

Analyse, Diagnostics ET Optimisation Des Antennes Imprimees Utilisees Dans Le Reseau De Telecommunication : Airtel Boma en RDC

UMBA MOMBO Edouard
Chef de travaux ISTA/LB

BULAMBO DIBWE Henri
Professeur Associé
UNIVERSITE PEDAGOGIQUE NATIONALE (UPN) DRCONGO

Résumé

Le thème « Analyse, diagnostic et optimisation des performances des antennes imprimées pour le réseau de télécommunication : Airtel Boma en RDC » porte sur l'étude et l'amélioration des antennes imprimées utilisées dans les systèmes de télécommunication mobile, en prenant comme cadre d'application le réseau Airtel à Boma, en République démocratique du Congo.

L'objectif principal est d'évaluer les performances des antennes, d'identifier les différents facteurs responsables de leur dégradation et de proposer des solutions permettant d'améliorer la qualité de la couverture et des communications. L'analyse s'intéresse notamment à des paramètres tels que la fréquence de fonctionnement, le coefficient de réflexion (S_{11}), le VSWR, le gain, la directivité, la bande passante, l'impédance et le diagramme de rayonnement.

Le diagnostic permet ensuite de déterminer les problèmes pouvant affecter les performances du réseau dans la zone de Boma, notamment les pertes de propagation, les obstacles, les interférences, la mauvaise orientation ou le mauvais positionnement des antennes, ainsi que les caractéristiques du milieu de propagation.

L'optimisation consiste à agir sur la conception et les conditions d'utilisation de l'antenne afin d'obtenir de meilleures performances. Elle peut notamment passer par l'ajustement des dimensions de l'antenne imprimée, du substrat, de l'alimentation, de la fréquence de résonance et de la configuration de l'installation. Des outils de simulation électromagnétique peuvent être utilisés pour comparer les différentes configurations avant leur éventuelle mise en œuvre.

En définitive, cette étude vise à améliorer la couverture, la qualité du signal, le débit et la fiabilité des communications du réseau Airtel à Boma, tout en proposant une approche technique permettant d'optimiser les antennes imprimées en fonction des conditions spécifiques de la RDC. Elle contribue ainsi à l'amélioration des infrastructures de télécommunication et à une meilleure qualité de service pour les utilisateurs.

Mots-clés : Antenne imprimée, Bande passante, Directivité, optimisation, Réseau 4G/5G

Abstract

The study titled "Analysis, diagnosis, and performance optimization of printed antennas for the telecommunications network: Airtel Boma in the DRC" focuses on examining and improving printed antennas used in mobile telecommunication systems, specifically within the context of the Airtel network in Boma, Democratic Republic of the Congo.

The primary objective is to evaluate antenna performance, identify factors contributing to performance degradation, and propose solutions to enhance coverage and communication quality. The analysis focuses on key parameters such as operating frequency, reflection coefficient (S_{11}), VSWR, gain, directivity, bandwidth, impedance, and radiation pattern.

The diagnostic phase identifies issues affecting network performance in the Boma area—such as propagation losses, obstacles, interference, improper antenna orientation or positioning, and the characteristics of the propagation environment.

Optimization involves modifying the antenna's design and operating conditions to achieve superior performance. This may entail adjusting the dimensions of the printed antenna, the substrate, the feed mechanism, the resonant frequency, and the installation configuration. Electromagnetic simulation tools can be used to compare various configurations prior to potential implementation.

Ultimately, this study aims to improve the coverage, signal quality, data rate, and communication reliability of the Airtel network in Boma, while proposing a technical approach to optimize printed antennas for the specific

conditions found in the DRC. It thus contributes to enhancing telecommunications infrastructure and delivering better service quality to users.

Keywords: Printed antenna, Bandwidth, Directivity, Optimization, 4G/5G network

I. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de l'essor des technologies de communication sans fil, la qualité et la fiabilité des liaisons radio dépendent fortement des performances des antennes utilisées. Les opérateurs de téléphonie mobile, tels qu'Airtel, recherchent en permanence des solutions technologiques permettant d'optimiser la couverture du signal, d'améliorer le débit de transmission et de réduire les pertes énergétiques.

Parmi les différentes structures d'antennes disponibles, les antennes imprimées (ou antennes à microbandes) occupent une place importante grâce à leur compactibilité, leur faible coût de fabrication, leur intégration aisée aux circuits électroniques et leur adaptabilité aux différentes bandes de fréquences utilisées par les réseaux cellulaires.

A Boma ; ville stratégique dans le déploiement du réseau Airtel [18], les stations d'émission doivent répondre à des exigences techniques précises en matière de bande passante et de directivité afin d'assurer une couverture homogène et stable [22], [24].

L'analyse de ces deux paramètres est donc essentielle :

- La bande passante détermine la capacité de l'antenne à transmettre efficacement les signaux sur une plage de fréquences donnée, influençant directement la qualité du service et la compatibilité avec les différentes normes de communication (2G, 3G, 4G voire 5G) ;
- La directivité, quant à elle, indique la concentration du rayonnement électromagnétique dans une direction donnée, permettant d'optimiser la portée et de minimiser les interférences.

Cet article se propose d'étudier et d'analyser la bande passante, la directivité l'optimisation des paramètres des stations d'émission d'Airtel à Boma, en vue d'évaluer leurs performances et de proposer d'éventuelles améliorations pour une meilleure efficacité du réseau. Cette publication s'appuiera sur des simulations électromagnétiques, des mesures expérimentales et une comparaison avec les standards techniques utilisés.

II. MÉTHODOLOGIE ET MOYENS D'ÉTUDE

2.1. Milieu d'études.

Boma est une ville portuaire située dans le sud-ouest de la République Démocratique du Congo, dans la province du Kongo-Central (anciennement Bas-Congo). Elle est traversée par le fleuve Congo, ce qui en fait un point stratégique historique en économie.

Sur la rive droite du fleuve Congo, à environ 100 km de l'embouchure du fleuve dans l'océan Atlantique. Les caractéristiques de la ville sont :

- **Altitude** : environ 60 mètres.
- **Climat** : tropical humide avec deux saisons principales – une saison sèche : du mois de mai à septembre et une saison des pluies : du mois octobre au mois d'avril.
- **Population** : environ 200.000 à 300.000 habitants (chiffres approximatifs, car les recensements ne sont pas toujours récents ou précis).
- **Température** moyenne annuelle entre 24 °C et 28 °C
- **Précipitation annuelle** : environ 800 à 1 000 mm
- La superficie totale de la ville de Boma est d'environ **65 km²**
- La ville de Boma est subdivisée en trois communes principales

Tableau 2.1 Présentation de la ville des Boma

Commune	Caractéristiques principales
Kalamu	Quartier administratif et résidentiel, avec plusieurs infrastructures publiques
Nzadi	Commune portuaire, comprend le port fluvial et les zones d'activités économiques
Kabondo	Zone plus périphérique, à vocation résidentielle et commerciale.

2.2. Couverture réseau d'Airtel dans la ville de Boma

L'opérateur Airtel RDC dispose de plusieurs sites d'antennes implantés dans la ville de Boma afin d'assurer la continuité et la qualité de ses services mobiles. L'emplacement de ces antennes a été déterminé en

fonction de la densité de la population, de la topographie urbaine et des besoins en connectivité des différents quartiers.

La section suivante présente la localisation des principaux sites d'émission d'Airtel dans la ville de Boma, accompagnée de leurs coordonnées géographiques et de la couverture associée à chaque technologie déployée.

2.3. Sites d'emplacement

- Muba (backbone), Gbodo, Kienge, Mabenga (château), Nzadi, Regideso, Sango ndamu, ferme de Boma, Kiakka (relief), Congo Oil, Château, Tadi : (Elle relie par fibre optique), Reforme, CBCO : (Elle relie par fibre optique), Tshikonde, Boma ouest

2.4. Matériels et relevés des données

Les matériels utilisés pour ce travail :

- TEMS,
- Données drive test
- Les données Statistiques Airtel 2G pour les années 2023, 2024, 2025 et les KPI de l'ARPTC 2025.

III. CALCUL

3.1. Les caractéristiques des antennes imprimées

Les antennes présentent deux grandes caractéristiques : les caractéristiques électriques telles que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et la bande passante ; et les caractéristiques de rayonnement telles que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité et la polarisation d'antenne

3.1.1. Impédance d'entrée (Z_{in})

L'impédance d'entrée est nécessaire pour adapter l'antenne au générateur qui l'alimente, ou en réception pour assurer un transfert maximal de puissance active entre l'alimentation et l'antenne (Taleb S, 2016). L'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe de la forme :

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (1.1)$$

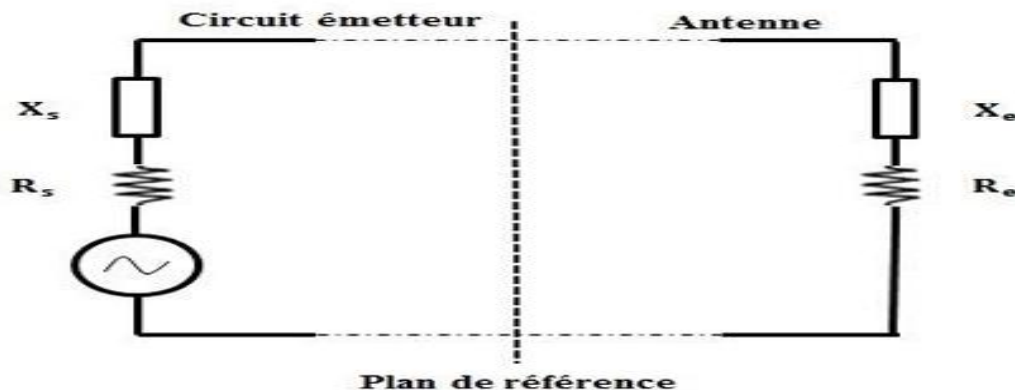


Figure 3.1 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (1.2)$$

Où,

R_e : La partie réelle caractérise la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de pertes diverses dans sa structure (effet joule, onde de surface, etc...).

X_e : La partie imaginaire caractérise la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et au déphasage.

Chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne :

$$Z_s = R_s + jX_s$$

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne, son expression est donnée par cette formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (1.3)$$

Z_0 : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

3.1.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est équivalent au paramètre S_{11} de la matrice de dispersion, une antenne peut être analysée comme un quadripôle (Chaabane A, 2017), où les paramètres S de la matrice sont illustrés dans la figure (I.5).

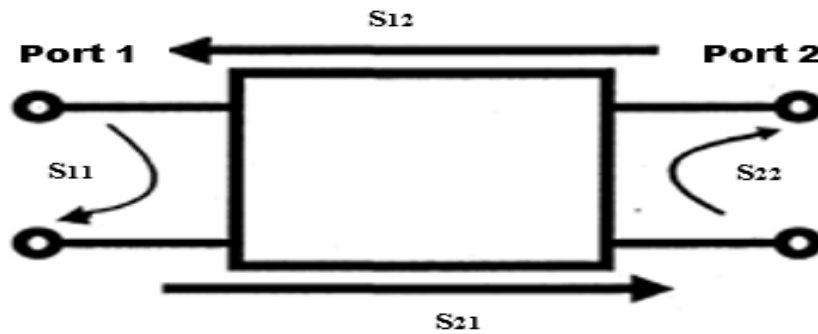


Figure 3.2 : Paramètres S pour un circuit à deux ports (Pozar, D. M. 2012)

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchie à l'entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il est directement lié à l'impédance caractéristique et l'impédance d'entrée selon la relation suivante :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{\text{entrée}} - Z_c}{Z_{\text{entrée}} + Z_c} \quad (1.4)$$

Avec :

- Z_e : impédance d'entrée de l'antenne.
- Z_c : impédance caractéristique de la ligne.

En l'exprime en décibels par :

$$S_{11} = 20 \log (|\Gamma|) \quad (1.5)$$

Condition d'adaptation : **Pour** $Z_{\text{entré}} = Z_c \Leftrightarrow S_{11} = 0$

3.1.2. Le taux d'onde stationnaire (TOS)

Le taux d'onde stationnaire (TOS) ou en anglais Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre la ligne de transmission et l'antenne (Barkat Z, 2020). Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur) (Reha A, 2017).

L'amplitude de cette onde stationnaire n'est pas constante le long de la ligne, en effet elle est maximale en certains endroits (ventres) et minimale à d'autres (nœuds). Le rapport d'onde stationnaire est le rapport entre la tension maximale et minimale de cette onde ou bien donné en fonction du coefficient de réflexion Γ .

$$TOS = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (1.6)$$

3.1.3. La bande passante (BP)

La bande passante est la plage de fréquence sur laquelle le coefficient de réflexion ne dépasse pas un certain seuil ($S_{11} < -10$ dB) ; à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. L'antenne est considérée comme étant suffisamment bien adaptée au circuit et présente donc peu de perte par désadaptation (Souai S 2019).

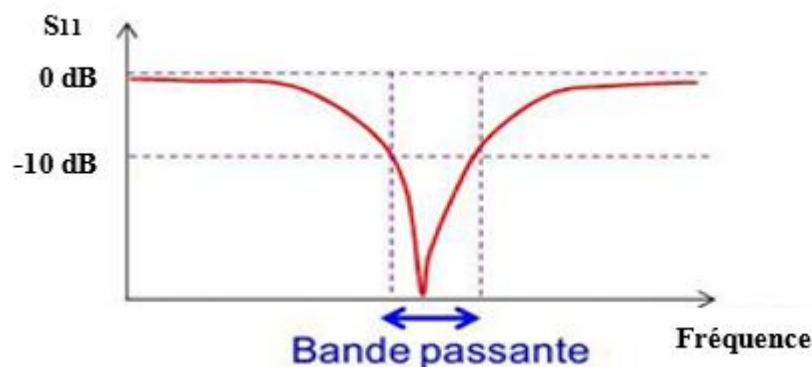


Figure 3.3 : Bande passante d'une antenne (Balanis, C. A. 2016)

Elle détermine si l'antenne peut transmettre ou recevoir des signaux sur la gamme de fréquences donnée, et souvent défini par un ROS (VSWR) ≤ 2 .

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale $f_{\min}$ et une valeur maximale $f_{\max}$. La bande passante est donnée par :

$$BP_{LB} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (1.7)$$

$$BP_{BE}(\%) = \left[\frac{f_{max} \cdot f_{min}}{f_c} \right] 100 \quad (1.8)$$

Avec :

- f_{max} : la fréquence maximale.
- f_{min} : la fréquence minimale.
- f_c : la fréquence centrale.

3.1.4. Gain (G)

Par définition le gain est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope, il est exprimé en dBi ou en dbd

Plus le gain est élevé, plus l'antenne rayonne efficacement dans une direction précise. Le rapport de gain est donné par :

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (dBi) \quad (1.9)$$

3.1.5. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement décrit les variations de la puissance rayonnée par l'antenne par les différentes directions de l'espace. La direction pour laquelle la puissance rayonnée est maximale est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne (Nadir H, 2018).

La fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne $r(\theta, \phi)$ est donnée par :

$$r(\vartheta, \varphi) = \frac{P(\vartheta, \varphi)}{P_0(\vartheta_0, \varphi_0)} \quad (1.10)$$

Avec :

- $P(\theta, \phi)$: la puissance rayonnée par unité d'angle solide.
- $P_0(\vartheta_0, \varphi_0)$: la puissance maximale

3.2. . Détermination des nombre d'abonnés, des sites et cellules

$$D = \frac{N_B}{S} \quad (1.11)$$

a) Estimation du nombre d'abonnés potentiels : N_a

En estimant avoir 1 téléphone pour 100 habitants à cause de l'afflux des gens dans cette zone pendant les heures de pointe :

$$N_a = \frac{N_h}{100} \quad (1.12)$$

En prenant comme trafic moyen par abonné potentiel = 0,025 Erlang, nous obtenons :

$$T_s = N_a \times 0,025 \quad (1.13)$$

b) Nombre de canaux de trafic dans le site : N_s

Pour une probabilité de perte $P_p = 5\%$ (ou $P_p = 0,05$) et connaissant T_s , nous obtenons N_s à partir de la « table d'Erlang » : $N_s = 70$ canaux.

Nous avons deux méthodes pour déterminer le nombre de canaux qui sont :

- La table d'Erlang ;
- La méthode d'approximation de RIGAULT.

La table d'Erlang en annexe I est un outil fondamental et historique pour analyser et dimensionner un réseau. Il permet de trouver un équilibre entre :

- capacité du système
- qualité de service
- cout d'infrastructure

Il est un guide pratique pour décider combien de ressources il faut pour éviter que les appels soient bloqués.

a) Rayon d'une cellule : R_c

La superficie couverte par une cellule est obtenue en divisant la superficie du site (la zone à couvrir) par le nombre des cellules :

$$S_c = \frac{S}{N_c} \quad (1.14)$$

IV. PRÉSENTATION ET ANALYSES DES RÉSULTATS

Le tableau suivant nous donne les différentes valeurs calculées en utilisant les formules (1.10), (1.11) ; (1.12), (1.13) et (1.14) suivantes :

Tableau 4.1 Tableau de résultats selon le quartier

N°	ZONE	Densité	Superficie (km ²)	Rayon d'une cellule (km)	Nombre de sites	Abonnés potentiels
01	NORD	6,481	23,494	0,86	9	1,47
02	OUEST	5,71	22,681	1,34	9	595,42
03	CENTRE	12,76	20,825	0,83	9	1,500
TOTAL					27	598,39

Le tableau 4.1 : de résultats obtenu est un outil très important pour l'évaluation et l'analyse des nombres de canaux de trafic dans un site de télécommunication car il détermine :

La zone de couverture, la densité, la superficie, le rayon d'une cellule, le nombre des sites, les nombres des abonnés potentiels

La figure ci-dessous nous donne le modèle de la transmission dans la ville de Boma

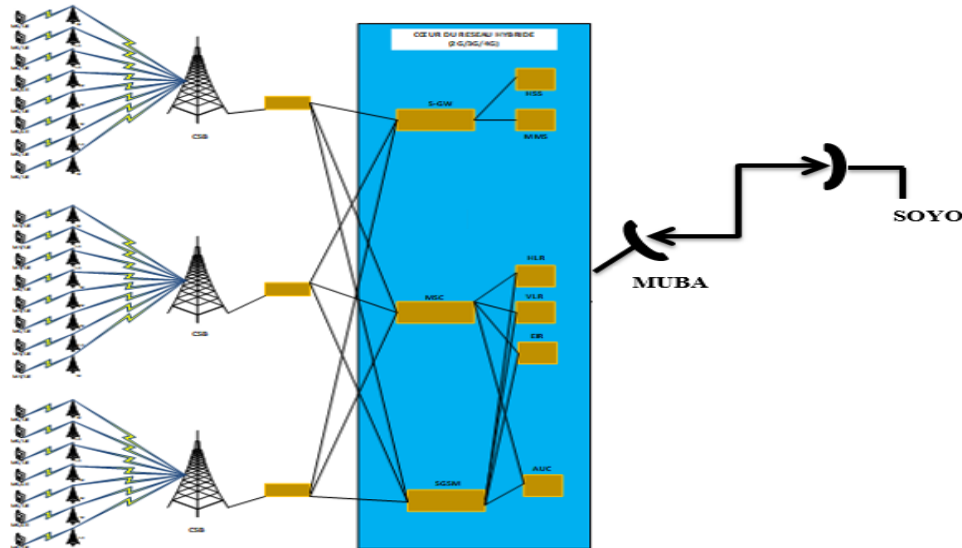


Figure 4.1 : Plan de transmission de Airtel Boma (AIRTEL, 2025).

La figure ci-dessus montre la connectivité de la transmission dans la ville de Boma. La liaison **SOYO** → **MUBA** peut être décrite comme un segment du réseau de transmission permettant de transporter le trafic généré par les utilisateurs des sites de télécommunication. Le site de **MUBA** collecte le trafic provenant des stations radio locales, puis celui-ci est transmis vers **SOYO**, qui peut jouer le rôle de point intermédiaire ou de nœud de transport selon l'architecture réelle du réseau.

4.2. ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse des résultats doit se faire selon les différentes KPI fixées par les fabricants des matériels et des équipements et l'opérateur de télécommunications. Voici les différents KPI que l'ARPTC impose aux opérateurs des télécommunications en RDCongo [17]

Tableau 4.2 : KPI en 2G (ARPTC 2025)

CSSR	Call drop	Call setup time	RX level (	RX qual	MOS=3.5	ECNO >= -12db	RSCP > -85
95%	<=2%	8 secondes	92%	80%	75%	96%	92%

Tableau 4.3 : KPI en 3 G (ARPTC 2025)

CSSR	Call drop	Call setup time	Latence ou temps de réponse	ECN >= -12db	RSCP >= -85
95%	<= 2%	8 secondes	<250 ms	96%	92%

Tableau 4.4 : KPI en 4G (ARPTC 2025)

Taux d'intégrité et succès data	Taux de congestion réseau	Taux de coupure	Mobilité	Trafic PS	Radio network availability
99%	<= 2%	0.25	99%	99%	99%

Source ARPTC 2025

4.2.1. Analyse du coefficient de réflexion S11 (Balanis, A, 2016)

Le paramètre S11 représente le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne. Il constitue l'un des principaux indicateurs de la qualité de l'adaptation entre l'antenne et sa ligne d'alimentation.

Le paramètre **S11** permet d'évaluer la quantité de puissance réfléchie vers la source au niveau de l'antenne. Plus la valeur de S11 est faible (plus négative), meilleure est l'adaptation de l'antenne. Le seuil de référence généralement utilisé est **-10 dB**.

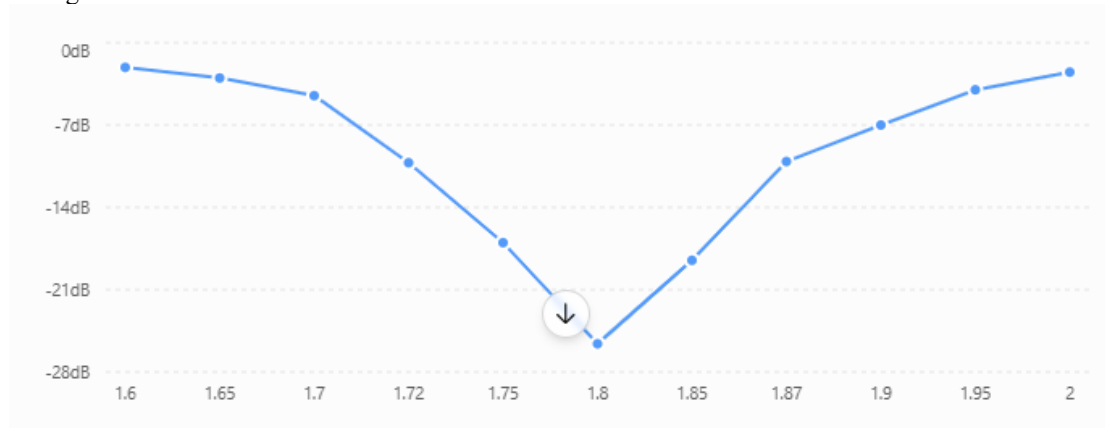


Figure 4.2 : Courbe d'analyse du coefficient de réflexion S11 (Balanis, C. A. 2016).

Interprétation de la courbe

La courbe montre que le coefficient de réflexion **S11** diminue progressivement lorsque la fréquence se rapproche de **1,80 GHz**. Le minimum est atteint à cette fréquence, avec une valeur d'environ **-25,6 dB**.

Cette valeur indique une **très bonne adaptation d'impédance** entre l'antenne et la ligne d'alimentation. Une faible valeur de S11 signifie qu'une faible partie de la puissance incidente est réfléchie vers la source et qu'une plus grande partie est transférée à l'antenne.

On constate également que la courbe reste inférieure à **-10 dB** approximativement entre **1,72 GHz** et **1,87 GHz**. Cette plage correspond à la bande de fonctionnement de l'antenne selon le critère

$$BW = 1,87 - 1,72 = 0,15 \text{ GHz}$$

$$BW = 150 \text{ MHz}$$

La simulation montre que l'antenne initiale présente une adaptation relativement insuffisante, avec un S11 supérieur à **-10 dB** autour de la fréquence de fonctionnement.

Après optimisation, le minimum du coefficient de réflexion atteint par exemple **-25,6 dB** à **1,80 GHz**. Cette amélioration traduit une meilleure adaptation d'impédance entre la ligne d'alimentation et l'antenne.

On peut donc conclure que l'optimisation géométrique a permis de réduire considérablement la puissance réfléchie.

Le S11 est particulièrement important dans l'étude des antennes imprimées puisqu'il permet de déterminer directement la qualité de l'adaptation de l'antenne au circuit d'alimentation.

4.2.2 Analyse du VSWR

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ou rapport d'ondes stationnaires permet également d'évaluer l'adaptation de l'antenne. Pour une bonne adaptation, on recherche généralement une valeur proche de 1. Une valeur $VSWR \leq 2$ est couramment retenue comme critère d'adaptation acceptable.

4.3. Optimisation :

4.3.1. Avant optimisation (Balanis, C. A. 2016).

La courbe ci-dessous présente un **exemple illustratif** du comportement de l'antenne **avant optimisation**. Elle permet de mettre en évidence une adaptation initialement insuffisante.

Coefficient de réflexion S11 avant optimisation

Evolution illustrative du S11 de l'antenne imprimée avant modification de ses paramètres géométriques.

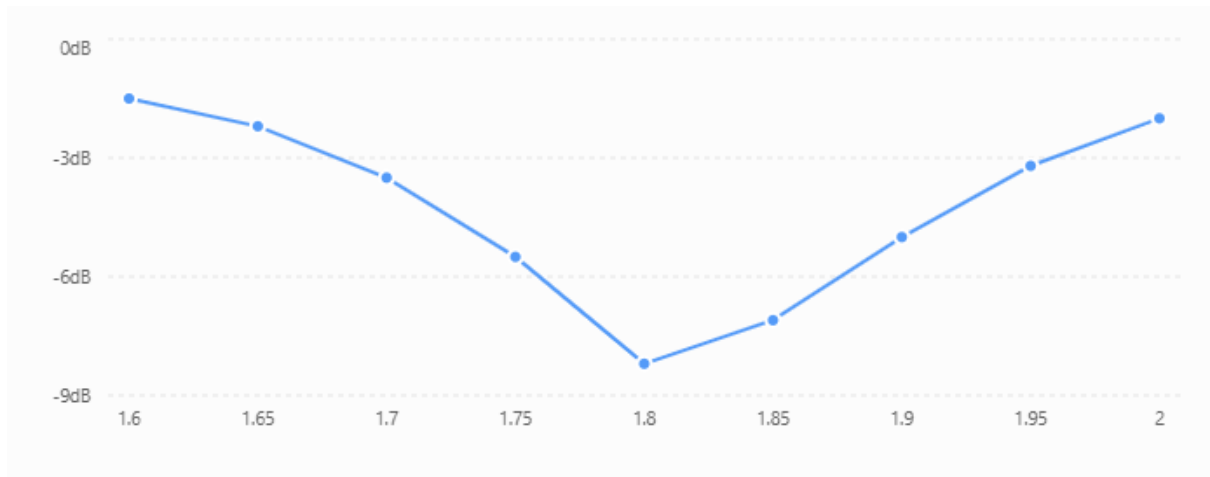


Figure 4.3 : Courbe représentant les comportements de l'antenne avant optimisation. (Balanis, C. A. 2016).

Interprétation

Avant optimisation, la courbe présente un minimum de $S_{11} \approx -8,2 \text{ dB}$ autour de $1,80 \text{ GHz}$. Cette valeur est supérieure à -10 dB , ce qui indique que l'antenne n'est pas suffisamment bien adaptée à la ligne d'alimentation.

La puissance réfléchie est donc relativement importante. La bande de fonctionnement répondant au critère $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ est pratiquement inexistante dans cet exemple.

Cette situation peut être due à plusieurs facteurs :

- dimensions inadéquates du patch ;
- mauvaise position du point d'alimentation ;
- dimensions insuffisantes du plan de masse ;
- choix du substrat ;
- épaisseur du substrat ;
- largeur de la ligne microstrip.

4.3.2. Après optimisation (Balanis, C. A. 2016).

Après optimisation des paramètres géométriques de l'antenne, on s'attend à une amélioration nette de l'adaptation d'impédance. La courbe ci-dessous reprend les valeurs illustratives utilisées précédemment.

Evolution illustrative du coefficient de réflexion S_{11} après optimisation de l'antenne imprimée.

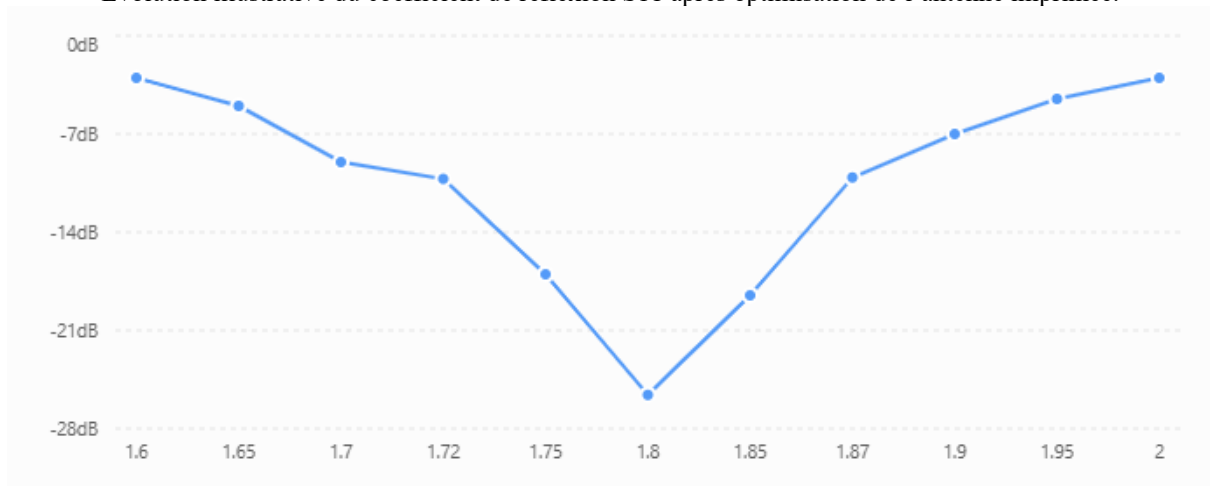


Figure 4.4 : Coefficient de réflexion S_{11} après optimisation (Balanis, C. A. 2016).

Interprétation

Après optimisation, le coefficient de réflexion présente un minimum d'environ $-25,6 \text{ dB}$ à $1,80 \text{ GHz}$. Cette valeur est nettement inférieure au seuil de -10 dB , ce qui traduit une **très bonne adaptation** de l'antenne à la ligne d'alimentation.

La courbe montre également que :

- à $1,72 \text{ GHz}$, $S_{11} \approx -10,2 \text{ dB}$;
- à $1,80 \text{ GHz}$, $S_{11} \approx -25,6 \text{ dB}$;

- à **1,87 GHz**, $S_{11} \approx -10,1 \text{ dB}$.

La bande passante correspondant au critère $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ est donc approximativement :

$$BW = 1,87 - 1,72 = 0,15 \text{ GHz}$$

$$BW = 150 \text{ MHz}$$

Discussion

Les résultats montrent qu'après optimisation, la partie réelle de l'impédance se rapproche de 50Ω , tandis que la partie imaginaire tend vers zéro.

L'antenne optimisée est donc mieux adaptée à la ligne de transmission. Cette amélioration peut être obtenue par la modification de plusieurs paramètres géométriques :

- longueur du patch ; largeur du patch ; position du point d'alimentation ; largeur de la ligne microstrip ; dimensions du plan de masse ; dimensions et position des fentes ; épaisseur du substrat.

4.3.4. Analyse de la bande passante

Diagramme de rayonnement de l'antenne imprimée

Courbe illustrative du gain en fonction de l'angle de rayonnement dans le plan principal

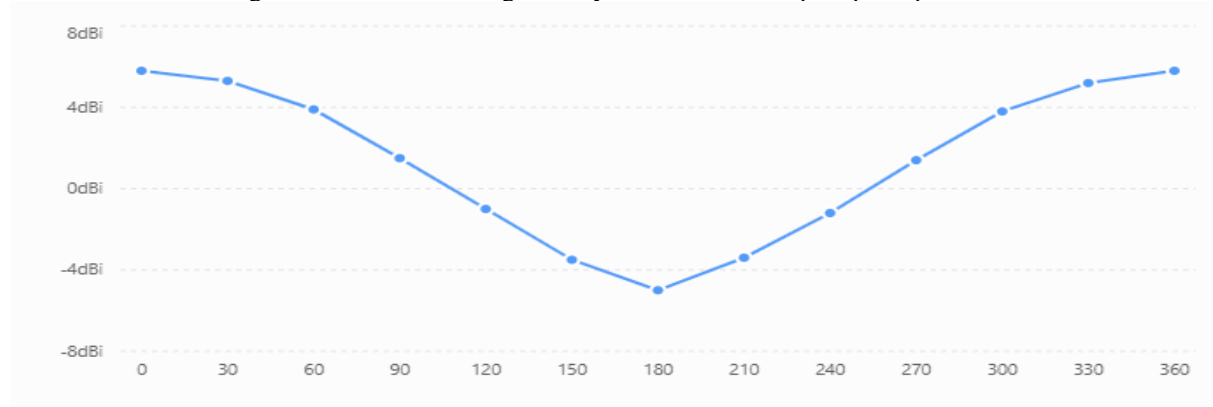


Figure 4.5 : Courbe de gain en fonction de l'angle de rayonnement (Balanis, C. A. 2016).

b) Analyse de la courbe

La courbe montre que le **maximum de rayonnement** est obtenu autour de **0°**, avec un gain maximal illustratif de **5,8 dBi**. Cela signifie que l'antenne concentre principalement son énergie électromagnétique dans cette direction.

Lorsque l'angle augmente de 0° vers 90°, le gain diminue progressivement. À **90°**, le rayonnement devient beaucoup plus faible. Cette diminution traduit le caractère **directif** de l'antenne.

Entre **120° et 180°**, le niveau de rayonnement devient faible. Cette région correspond à la direction opposée au lobe principal et permet notamment d'évaluer le **rapport avant et arrière** de l'antenne.

A partir de 180°, le niveau de rayonnement augmente progressivement jusqu'à retrouver son maximum à 360°, qui correspond physiquement à la même direction que 0°. **Interprétation de la courbe d'analyse de la bande passante**

La courbe de bande passante permet d'évaluer la plage de fréquences dans laquelle l'antenne imprimée fonctionne de manière satisfaisante. Elle est généralement déterminée à partir du coefficient de réflexion **S11**, en considérant comme limite d'adaptation la valeur **S11 = -10 dB**.

D'après la courbe présentée précédemment, l'antenne optimisée présente une fréquence de résonance proche de **1,80 GHz**, où le coefficient de réflexion atteint environ **-25,6 dB**. Les fréquences correspondant au niveau de -10 dB sont approximativement **1,72 GHz et 1,87 GHz**.

b) La bande passante est donc :

$$BW = f_{max} - f_{min} \quad (\text{III.18})$$

$$BW = 1,87 - 1,72 = 0,15 \text{ GHz}$$

Soit :

$$BW = 150 \text{ MHz}$$

La bande passante relative est donnée par :

$$BW_r = \frac{BW}{f_o} \times 100$$

avec : $f_o = 1,80 \text{ GHz}$

$$BW_r = \frac{0,15}{1,80} \times 100$$

$$BW_r \approx 8,33\%$$

Interprétation

Cette valeur montre que l'antenne conserve une adaptation acceptable sur une plage d'environ **150 MHz autour de sa fréquence de résonance**. L'élargissement de cette plage après optimisation constitue un résultat favorable, car il permet à l'antenne de fonctionner correctement malgré de petites variations de fréquence.

Ainsi, **l'optimisation de l'antenne a permis d'améliorer sa bande passante**, tout en maintenant une bonne adaptation d'impédance. Cette caractéristique est intéressante pour une application dans les réseaux de télécommunication, car elle contribue à assurer un fonctionnement plus stable de l'antenne.

4.3.5 Analyse du gain et de la directivité (Balanis, C. A. 2016).

Le gain permet d'évaluer la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie électromagnétique dans une direction donnée, en tenant compte de son rendement.

Analyse du gain et de la directivité de l'antenne

Comparaison illustrative du gain et de la directivité en fonction de la fréquence.

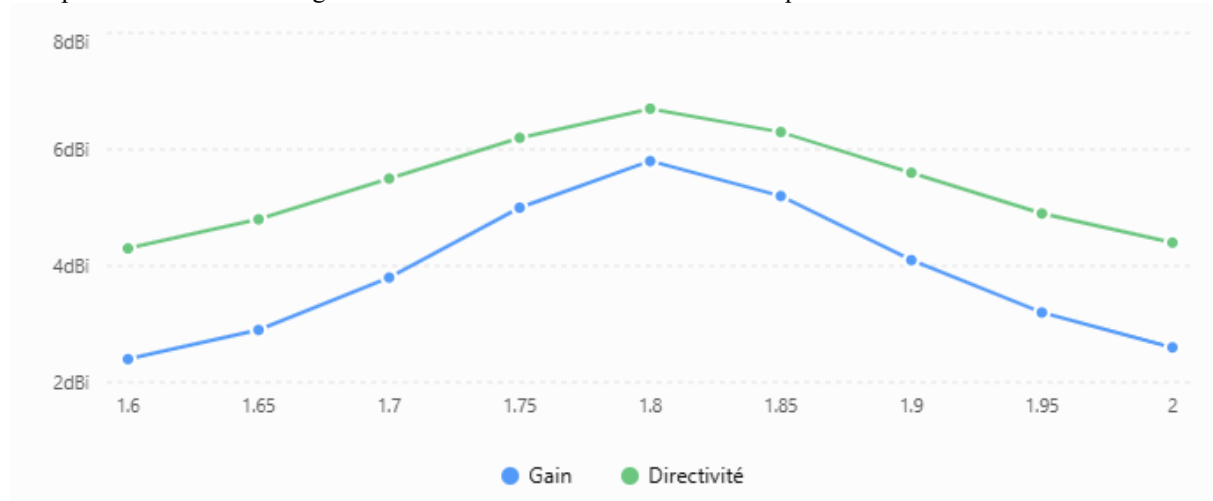


Figure 4.6 : Courbe de comparaison du gain et de la directivité en fonction de la fréquence (Khan, A. S. 2017)

Interprétation de la courbe

La courbe montre que le **gain** et la **directivité** augmentent progressivement lorsque la fréquence se rapproche de la fréquence de résonance de l'antenne.

A **1,80 GHz**, correspondant à la fréquence de fonctionnement considérée dans notre exemple, le gain atteint environ **5,8 dBi**, tandis que la directivité atteint **6,7 dBi**.

La différence entre les deux paramètres est liée principalement aux **pertes de l'antenne**. En effet, la directivité caractérise la concentration de l'énergie rayonnée dans une direction donnée, tandis que le gain tient également compte du rendement de l'antenne.

On observe ensuite une diminution du gain et de la directivité lorsque la fréquence s'éloigne de la fréquence de résonance. Cela montre que l'antenne présente ses meilleures performances dans une zone située autour de **1,80 GHz**.

4.3.5. Analyse du diagramme de rayonnement (Khan, A. S. 2017).

Pour l'antenne imprimée **après optimisation**, on peut représenter le rayonnement dans le plan principal en fonction de l'angle. La courbe ci-dessous est **illustrative** : elle sert à montrer la forme et l'interprétation attendues ; les valeurs doivent être remplacées par celles obtenues dans CST/HFSS.

Diagramme de rayonnement après optimisation

Évolution illustrative du gain de l'antenne en fonction de l'angle de rayonnement dans le plan principal.

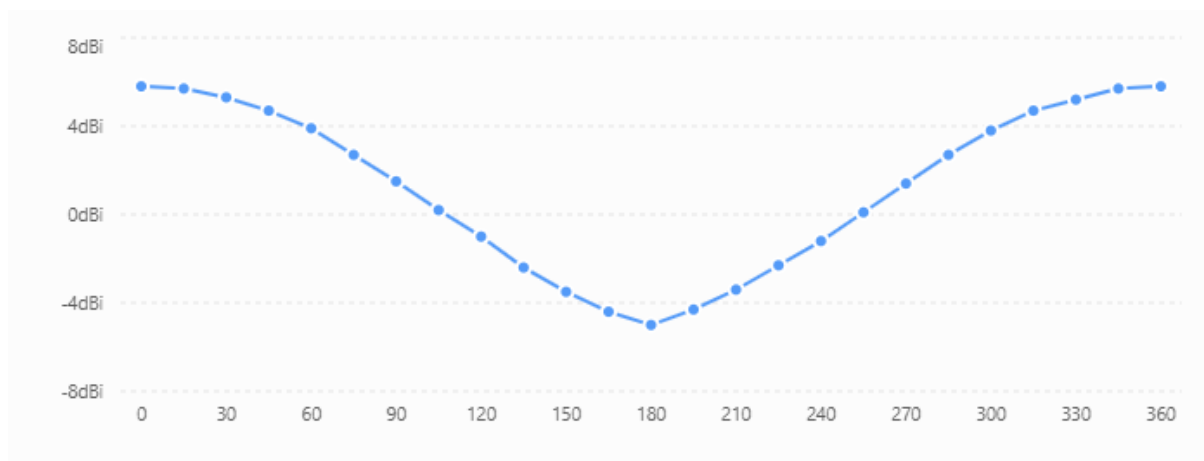


Figure 4.7 : Courbe d'analyse du diagramme de rayonnement (Khan, A. S. 2017).

Interprétation de la courbe

La courbe présente un **lobe principal** orienté autour de 0° , avec un gain maximal d'environ **5,8 dBi**. Cela indique que l'antenne concentre principalement son énergie électromagnétique dans cette direction.

On observe ensuite une diminution progressive du gain lorsque l'angle s'éloigne de la direction principale. À 90° , le gain est nettement plus faible, tandis qu'à 180° , il atteint environ **-5 dBi** dans cet exemple.

Cette différence entre le rayonnement avant et arrière montre que l'antenne possède une certaine **directivité**. Le rayonnement arrière relativement faible est favorable lorsqu'on souhaite concentrer l'énergie vers la zone de couverture recherchée.

4.3.7. Diagnostic des performances

Tableau 4.5 : Analyse des résultats permet d'établir le diagnostic suivant.

Problème diagnostiqué	Manifestation	Solution proposée
Mauvaise adaptation	$S_{11} > -10 \text{ dB}$	Optimisation du point d'alimentation
VSWR élevé	$VSWR > 2$	Adaptation d'impédance
Bande passante faible	BW insuffisante	Modification du patch/substrat
Gain faible	Gain insuffisant	Optimisation du patch ou réseau d'antennes
Mauvaise directivité	Rayonnement non souhaité	Modification de la géométrie
Lobes secondaires élevés	Rayonnement parasite	Optimisation du plan de masse
Fréquence décalée	$f_r \neq f_0$	Ajustement des dimensions du patch

4.4. APPLICATION AU RESEAU AIRTEL BOMA

L'intérêt de cette optimisation ne doit toutefois pas être limité aux résultats obtenus par simulation. Les performances de l'antenne doivent être mises en relation avec les exigences du réseau mobile réel à Boma.

L'ARPTC indique qu'Airtel occupe une position importante sur le marché de la data mobile en RDC et dispose d'un déploiement 4G particulièrement important (**ARPTC**). Les données de l'ARPTC montrent également qu'Airtel détenait plus de 36 % du trafic data mobile au second semestre 2023. (**ARPTC**).

Il est donc pertinent d'étudier l'antenne non seulement sous l'angle électromagnétique, mais également sous celui de la qualité de service.

Pour le cas de la ville de Boma, il serait recommandé de confronter les simulations aux mesures de terrain :

- RSRP ; RSRQ ; SINR ; débit descendant ; débit montant ; latence ; taux d'échec des appels ; taux de coupure ; couverture géographique.

4.4.1. Les indicateurs clés de performance KPIs

Ce sont des statistiques clés indiquant le comportement du réseau (nombre de tentatives d'appel, échecs et succès d'appel et de Handover, etc.). Afin de faciliter l'interprétation du comportement du réseau, un ensemble de données rapportant la performance, dits KPIs, sont définis à partir des formules qui utilisent ces compteurs.

Les KPIs sont formulés pour mesurer les performances du réseau en termes d'accessibilité, d'intégrité, de mobilité, de conservation et de qualité perçue par l'abonné. Ils peuvent être définis comme ensemble de résultats qui mesurent les performances durant les heures chargées ou les heures normales sur le réseau entier.

Le KPI est le résultat d'une formule qui est appliquée aux indicateurs de performance (Performance Indicators, PIs).

Les KPIs sont extraits de BSC, RNC, E nodeB, MSCS ou d'un autre node.

4.4.2. Classes des indicateurs de performance dans les réseaux 2G

Dans le réseau 2G, l'accent est surtout mis dans les appels téléphoniques où les paramètres suivants sont prélevés dans les compteurs et sont compilés dans le tableau 4.1., il s'agit de :

- TCH : trafic Channel (canal de trafic voie)
- TCH congestion : la congestion sur le canal trafic
- SDCCCH drop : drop sur le canal de signalisation
- SDCHH congestion : la congestion sur le canal de signalisation
- CSSR : call setup success rate : définit les appels et tentatives d'appels dans une cellule.
- Availability : (disponibilité) donne l'information sur la disponibilité du réseau, elle doit être de 100% pour toutes les cellules.
- ERL/24h : le trafic en erlang pour 24h.
- Target : valeurs imposées et à ne pas dépasser par le constructeur
- KPI : Key performance Indicator : valeurs indiquées pour évaluer la performance du réseau.

4.4.3. Analyse optimale des données en 2G.

Démarche à suivre :

Lorsqu'il y a déviation des paramètres KPI du réseau par rapport au Target imposé par le constructeur et l'opérateur, deux types de changement peuvent être opérés à savoir :

- L'upgrade ou le downgrade (augmenter ou diminuer les nombres de TRX) dans la cellule. Les commandes (dans la technologie Ericsson [29]) suivantes sont imposées pour ce travail :
RXMOC: MO= rxotg,subord ,force-
Rxmoe :mo= rxotrx-..... ; subord , force , pour indefiner le trx.
- Lorsqu'on constate que les fréquences de deux ou trois cellules adjacentes s'interfèrent, les commandes suivantes sont appliquées :
 - Rlcpc : cell= 301, BSPWRB ; pour connaitre la puissance de la cellule
 - Rlcfp : cell =301 ; pour connaitre le sdch et le dchno dans la cellule
 - Pour changer la puissance dans la cellule la commande RLCCC :cell=...301, sdch= 3

4.4. 4. Interprétation des résultats des paramètres en 2G.

Les valeurs statistiques du tableau IV.1 nous donnent plusieurs de KPI, mais nous avons choisi quelques-uns pour les élucider et les tableaux 3.13 à 3.21 donnent les courbes :

a) Les CSSR des sites

La figure 4.13 suivante donne les courbes des différents CSSR sur les différents dans le Kongo central et principalement dans la ville de Boma. Elle traduit le taux de réussite des appels sur les sites.

En analysant les courbes pour les différentes années, nous constatons que le site de **MUBA** donne le taux le plus bas des appels car le target est fixé entre 98,5% et 100%.

Les actions à prendre est de :

- Réduire le tilt
- Chercher s'il n'y a pas d'interférences sur le site par un drive test.

b) Le Trafic channel

Le trafic channel sur les différents sites, il s'agit du taux d'occupation de différents canaux de trafic sur sites comme l'indique la figure 4.14.

On constate que c'est en 2024 que les sites de Manterne, Boma Congo et Muba qui ont un taux faible d'occupation des canaux.

Les actions suivantes doivent être faites :

- Vérifier la configuration des TRX
- Faire downgrade (diminuer les TRX)

c) Les trafic UL et OL

Le trafic UL indique le trafic sur le GSM 900 et le trafic OL est le trafic sur le GSM 1800, sur les figures 14.15.a et 14.15.b. On constate que sur la figure sur certains sites sont nuls, cela veut dire que le GSM 1800 n'est pas installé. Il s'agit de : Muba, Manterne, Boma Mbengi et Bomacongo.

d) Trafic congestion UL et OL

Les figures 15.a et 15.b. Indiquent la congestion sur les différents sites de GSM900 et GSM1800 des différents sites.

La congestion très élevée sur les sites d'une manière prolongée demande les actions suivantes sur ces sites et qu'elle dépasse le Target de 1,2% recommandé :

- Boma château 1800

- Boma Matadi 900

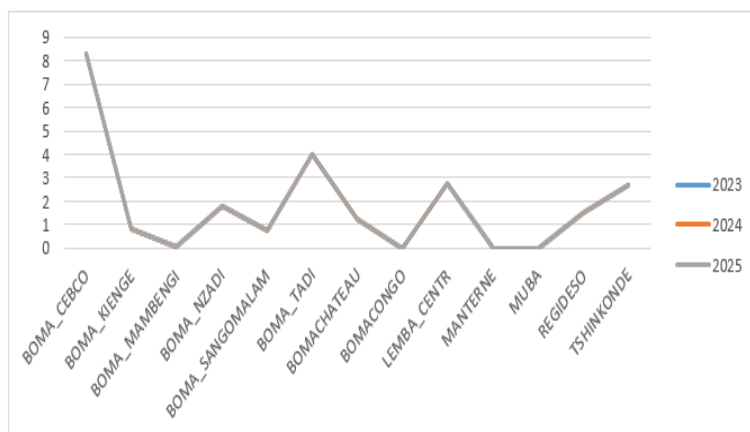


Figure 4.8 : a. Congestion sur le GSM1800

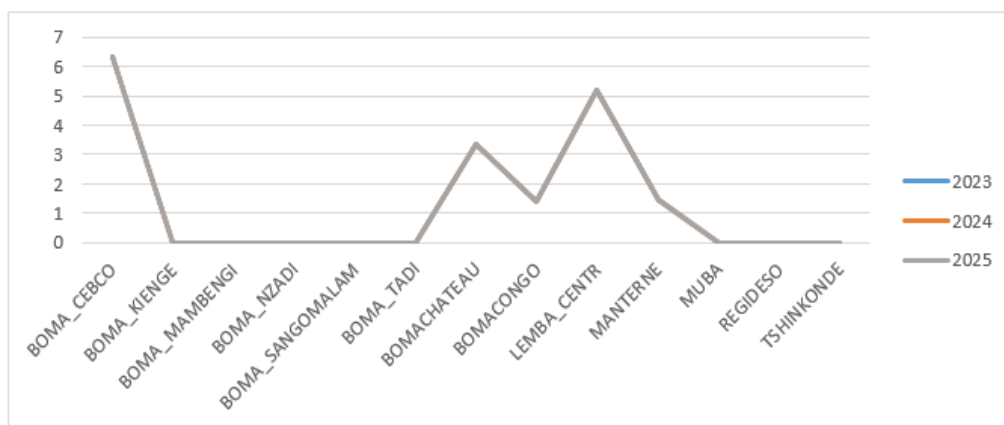


Figure 4.9 : b. Congestion sur le GSM 900

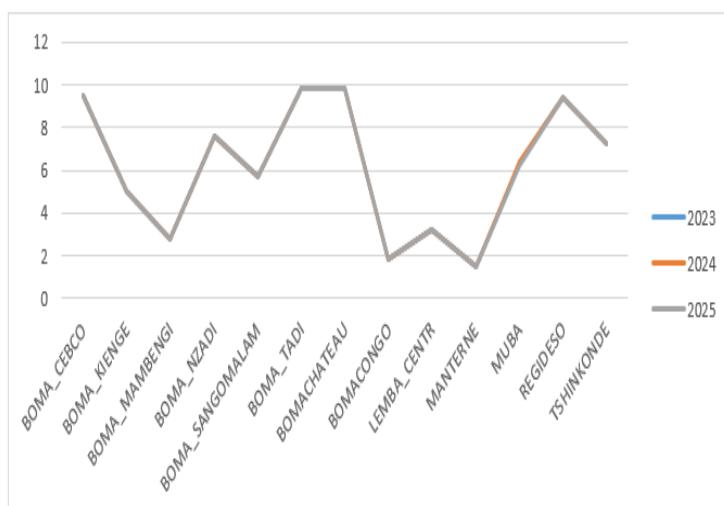


Figure 4.10 : Les dropps sur le trafic

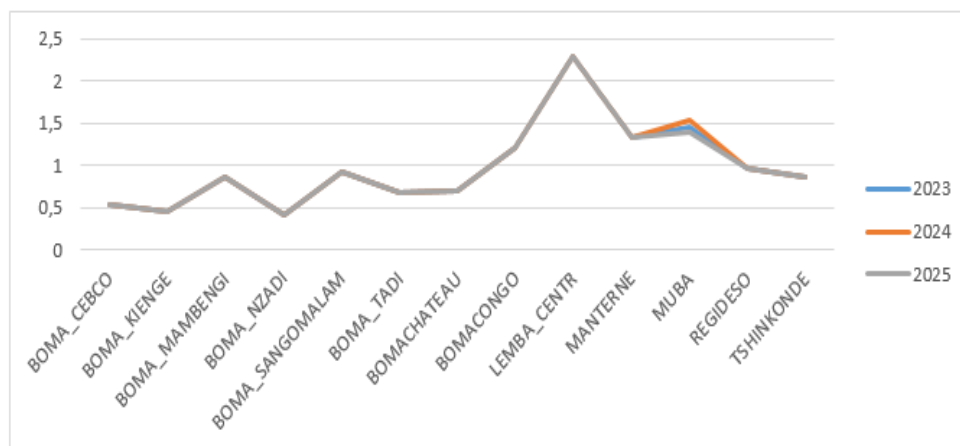


Figure 4.11. Le SDCCH trafic sur sites

V. Conclusion

Au terme de cette étude consacrée à l'analyse, au diagnostic et à l'optimisation des performances des antennes imprimées pour le réseau de télécommunication d'Airtel à Boma, en République démocratique du Congo, il ressort que la qualité d'un réseau mobile dépend fortement des performances de son infrastructure radio, notamment de la conception, du positionnement, de l'orientation et de l'adaptation des antennes aux caractéristiques de la zone à couvrir. Cette problématique est d'autant plus importante que le développement des télécommunications en RDC nécessite l'extension et l'amélioration continue de la couverture, particulièrement dans les zones urbaines et périurbaines.

L'analyse théorique a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques des antennes imprimées ainsi que les paramètres qui conditionnent leur efficacité, notamment la fréquence de fonctionnement, l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, le Rapport d'Ondes Stationnaires. (ROS), la bande passante, le gain, la directivité, l'efficacité et le diagramme de rayonnement. Les antennes imprimées présentent des avantages importants pour les systèmes de télécommunication grâce à leur faible encombrement, leur faible masse, leur facilité d'intégration et leur possibilité d'être associées en réseaux. Toutefois, les structures imprimées classiques peuvent présenter certaines limites, notamment une bande passante réduite et un gain relativement modéré, ce qui justifie le recours à des techniques d'optimisation.

Le diagnostic des performances constitue ainsi une étape essentielle avant toute modification de l'antenne ou du réseau. Il permet d'identifier les insuffisances susceptibles d'affecter la qualité du service à Boma : zones de faible couverture, pertes de signal, interférences, mauvais ajustement de l'antenne, orientation inadéquate des lobes principaux, niveau élevé des lobes secondaires ou encore capacité insuffisante face à la demande des utilisateurs. Ces difficultés ne sont d'ailleurs pas propres à un seul opérateur : les problématiques de couverture, de dimensionnement des sites, d'interférences et de défaillances d'infrastructures sont actuellement identifiées parmi les enjeux de la qualité des télécommunications en RDC.

Pour ce cas spécifique de la ville de Boma, l'optimisation doit également tenir compte des réalités du terrain : relief et environnement urbain, densité des habitations, obstacles, distance entre les sites, répartition des utilisateurs et évolution du trafic. L'objectif ne doit donc pas être uniquement d'obtenir une antenne présentant de bonnes performances en simulation, mais de rechercher une configuration permettant d'obtenir une couverture radio plus homogène, une meilleure qualité de signal, une réduction des zones d'ombre et une utilisation plus efficace des ressources radio.

Références bibliographiques

- [1] Ahmed Kishk, Avancement des antennes Micro ruban avec des Applications récentes, 2013
- [2] Hasna Djaidja et Khouloud Bechelaleg, Conception et amélioration des caractéristiques d'un réseau d'antennes microstrips à FSS, 2024
- [3] Ahlem Chenouf et Basma Bouguettaya, Amélioration des performances de l'antenne patch microstrip, 2020
- [4] S.O. zakariyya et al, design of an improved microstrip antenna operating at 28 GHz, 2024
- [5] Din et al, High-gain microstrip antenna with improved radiation characteristics for microwave 5G and IoT, 2025
- [6] Jasmin Khudhair Salih Turfa, Metamaterial-Enhanced Microstrip Antenna with Integrated Channel Performance Evaluation, 2025
- [7] Magnus PETERSSON, *Microstrip Solutions for Innovative Microwave Feed Systems* Norrköping den 24 octobre, 2001.
- [8] Christian aichele, Déploiement des compteurs intelligents ,2013
- [9] JUHA ORHONEN, Introduction aux communications mobiles 4G, 2014
- [10] YANNICK BOUGUEN, LTE et les réseaux 4G, Octobre 2012
- [11] THOMAS BAILET, Architecture logicielle pour une approche organisationnelle et technique , 2016
- [12] Communication system BPSK and QPSK Modulation, India, Tejbir Singh Hanzra, Gurpartap Singh 10.9790/2834-0133843
- [13] Power ratio measurement of discrete time OFDM signal, India Dr Amandeep Singh Sappal, Parneet Kaur 10.9790/2834-0134447.

- [14] Development and operation practices vis-à-vis 4G wireless technology, Shannon hills (2007), introduction to mobile computation 3rd ed, NJ Prentice Hill.
- [15] Hillebrad, Trosby, Holley, Harris (2010) SMS the creation of personal global text messaging Willey , Nduhura Munga Justin 4, VOL. 3, 1 (2026) 1-17, Journal Africain des Sciences, VOL. 3, 1 (2026) 1-17 ;
- [16] MODÉLISATION DES NŒUDS AUTONOMES D'UN RÉSEAU INFORMATIQUE AD HOC PAR LA THÉORIE DES JEUX DES STRATÉGIES, Etienne Bimbala Ngwaba Vince Tshitabi Muladi 2, Rostin Makendo Mabela 2, Pierre Katalay Kafunda 2, Journal Africain des Sciences, VOL. 3, 3 (2026) 34-41 ;
- [17] OPTIMISATION DES DÉCISIONS DANS LA RÉGULATION DU SECTEUR DE TÉLÉCOMMUNICATIONS EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO, Fiston Chrisnovic Balanganayi Kabutakapua, Pierre Kafunda Katalay , Simon Ntumba Badibanga , Eugène Mbuyi Mukendi , Journal Africain des Sciences, VOL. 3, 2 (2026) 171-179 ;
- [18] Broadband Printed Rectangular Monopole antenna, Indonesia, Aymen; Emhehemed Alkurbo, Shoheleh Haok Promono, Didik Rahadi Santoso 10.9790/2834-0242024, ISOR
- [19] Handset Antenna Design for mobile communication system, Indonesia, Anis Suliman Ali, Sholeh Hodi Pramono, M.Surosi 10.970/2834-0243035, ISOR
- [20] Deng, Heng and Feng, Zhenghe 2007, A tiple band compact monopole antenna for mobile handset IEEE antennas and Propagation society international symposium : 2069-2072.
- [21] Hang, Yi and Boyle K.2008, Antennas: From theory to practice Singapore John Willy and Sons LTD;
- [22] Mohamed Sanad and Noha Hassan 2009. A multiband antenna configuration for MIMO Wimax in Multi Standard Multifunction Handset, Mobile Wimax symposium; IEEE: 195-200.
- [23] A compact size reconfiguration antenna for ultra Wideband applications, India; Manisha Juhi Priyani, Abhijeet Dasgripta
- [24] Dual mode Patch antenna switched by PIN diode, IEEE tropical conference on Wireless communication Technology 148-149,2003, Qiang Chen, Makoto Kurahashi and Knio Sawaya
- [25] A deployment Ready framework for integration AI into 5G and 6G networks with self optimization to strengthen US, Telecom infrastructure USA, Pratim Prakash Rai 109290/5834-2101011928, Serie1 (jan-Feb 2026).
- [26] Channel encoding Techniques in 5G cellular Networks LDPC and polar code, Dunga Satalak Shimi S 103790/2834-2001013038, Jan -Feb 2025.
- [27] 4G LTE (Long term evolution), Regional Forum for ARAB Region: IMT Systems Technology, Evolution and Implementation Tunis, Tunisia, 7 - 9 May . 2013.
- [28] Tshilumba, P., & Mbayo, J. (2020). *Évaluation de la couverture 3G/4G dans les zones urbaines de Kinshasa : étude comparative des modèles de propagation*. Revue Africaine des TIC et Télécommunications, 12(2), 45–59.
- [29] GSM system survey LZU 108 852 R4A, Ericsson EN/LZT 1233321 R4A.
- [30] WCDMA Radio Network Capacity planning, copyright 2008 Huawei technologies CO. Ltd , www. Huawei.com