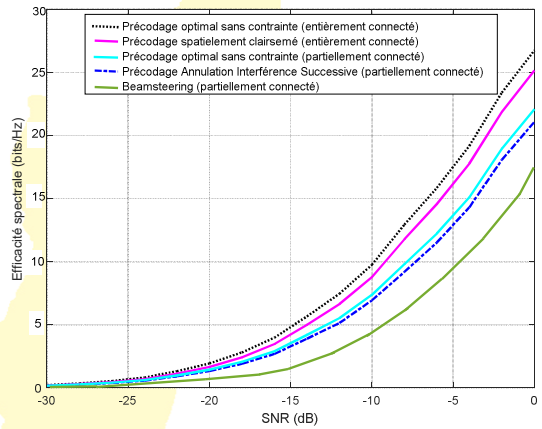
**Figure 37 :** Algorithme de précodage Annulation Interférence Successive

Les paramètres de simulation sont décrits comme suit.

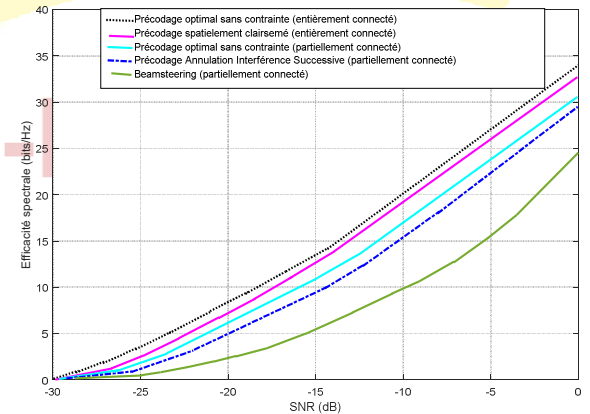
Nous générons la matrice de canaux selon le modèle de canal comme celui de Saleh-Valenzuela qui a été présenté [9].



**Figure 39 :** Comparaison précodages pour système mmWave massive MIMO  $64 \times 16$

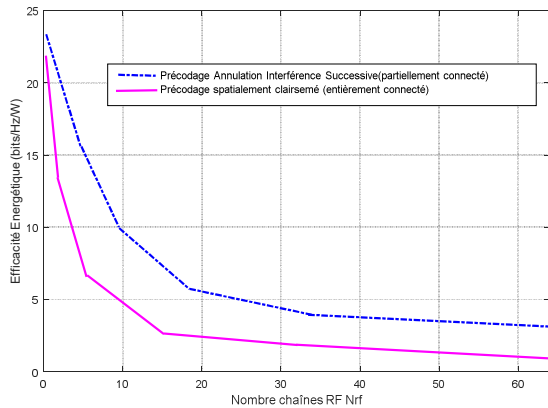


**Figure 40 :** Comparaison pour système mmWave massive MIMO  $128 \times 32$



**Figure 41 :** Comparaison pour système mmWave Massive MIMO  $256 \times 64$





**Figure 42 :** *Efficacités Energétiques pour  $64 \times 64$*

### 5. Conclusion

L'optimisation a été divisée en deux grandes parties. La première partie a montré des résultats de simulations d'un scénario de communication entre station de base et UE pour un système utilisant MU-MIMO utilisant les bandes des 700 Mhz, avec une bande passante de 20MHz dans un scénario monocellulaire et multicellulaire en espace urbain dense et dans une grande infrastructure. L'objectif étant d'avoir un système avec Efficacité Energétique meilleure et en maintenant un débit de données élevées également. On a pu voir que l'Efficacité Energétique peut être maximisée par l'interaction des différents paramètres clés du système tels que le nombre d'antennes à la station de base, le nombre d'UEs et le choix de puissance de transmission dans les systèmes MIMO. On a considéré les modèles de propagation d'ondes, les caractéristiques de l'environnement de communication et des

modèles de consommation d'énergie par les différents systèmes englobant le réseau à étudier. On a finalisé qu'un système MIMO d'une centaine d'antennes à la station de base est intéressant pour maximiser l'Efficacité Energétique du système de réseaux de télécommunications, quel que soit l'environnement d'étude. Le traitement à ZF est meilleur dans toutes les simulations effectuées par rapport au traitement MRT/MRC et cela en raison de la suppression d'interférences par ce premier. Une meilleure Efficacité Energétique et une meilleure capacité de trafic sont remarquées pour le traitement ZF par rapport à MRT/MRC.

Dans le cas d'un système multicellulaire, il est nécessaire d'atténuer activement la contamination pilote c'est-à-dire bien choisir le facteur de réutilisation pilote pour avoir un système bien performant. Au final, cette première partie a conclu d'après les optimums globaux obtenus que Massive MIMO dans les réseaux cellulaires apportent des améliorations et peut atteindre les défis d'énergie et de débits intéressants. La deuxième partie de l'optimisation travaille sur les systèmes à ondes millimétriques utilisant de plus hautes fréquences, les fréquences supérieures de 30 GHz à 300 GHz. Encore plusieurs antennes peuvent être déployés en raison des caractéristiques liés à ces fréquences pour ces systèmes voire jusqu'à 200 antennes. Différents

précodages ont été analysés et ont prouvés que les systèmes à précodage hybride sont les meilleurs candidats pour un système à ondes millimétriques afin de garantir un débit de donnée élevé et un système plus économe en énergie. Vu les résultats de comparaisons entre les précodages hybrides, même si le système à précodage Spatialement clairsemé à déphaseurs entièrement connecté présente d'efficacité Spectrale légèrement supérieure à celui à précodage Annulation Interférence Successive à déphaseurs partiellement connectée, il est préférable d'utiliser le second, car ce dernier est plus économe en énergie.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Wu, H. Huang, C. Wang, Y. Pan, « *5G Enabled Internet Of Thing* », CRC Press, 2019
- [2] E. Dahlman, S. Parvall, J. Sköld, « *5G NR : The Next Generation Wireless Access* », Academic Press, 2018.
- [3] J. MacIntyre, I. Maglogiannis, L. Iliadis, E. Pimenidis, « *Artificial Intelligence Applications and Innovations* », IFIP International Federation for Information Processing, 2019
- [4] A. Elnashar, M. El-Saidny, « *Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT* », Wiley, 2018”
- [5] E. Björnson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, « *Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits*, » IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 60, no. 11, pp. 7112–7139, 2014.
- [6] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, « *Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?* » IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 31, no. 2, pp. 160–171, 2013.
- [7] H. Ngo, E. Larsson, and T. Marzetta, « *Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems*, » IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, 2013
- [8] E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, and M. Debbah, « *Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer?* » IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 6, pp. 3059 – 3075, Jun. 2015
- [9] Shahid Mumtaz, Jonathan Rodriguez , Linglong Dai « *mmWave Massive MIMO :A Paradigm for 5G* », Academic Press, 2016