Adaptation d'impédance d'antenne pour smartphone 5G

BELHADJAR Djugurta
École nationale supérieure de technologie - Rouiba
Dergana, Algérie
d-belhadjar@enst.dz

REMECHI Zohra
École nationale supérieure de technologie - Rouiba
Dergana, Algérie
z-remichi@enst.dz

***Résumé*—La complexité des composants RF dans les téléphones mobiles continue d'augmenter rapidement avec l'arrivée de la 5G. L'intégration croissante d'antennes et la prise en charge de bandes de fréquences plus larges et varies dans les téléphones mobiles rendent la tâche encore plus ardue pour les fabricants de répondre aux exigences strictes en matière de performances et maintenir des performances optimales des antennes dans toutes les conditions d'utilisation et sur l'ensemble des fréquences de fonctionnement devient plus complexe. En effet, les adaptateurs d'impédance aident à résoudre ce problème en maximisant le transfert de puissance RF dans différentes conditions et sur plusieurs bandes de fréquences. Par conséquent, ils sont de plus en plus utilisés pour optimiser les performances, réduire les coûts de conception et répondre aux exigences de la 5G.**

***Index Terms*—Smartphone 5G, Antenne 5G, Adaptation d'impédance.**

I. Introduction

La technologie 5G apportera des changements considérables dans notre utilisation des appareils de communication au quotidien. Son objectif est de fournir des performances considérablement améliorées, notamment un débit maximal multi-Gaps, une latence ultra-faible, une fiabilité accrue, une grande capacité de réseau et une disponibilité étendue [1]. Pour atteindre ces objectifs, la 5G sera capable de prendre en charge un large éventail de fréquences, allant de 400 MHz à 90 GHz [2].

Les systèmes 5G se concentreront principalement par une utilisation de deux bandes de fréquences principales : la bande sub-6 GHz, située en dessous de 6 GHz, et la bande millimétrique, située au-dessus de 24 GHz [2]. Cette répartition des fréquences permet d'offrir des performances considérablement améliorées par rapport aux technologies précédentes.

La transition vers la technologie 5G s'accompagne d'une évolution majeure du nombre d'antennes nécessaires sur chaque appareil, motivée par la volonté d'atteindre des débits de données plus élevés. Les smartphones 5G actuels comportent désormais 8 antennes ou plus, comparativement à environ 4 à 6 antennes dans les générations précédentes [3]. Cette augmentation du nombre d'antennes est rendue possible grâce à l'utilisation d'antennes adaptées à la technologie 5G, telles que le massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et la CA (Carrier Aggregation). Cependant, l'évolution technologique en cours entraîne une complexité croissante au niveau de la radiofréquence (RF) dans les appareils mobiles. Cette

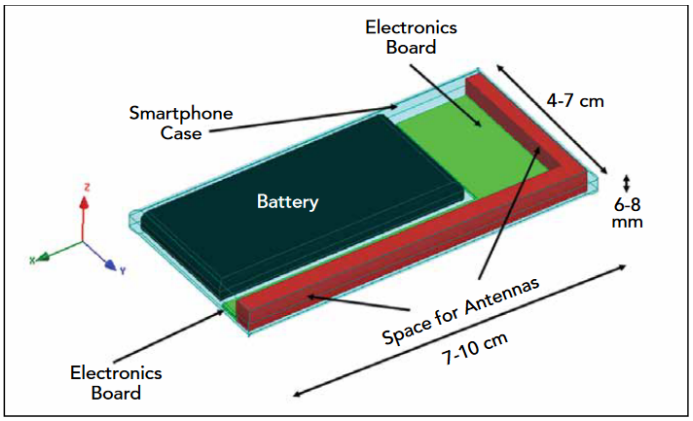


FIGURE 1. Espace occupée par les antennes dans le smartphone 5G [3].

complexité se traduit par un désalignement d'impédance entre l'antenne et le circuit front-end d'émission et de réception radiofréquence (RFFE), pouvant entraîner des problèmes de transfert de puissance RF et des pertes. L'ampleur de ces problèmes dépend de l'importance du déséquilibre entre les impédances du RFFE et celles de l'antenne. De plus, la variation de l'impédance d'une antenne avec la fréquence est étroitement liée à sa conception et à ses caractéristiques physiques [4].

La variation de l'impédance de l'antenne peut se produire

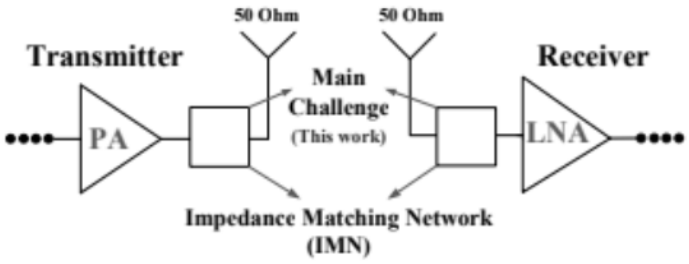


FIGURE 2. Système RFFE et l'antenne [5].

dans différentes conditions, telles que la manipulation du téléphone, la proximité du téléphone avec d'autres objets et la présence de matériaux différents à proximité. Ces facteurs peuvent influencer l'impédance de l'antenne [6]. La résolution du problème de désalignement d'impédance entre l'antenne et

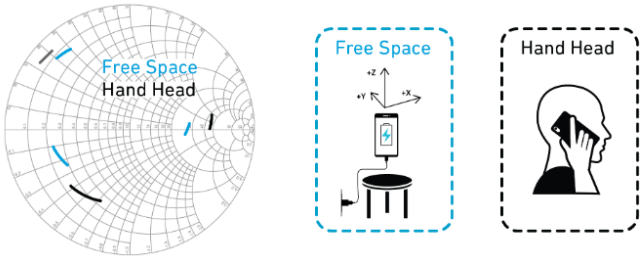


FIGURE 3. Désalignement d'impédance avec les conditions utilisation [4].

le RFFE repose sur l'adaptation de l'impédance entre ces deux éléments. Cette adaptation vise à maximiser le transfert de puissance RF, ce qui permet aux fabricants de smartphones de répondre aux exigences de performance [4]. Voici un diagramme exprimé le manière de résoudre de problème d'adaptation d'impédance :

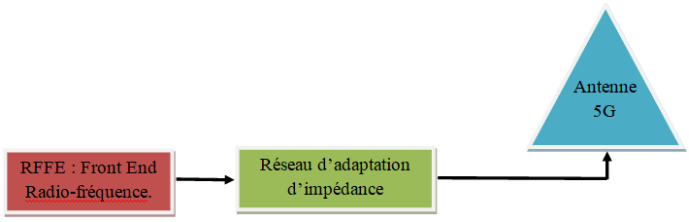


FIGURE 4. Diagramme d'adaptation d'impédance entre RFFE et l'antenne.

L'adaptation d'impédance revêt une importance cruciale pour maximiser la puissance délivrée, réduire les pertes de puissance dans la ligne d'alimentation, améliorer le rapport signal/bruit et minimiser les erreurs d'amplitude et de phase. Cela garantit une transmission précise et fiable des signaux, tout en améliorant la qualité globale du signal transmis.

II. TECHNIQUE D'ADAPTATION D'IMPÉDANCE

Les adaptateurs d'impédance sont des dispositifs essentiels dans RF intelligents adaptatifs actuels. Ainsi, les techniques d'adaptation d'impédance jouent un rôle essentiel en permettant de compenser les pertes causées par la désadaptation et en optimisant les performances des antennes dans différentes conditions environnementales [5]. Plusieurs techniques sont couramment employées à cet effet comme dans la Figure 5 :

A. Réseau d'adaptation

Un réseau d'adaptation d'impédance est un circuit couramment composé d'inductances, de condensateurs et de commutateurs. Ce réseau vise à corriger les écarts d'impédance entre le RF et l'antenne. Cependant, un réseau d'adaptation d'impédance limité constitué uniquement d'inductances et de condensateurs fixes présente des limitations de l'adaptation à quelques bandes de fréquences [4]. Par contre un réseau d'adaptation réglable offre la possibilité d'ajuster et d'optimiser l'adaptation sur une large gamme de fréquences et dans différentes conditions d'utilisation [4]. Il est composé d'inductances et de condensateurs pouvant être réglés pour couvrir une

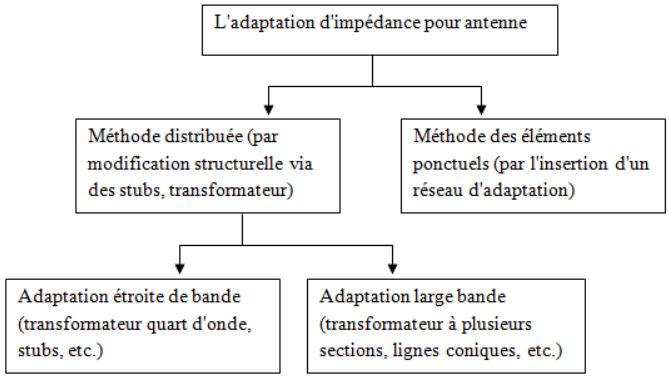


FIGURE 5. Diagramme résume les technique d'adaptation d'mpedance [7].

plage d'impédance beaucoup plus large. En revanche, voici quelque type du réseau d'adaptation d'impédance (Figure 6) :

— Un réseau d'adaptation simple.
— Un réseau d'adaptation de forme L.
— Un réseau d'adaptation de forme P.

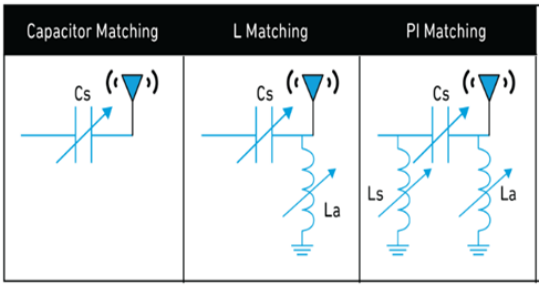


FIGURE 6. Différents type du réseau d'adaptation d'impédance réglable [4].

B. Réseau d'adaptation en forme L

Le réseau d'adaptation le plus simple est probablement le réseau en forme de L, qui utilise deux éléments réactifs pour adapter une impédance de charge arbitraire à une ligne de transmission [8]. Il existe deux configurations possibles :
Prenons d'abord en considération le circuit illustré dans la figure 7.a, ce qui suppose que $R_L > Z_0$. Il indique que, dans le cadre d'une adaptation d'impédance, il est essentiel que l'impédance observée après le réseau d'adaptation combinée à l'impédance de charge, soit égale à Z_0 comme spécifié par l'équation mentionnée [8].

$$Z_o = jX + \frac{1}{jB + \frac{1}{R_L + jX_L}} \tag{1}$$

Avec :
Z_0 : Impédance totale du circuit.
B : Susceptance.
X : Réactance.
R_L : Partie réelle de l'impédance.
X_L : Partie imaginaire de l'impédance.

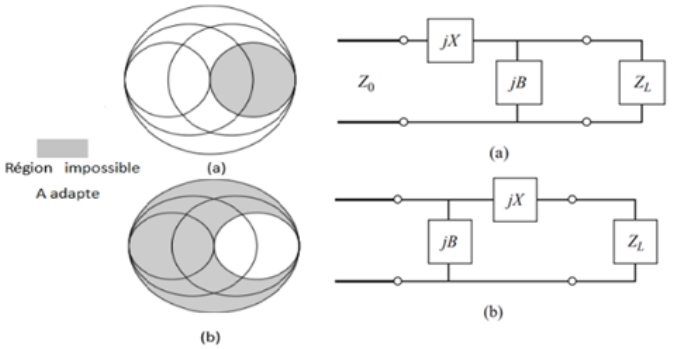


FIGURE 7. Réseau d'adaptation d'impédance en forme L [8].

Ensuite, considérons le circuit de la Figure 7.b, ce qui implique que $R_L < Z_0$. Pour atteindre une condition d'adaptation d'impédance, il est nécessaire que l'admittance observée après le réseau d'adaptation, suivie de l'impédance de charge, soit égale à $1/Z_0$, conformément à l'équation énoncée [8].

$$\frac{1}{Z_0} = jB + \frac{1}{R_L + j(X + X_L)} \tag{2}$$

il existe une autre approche pour pour la conception des réseaux d'adaptation en section L, qui diffère des formules mentionnées précédemment. Le diagramme de Smith, tel qu'évoqué dans [8], peut être utilisé pour réaliser cette conception de manière rapide et précise. Ce diagramme permet d'adapter une région précise dans la bague de Smith, comme illustré dans les figures 8.

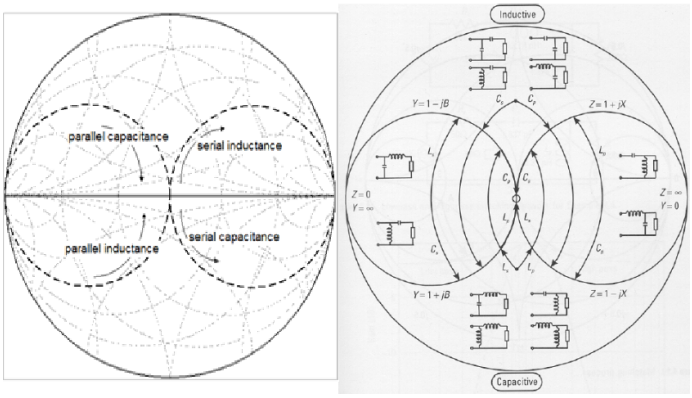


FIGURE 8. Approche graphique du Réseau d'adaptation d'impédance en forme L [7].

C. Stubs d'adaptation

Une autre technique d'adaptation populaire consiste à utiliser une longueur de ligne de transmission ouverte ou court-circuitée connectée en parallèle ou en série avec la ligne de transmission à une certaine distance de la charge, comme illustré dans la Figure 9.

Les branches en dérivation sont généralement préférées pour les lignes de micro-bande ou de strip-line, tandis que les stubs en série sont préférés pour les lignes de fente coplanaires. Dans

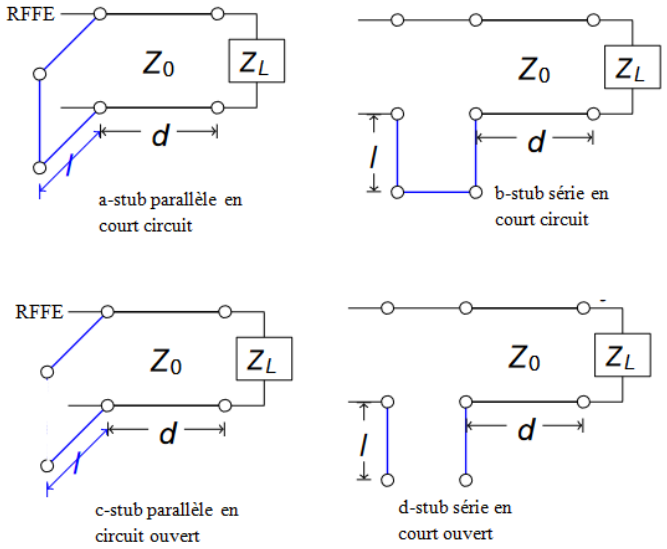


FIGURE 9. Réseau d'adaptation d'impédance avec un stub [8].

un tel circuit d'accord à une seule branche, les deux paramètres ajustables sont la distance d entre le patch et la position du stub, ainsi que la longueur L de ce dernier dont l'impédance Z est donnée par [6].

$$Z = Z_0 \frac{(R_L + jX_L) + jZ_0 t}{Z_0 + j(R_L + jX_L)t} \tag{3}$$

avec :
Z : L'impédance sur une distance d de ligne à partir de la charge.
Ou : t = $\tan(\beta d)$.

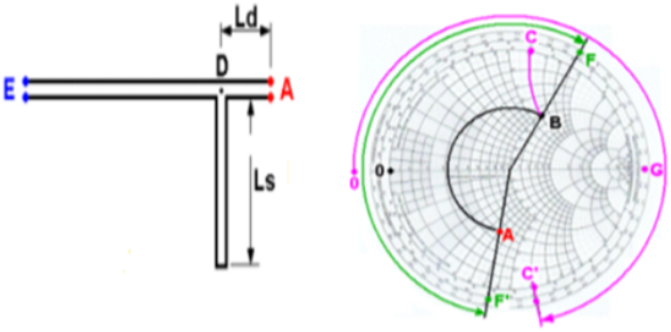


FIGURE 10. Approche graphique de l'adaptation avec un stub [7].

L'approche graphique avec le diagramme de Smith permet de visualiser et d'ajuster facilement les valeurs pour atteindre une adaptation d'impédance optimale avec un stub. En utilisant cette méthode, on peut observer graphiquement les variations de l'impédance et effectuer des ajustements précis en déplaçant les points sur le diagramme (comme indique dans la Figure 10. Cela facilite la compréhension du comportement du système d'adaptation d'impédance.

D. *Transformateur $\lambda/4$ d'adaptation*

transformateur $\lambda/4$ est une ligne de transmission d'une longueur égale à un quart de la longueur d'onde du signal qui la traverse. Elle est souvent utilisée dans les systèmes de transmission RF pour réaliser la fonction d'adaptation d'impédance comme illustrer dans la figure 11.

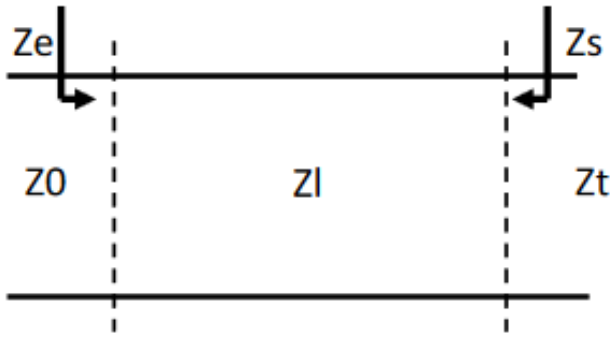


FIGURE 11. adaptation d'impédance par un transformateur $\lambda/4$ [8].

Les lignes quartes d'onde peuvent être réalisées dans différents types de structures de lignes de transmission, tels que les lignes coaxiales, micro ruban, stripline, ...etc. La longueur physique de la ligne quarte d'onde dépend de la fréquence du signal et de la vitesse de propagation dans le support de la ligne de transmission utilisé et l'impédance caractéristique de la section d'adaptation donnée par l'équation [7] :

$$Z_0 = \frac{Z_L^2}{Z_t} \tag{4}$$

C'est-à-dire :

$$Z_L = \sqrt{Z_0 \cdot Z_t}.$$

Avec :
Z_L : Impédance de charge.
Z_0 : Impédance caractéristique de la ligne de transmission.
Z_t : impédance du stub ou du réseau d'adaptation.

L'approche graphique de l'adaptation par transformateur quart d'onde permet de visualiser clairement l'impédance de la charge, l'impédance caractéristique de la ligne, plan de charge et l'impédance du transformateur quart d'onde. Cela facilite la conception et le réglage des circuits d'adaptation d'impédance.

III. APPLICATION DE QUELQUES TECHNIQUES D'ADAPTATION D'IMPÉDANCE À LA FÉQUENCE 28 GHZ

Dans cette section on explore deux techniques d'adaptation d'impédance, à savoir l'utilisation d'un transformateur quart d'onde et un stub, pour adapter une antenne patch destinée à équipement utilisateur (smartphones5G) fonctionnant à une fréquence de 28 GHz. Les résultats obtenus en termes de coefficient de réflexion et d'impédance de charge nous permettront de déterminer l'approche la plus efficace pour assurer une adaptation optimale et une performance maximale de

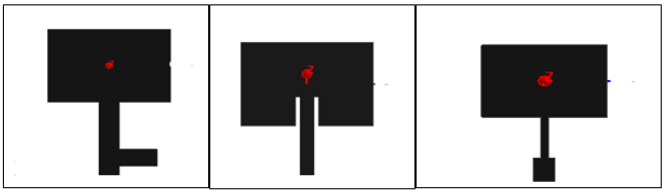


FIGURE 12. Quelques structures d'adaptation d'impédance.

l'antenne efficace pour assurer une adaptation optimale et une performance maximale de l'antenne.

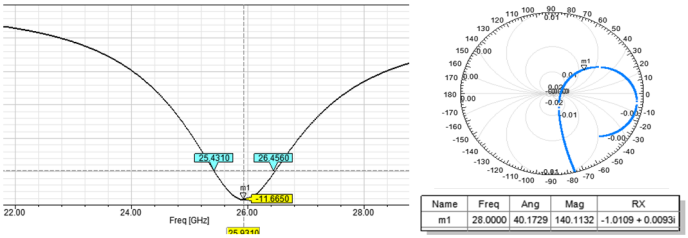


FIGURE 13. Coefficient de réflexion et impédance d'une antenne patch sans adaptation d'impédance.

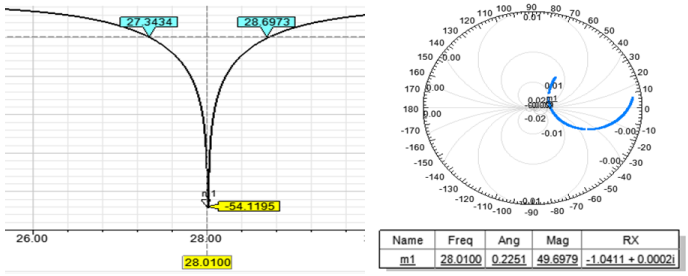


FIGURE 14. Coefficient de réflexion et impédance d'une antenne patch adaptée par un transformateur $\lambda/4$.

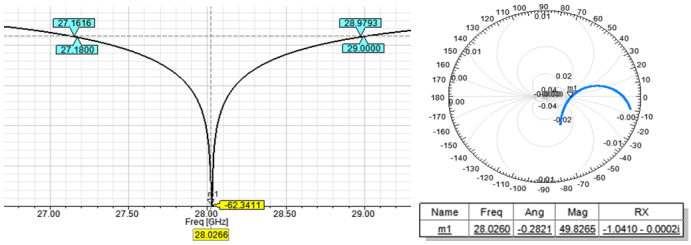


FIGURE 15. Coefficient de réflexion et impédance d'une antenne patch adaptée par un stub .

Ces deux techniques d'adaptation d'impédance offrent des résultats d'adaptation satisfaisants à une fréquence 28 GHz. Cependant, l'utilisation de stub présente une meilleure efficacité. Ces deux méthodes peuvent etre combinée notamment pour adapter un réseau d'antenne patch comme illustrer dans la figure 16, en favorisant ainsi un transfert optimal d'énergie.

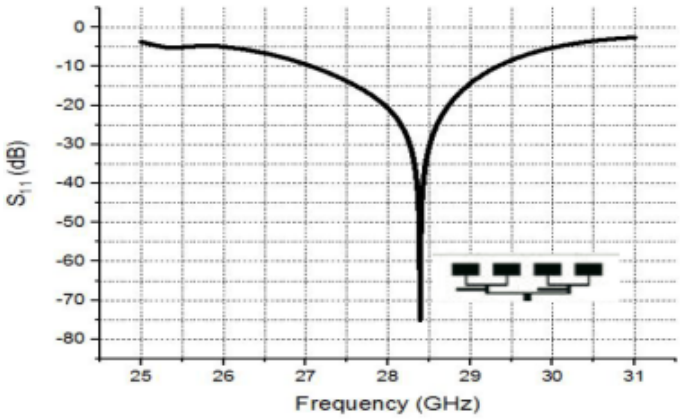


FIGURE 16. Coefficient de réflexion S11 d'un réseau d'antennes rectangulaires 1x4 avec une adaptation d'impédance basée sur le transformateur quart d'onde $\lambda/4$ et un stub paralléle [1].

IV. RÉSEAUX D'ADAPTATION D'IMPEDANCE AJUSTABLES

Pour une bonne efficacité de l'amplificateur de puissance (PA) en émission ou des performances de bruit optimales au niveau de l'amplificateur faible bruit (LNA), une solution consiste à incorporer un réseau d'adaptation d'impédance réglable par une boucle de contrôle entre l'émetteur/récepteur et l'antenne, qui est capable de s'ajuster de manière adaptative et permet d'avoir une impédance d'adaptation variable selon les changements d'impédance de l'antenne, de fréquence de fonctionnement ou d'environnement, pour des performances optimales. Ce réseau est appelé l'unité d'ajustement d'antenne (the antenna tuning unit « ATU ») ou un réseau d'adaptation réglable (Tunable Matching Network « TMN ») [9].

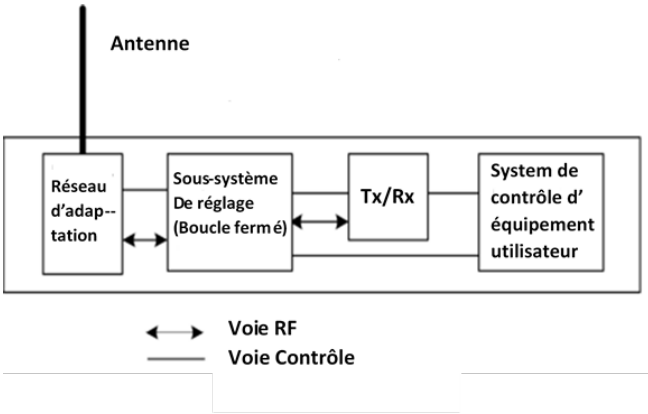


FIGURE 17. Diagramme d'un réseau d'adaptation réglable pour un équipement utilisateur Topologies réseau d'adaptation réglable.

‘

V. TOPOLOGIES RÉSEAU D'ADAPTATION RÉGLABLE

Divers types de topologie de réseau d'adaptation ajustables peuvent être utilisés aux fréquences allouées aux équipements utilisateurs 5G. Les composants réactifs doivent être commutés ou modifiés à l'aide de dispositifs électroniques adaptés à une utilisation à ces fréquences et aux niveaux de puissance utilisés dans les systèmes de communication mobile.

A. Réseau d'adaptation d'impédance réglable à l'aide de commutateurs RF-MEMS

L'objectif principal de cette topologie est d'utiliser un seul circuit de réseau d'adaptation d'impédance pour ajuster les fréquences centrales au lieu d'utiliser plusieurs circuits. Cette structure représentée dans la figure 18 est mis en œuvre en utilisant deux commutateurs RF-MEMS et des éléments un certain nombre d'inductances et de condensateurs, qui sont ajoutés ou retirés du circuit en fonction de la fréquence centrale souhaitée à l'aide de ces deux commutateurs RF, ce qui donne un circuit d'adaptation réglable pour deux fréquences centrales de 26 et 28 GHz [5].

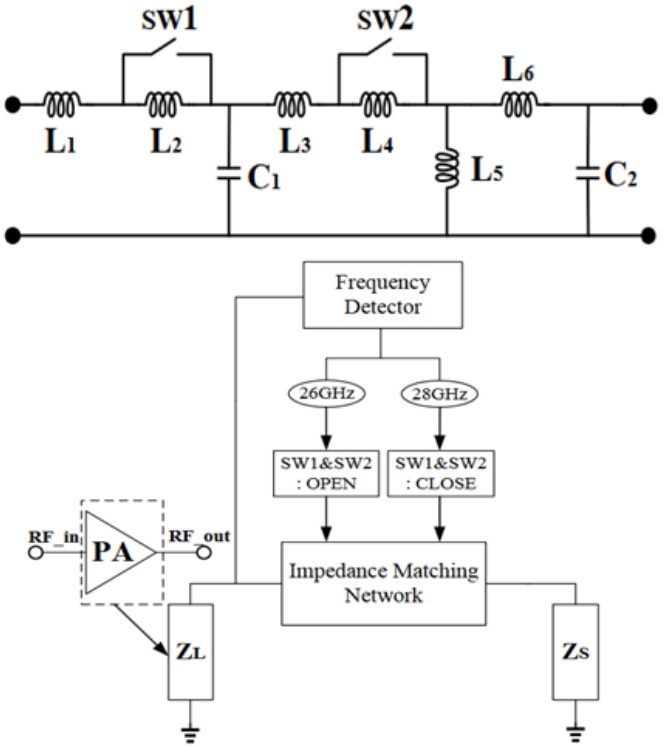


FIGURE 18. Réseau d'adaptation d'impédance ajustable avec deux commutateurs RF-MEMS [5].

B. Réseau d'adaptation en Pi réglable en technologie CMOS sur puce (CMOS on-chip tuner)

Cette topologie consiste en un réseau d'adaptation réglable pour les applications à bande passante limitée. Il se compose de deux réseaux en Pi en cascade où les inductances série sont fixes, et le réseau est ajustable au moyen de condensateurs parallèles entre les deux réseaux. Cette topologie peut être utilisée pour l'application d'adaptation d'impédance en technologie CMOS on-chip réglable par condensateurs parallèles uniquement comme le montre la Figure 19 [9]. Cela évite

d'avoir recours à des inductances variables difficiles à mettre en œuvre sur puce. Le réseau en Pi présente aussi un avantage de former un filtre passe bas ce qui permet d'atténuer les harmoniques en prévenance de l'amplificateur de puissance. Cette topologie peut être utilisée comme réseaux d'adaptation à des fréquences supérieures à plusieurs gigahertz.

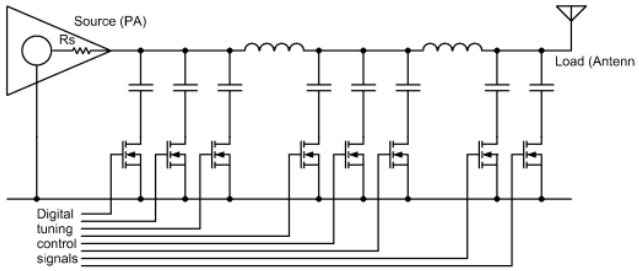


FIGURE 19. Réseau d'adaptation en Pi réglable en technologie CMOS on-chip [9].

C. Réseau d'adaptation en boucle fermée réglable via fonction de transfert d'apprentissage

Ce système d'adaptation d'impédance d'antenne en boucle fermée est basé sur une méthode d'ajustement qui permet de compenser les pertes de désadaptation dans des conditions environnementales variables en surveillant le changement de l'impédance d'antenne par des mesures de coefficient de réflexion et en ajustant la configuration de réseau d'adaptation réglable (ou tuner) avec un code de réglage optimal trouvé à partir d'un algorithme de contrôle de tuner Figure 20.

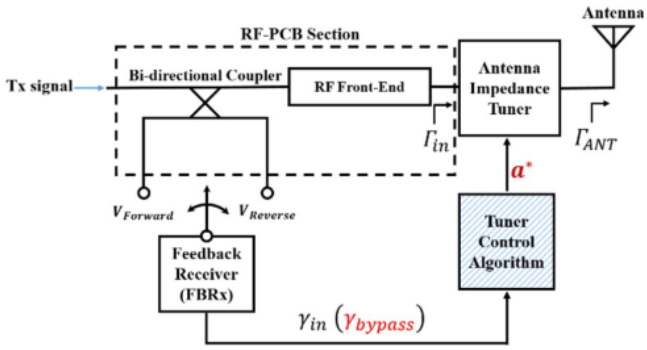


FIGURE 20. Diagramme d'un Réseau d'adaptation en boucle fermée réglable par algorithme de contrôle [10].

La solution la plus utilisée pour l'algorithme de contrôle est le tableau des correspondances (a Lookup Table « LU »). Qui consiste en des points de référence exprimés par certains coefficients de réflexion associés à des codes de réglage déterminés en fonction de la connaissance des fréquences, de la technologie (LTE, NR), et le contexte d'utilisation. Les LUT sont généralement dérivées lors d'une étape d'étalonnage avant le fonctionnement réel [10].
Cette approche présente les avantages suivants :

— L'apprentissage de la fonction de transfert nécessite des données directement disponibles à partir d'un téléphone assemblé avec un système de réglage d'impédance en boucle fermée classique.
— Une fonction objective basée sur les données mesurées peut traiter les effets parasites et les incertitudes dans le tuner et le chemin RF du téléphone.

VI. CONCLUSION

Les réseaux d'adaptation d'impédance jouent un rôle crucial pour résoudre les problèmes d'efficacité d'antenne causés par la complexité croissante des signaux RF dans les appareils mobiles. En améliorant le transfert de puissance RF entre le RFFE (Front-End Radio) et l'antenne, les tuners d'impédance aident les fabricants de smartphones à maximiser les performances pour différentes utilisations et bandes de fréquences et peuvent etre implémentés sur divers types technologies. C'est pourquoi de plus en plus de fabricants intègrent des tuners d'impédance dans leurs appareils mobiles, notamment avec le déploiement de la technologie 5G.

RÉFÉRENCES

[1] M. H. E. Jebabli and F. Choubani, "Impedance matching enhancement of a microstrip antenna array designed for ka-band 5g applications," pp. 1254-1258, doi : 10.1109/IWCMC51323.2021.9498825.

[2] Suisse, "Printed antennas for 5g networks," *Springer International Publishing*, 2022.

[3] M. A. et al, "Smartphone : Mimo antenna system for 5g mobile terminals," *in IEEE Access*, vol. 9, pp. 91593-91603, 2021, doi : 10.1109/ACCESS.2021.3091304.

[4] A. Kuchikulla, "Applying impedance tuning to maximize. antenna performance in 5g phones," *GORVO*, January 2020.

[5] F. Ziraksaz and A. Hassanzadeh, "A 23.4-31.9 ghz tunable rf-mems impedance matching network for 5g power amplifie," *2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2021*, pp. 69-73, doi : 10.1109/ICEE52715.2021.9544293.

[6] K. . P. A. Koul, Shiban G.S, "Compact antennas for future 5g smartphones," 2021.

[7] S. Rishi, Rahul Sharma, "Matching techniques for microstrip patch antenna," *Indian Journal of Science and Technology. (2017)*, 10. 1-16. 10.17485/ijst/2017/v10i28/97642.

[8] D. M. Pozar, "Microwave engineering," *Italie : Wiley*, 2012.

[9] D. Lauder and Y. Sun, "An overview of automatic antenna impedance matching for mobile communications," *2020 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), Sofia, Bulgaria*, 2020, pp. 1-4, doi : 10.1109/ECCTD49232.2020.9218350.

[10] P. D. T. Yekan, D. Lee and W. Y. Ali-Ahmad, "Closed-loop antenna impedance tuning via transfer function learning for 5g sub-6 ghz user equipment," *in IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 764-767, June 2022, doi : 10.1109/LMWC.2022.3164368.