

Antenne 3D filaire miniature pour les systèmes 5G *Miniature 3D wire antenna for 5G systems*

Fateh Benmahmoud, Pierre Lemaitre-Auger, Smail Tedjini.

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, 26000 Valence, France, {firstname.name}@lcis.grenoble-inp.fr

Mots clés : antenne filaire, 5G, algorithme génétique, optimisation ; wire antenna, genetic algorithm, optimization

Résumé/Abstract

Le développement d'antennes monopoles miniatures multi-segments en trois dimensions est présenté. Chaque segment est orienté arbitrairement dans l'espace afin de réduire le volume occupé par l'antenne tout en conservant de bonnes caractéristiques : compacité, efficacité, adaptation d'impédance et bande passante. Ces antennes sont destinées aux systèmes 5G par leur grande miniaturisation et leur bande-passante. Étant donné l'absence de pertes liées au diélectrique, les antennes filaires multi-segments sont une bonne alternative aux antennes planaires dans certains cas. Un algorithme génétique multi-objectif a été implémenté pour la conception. Une antenne formée de sept segments occupant un volume de $\lambda_0/4.81 \times \lambda_0/6.10 \times \lambda_0/7.03$, où λ_0 représente la longueur d'onde à la fréquence 3.28 GHz a été obtenue. L'impédance est adaptée à 50Ω dans la bande (3.28-3.61) GHz, le coefficient de réflexion est inférieur ou égal à -10.41 dB. L'efficacité interne simulée est supérieure à 98% pour toute la bande C (3500-3600 MHz). La polarisation de l'antenne est quasiment linéaire et le gain mesuré est de 4.03 dBi.

The development of miniature segmented monopole antennas in three dimensions is presented. Each segment is oriented randomly in space to reduce the volume occupied by the antenna while obtaining good characteristics: compactness, efficiency, impedance matching and bandwidth. Because of its small size and large bandwidth, the designed antenna is intended for 5G systems. Because of the absence of any dielectric losses, segmented wire antennas are a good alternative to planar antennas in some cases. A multi-objective genetic algorithm has been implemented for the conception. A 7-segment antenna that occupies a volume of $\lambda_0/4.81 \times \lambda_0/6.10 \times \lambda_0/7.03$, where λ_0 is the wavelength at the frequency 3.28 GHz was obtained. Its impedance is fairly close to 50Ω on all bandwidth (3.28-3.61) GHz, and the reflection coefficient is lower or equal to -10.41 dB. The simulated total efficiency is higher than 98% for the entire C-band (3500-3600 MHz). The polarization of the antenna is almost linear and the measured gain is 4.03 dBi.

1 Introduction

Avec le développement rapide des systèmes et modules de communication 5G, la réduction de la taille des antennes devient un enjeu de plus en plus important. Cependant, selon la loi de Chu, plus une antenne est de petite taille, plus sa bande passante sera réduite [1]. Il est également difficile de concilier antenne miniature et adaptation d'impédance. Gérer ces aspects avec les techniques traditionnelles de conception d'antennes peut rapidement devenir une tâche très délicate et complexe. Beaucoup d'antennes planaires sont réalisées sur un substrat. Ceci réduit grandement leur volume, le problème revenant à minimiser leur surface. Cependant, la présence d'un substrat réduit leur efficacité intrinsèque de rayonnement. Dans ce travail, nous proposons une antenne en trois dimensions (3D) compacte, purement métallique qui couvre toute la bande C (3500-3600 MHz). Il s'agit d'un monopole multi-segments. Introduit par E. Altshuler dans [2], cette topologie d'antenne a déjà montré son efficacité dans plusieurs travaux [3]–[6]. Une telle structure offre un grand nombre de degrés de liberté qui permet d'augmenter la résistance de rayonnement de l'antenne tout en conservant un volume compact. La conception d'une telle antenne est réalisée avec des algorithmes génétiques.

2 Conception d'antenne

La structure d'antenne est un monopole 3D composé d'un fil plié qui forme un ensemble de segments différemment orientés dans l'espace au-dessus d'un plan de masse. Cela rend la conception de ce type d'antenne très flexible et polyvalente afin d'obtenir les caractéristiques voulues pour un volume et une taille d'antenne donnés. Plus précisément chaque segment est défini dans l'espace par trois paramètres : une longueur l , un angle d'élévation θ , un angle d'azimut φ comme le montre la figure 1.

Dans cette étude, les angles d'élévation et d'azimut sont limités à l'intervalle $[0-90^\circ]$ et $[0-360^\circ]$, respectivement avec un pas de 2° . Pour faciliter le prototypage, la longueur des segments est aussi limitée à des

valeurs supérieures à trois millimètres, longueur minimale nécessaire à la fabrication. Ceci minimise les erreurs liées à la précision de fabrication et la complexité de l'antenne. La structure simulée est un monopole au-dessus d'un plan de masse infini. Le rayon de chaque segment a été fixé à une valeur de 0.6 mm. La figure 1 montre une représentation schématique d'une topologie tridimensionnelle de cinq segments sur un plan de masse.

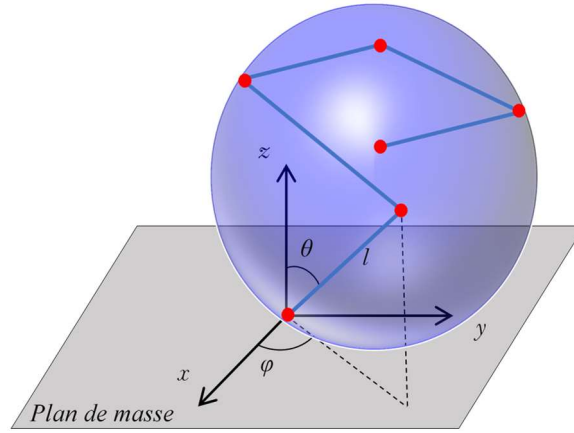


Figure 1. Représentation schématique d'une antenne filaire 3D de 5 segments.

L'algorithme génétique (AG) implémenté est de type multi-objectif [7]. On commence par créer la génération initiale de N individus (c.-à-d. N antennes). Un individu est constitué de M gènes ($M = 3 \times N_b$, N_b est le nombre de brins). On évalue ensuite les performances de chaque individu par une simulation électromagnétique. Les meilleurs individus (50% de chaque génération) sont sélectionnés pour engendrer la prochaine génération. L'opération de sélection consiste à choisir les individus les plus adéquats vis-à-vis des critères et contraintes imposées. Les individus sélectionnés entament ensuite une phase de reproduction à travers les deux opérateurs génétiques principaux de croisement et mutation [8]. Cela donne naissance à une nouvelle génération. L'opération de croisement permet le brassage génétique de la population. Grâce à celui-ci, les gènes des meilleurs individus, et donc ses performances et caractéristiques, sont transmis de génération en génération. L'opérateur génétique de mutation consiste à altérer un ou plusieurs gènes dans un chromosome de manière aléatoire.

Pour garantir que l'algorithme implémenté engendre toujours des solutions fiables qui répondent aux besoins, nous avons implémenté un filtre géométrique qui permet d'exclure les topologies inacceptables. Le filtrage concerne les topologies avec des segments qui se croisent ou qui pénètrent dans le plan de masse. Les topologies qui présentent des tailles très élevées sont aussi éliminées pour accélérer la convergence du processus d'optimisation. Le remplacement des topologies incorrectes par d'autres solutions géométriquement correctes et générées aléatoirement maintient la diversité des générations et évite la convergence vers des minimums locaux [9].

L'outil d'optimisation est implémenté sous Matlab en conjonction avec l'environnement de simulation électromagnétique «Computer Simulation Technology» (CST) [10]. Le nombre de segments et le rayon des fils ont été fixés à 7 et à 0,6 mm respectivement. Le nombre d'individus d'une génération est de 120. Les fonctions de coût visent à réduire le volume occupé par l'antenne, maximiser la bande passante et obtenir l'adaptation d'impédance dans la bande ciblée. Le tableau 1 résume les fonctions objectives de l'AG implémenté.

	Formule
f_1	Volume occupé par l'antenne
f_2	fonction de la bande passante

Tableau 1. Les fonctions objectives implémentées.

La valeur de la fonction de la bande passante F_{BP} est calculée de la manière suivante :

$$F_{BP} = \begin{cases} 0 & \text{si } |S_{11}| \leq -10 \text{ dB } \forall f \in \Delta f \\ 1 & \text{si } |S_{11}| > -10 \text{ dB } \forall f \in \Delta f \\ 1 - BP/200 & \text{si } \exists f \in \Delta f \text{ où } |S_{11}(f)| \leq -10 \text{ dB} \end{cases} \quad (1)$$

où Δf est la bande de fréquences [3400-3600] MHz et BP représente la bande-passante en MHz.

3 Optimisation et caractérisation de l'antenne

Il a fallu 135 générations pour que l'optimisation arrive à une solution qui satisfait les objectifs ciblés. Avec un ordinateur à deux processeurs 2.20 GHz et une mémoire d'accès aléatoire (RAM) de 32GB, cela représente 157.5 heures de calcul. Nous avons aussi constaté que plus le volume dans lequel l'antenne est confinée est compact, plus le coefficient de réflexion est élevé [11]. Cela s'explique par l'apparition d'une partie réactive de l'impédance conduisant à une désadaptation. Notons que dans la littérature, en plus de l'apparition d'une partie réactive, une diminution de la partie active de l'impédance a été constatée [12].

La sélection de la solution parmi les individus de la dernière génération a été effectuée sur la base de bon compromis entre les différents objectifs fixés. La structure sélectionnée, illustrée à la figure 2, occupe un volume de 19mm×15mm×13mm ce qui correspond à $\lambda_0/4.81 \times \lambda_0/6.10 \times \lambda_0/7.03$, où λ_0 est la longueur d'onde pour la fréquence 3.28 GHz.

La fabrication d'un prototype a été effectuée en exploitant les techniques d'impression 3D. L'antenne est composée de cuivre et de quelques alliages pour assurer les conditions thermiques et moléculaires, indispensables pour le processus de fabrication.

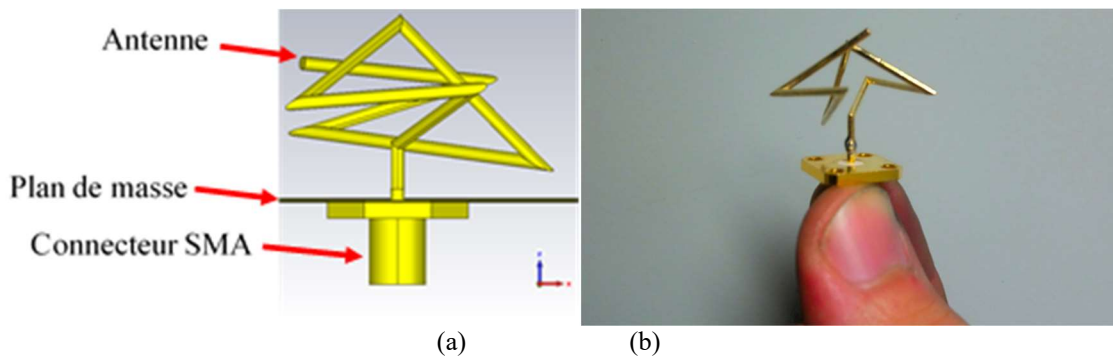


Figure 2. Antenne obtenue. (a) Schéma de l'antenne. (b) Prototype fabriqué.

L'antenne réalisée couvre une bande-passante de 330 MHz, de 3.28 à 3.61 GHz à -10 dB qui couvre l'intégralité de la bande C (3400-3600) MHz. Le coefficient de réflexion varie de -10.4 à -21.66 dB pour sur la bande C. Comme l'antenne est purement métallique, elle offre ainsi une efficacité interne très élevée qui dépend seulement de la conductivité du métal qui la compose. Les figures 3.a et 3.b montrent respectivement l'impédance d'entrée et l'amplitude du coefficient de réflexion. Un décalage de 67 MHz entre les valeurs simulées et mesurées est constaté, ce décalage n'impacte pas son fonctionnement, l'antenne est bien opérationnelle dans la bande ciblée. L'impédance proche de 50 ohms est assurée dans la bande cible malgré le degré de miniaturisation imposé.

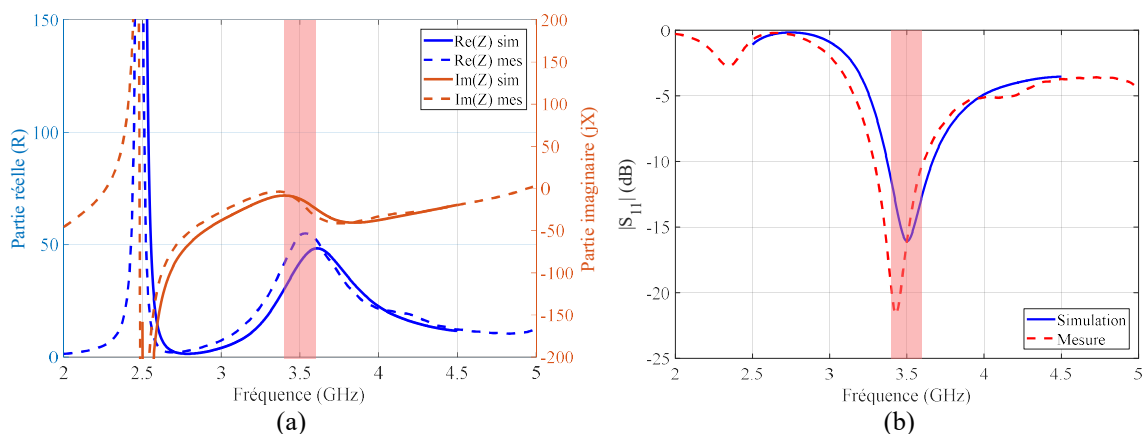


Figure 3. Caractéristiques de l'antenne : (a) Impédance. (b) Coefficient de réflexion.

Pour bien caractériser le prototype fabriqué, nous avons effectué des mesures en champ lointain au sein d'une chambre anéchoïque. Comme cela est illustré à la figure 4, la totalité du champ électromagnétique est rayonné dans la moitié supérieure de l'espace (de -90° à 90°), comme cela était attendu étant donné la présence du plan de masse. L'accord entre les mesures et les simulations est bon dans les deux plans : azimutal et d'élévation. Les mesures ont montré que l'antenne a un gain 4.03 dBi, ce chiffre peut atteindre les 5.72 dBi pour certaines directions. L'efficacité interne simulée de l'antenne est supérieure à 98.7% en incluant les faibles pertes dans la connexion avec le connecteur SMA.

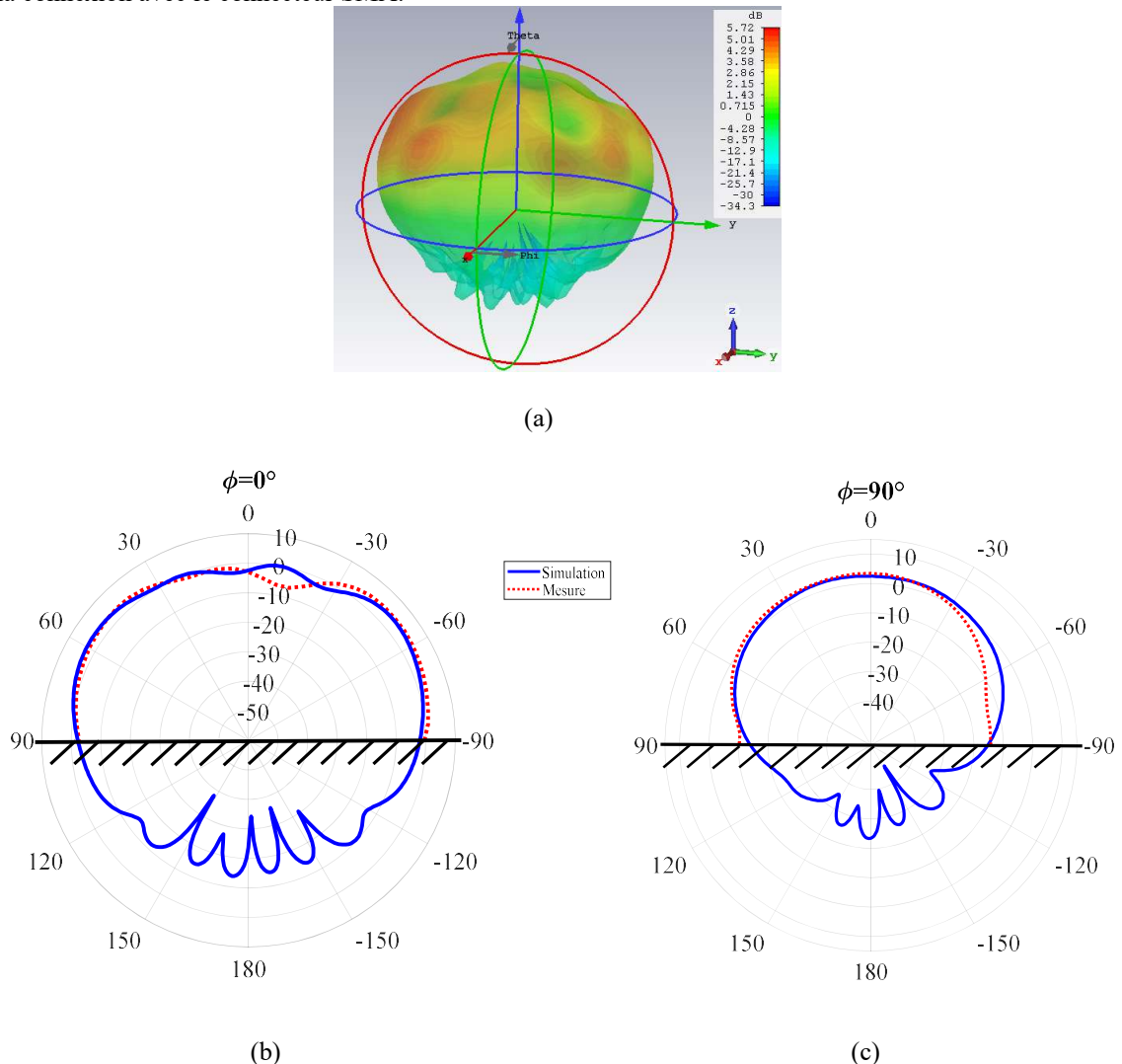


Figure 4. Le diagramme de rayonnement normalisé simulé et mesure de l'antenne : (a) Représentation 3D simulée. (b) Mesure et simulation dans le plan xoz. (c) Mesure et simulation dans le plan yoz.

La polarisation est de type linéaire. Cela est normal étant donné la taille relativement petite de l'antenne comparée à la longueur d'onde dans la bande de fréquence ciblée. L'obtention d'une polarisation circulaire (ou elliptique) nécessiterait le relâchement des contraintes liées au volume occupé.

Le tableau 2 montre une étude comparative entre l'antenne conçue et quelques conceptions qui existent dans la littérature. Pour les travaux de réseaux d'antennes, les propriétés des antennes élémentaires sont considérées. On peut constater que l'antenne filaire 3D est légèrement moins compacte que les solutions basées sur des structures planaires hybride et open-slot [11], [12], par contre elle démontre des propriétés de rayonnement supérieures en termes d'efficacité et de gain. Cette antenne est un très bon candidat lorsque les performances de rayonnement sont critiques.

Référence	Type d'antenne	Dim. Maximale (mm)	BP à -10 dB (MHz)	Gain (dBi)	Efficacité
[11]	Open-slot	17	420	3.6	56% à 70%
[13]	Patch	31.9	200	5.3	30%
[14]	Yagi planaire	60	440	7	(*)
[15]	Open-slot	21	280	<5	62% to 76%
[12]	Hybride	17.8	100	-4.8	<50%
[16]	Patch	40	240	~3	~50%
Ce travail	Filaire 3D	19	330	5.72	>98%

* Dans [3], le substrat FR4 avec une tangente de perte de 0.02 est utilisé.

Tableau 2. Comparatif avec d'autres travaux.

4 Conclusion

La conception d'antennes miniatures avec une bande-passante importante et bien adaptée a été démontrée dans ce travail. Les mesures faites à partir d'un prototype corroborent les simulations. Ce type d'antenne constitue une solution intéressante dans des systèmes 5G. L'antenne offre une résistance de rayonnement bien adaptée à 50 ohms sur toute la bande C et une valeur d'efficacité de rayonnement très élevée grâce à sa structure purement métallique. Cette topologie d'antenne a été adaptée pour une impédance de 50 ohms, mais il est possible de concevoir des antennes avec d'autres valeurs d'impédance en suivant les mêmes démarches. Les travaux futurs se concentreront sur l'amélioration des caractéristiques de l'antenne vis-à-vis de l'adaptation d'impédance et l'exploitation de ce type d'antenne pour les systèmes de réseau d'antennes.

References bibliographiques

- [1] H. A. Wheelert, "Fundamental Limitations of Small Antennas," *Proc. IRE*, vol. 35, no. 12, pp. 1479–1484, 1947.
- [2] E. E. Altshuler and D. S. Linden, "Wire-antenna designs using genetic algorithms," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 39, no. 2, pp. 33–43, 1997.
- [3] J. D. Lohn, G. S. Hornby, and D. S. Linden, "Rapid Re-Evolution of an X-Band Antenna for Nasa's Space Technology 5 Mission BT - Genetic Programming Theory and Practice III," T. Yu, R. Riolo, and B. Worzel, Eds. Boston, MA: Springer US, 2006, pp. 65–78.
- [4] E. E. Altshuler, "Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 50, no. 3, pp. 297–300, 2002.
- [5] J. D. Lohn, D. S. Linden, B. Blevins, T. Greenling, and M. R. Allard, "Automated synthesis of a lunar satellite antenna system," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1436–1444, 2015.
- [6] F. Benmahmoud, P. Lemaitre-Auger, and S. Tedjini, "Design of electrically small 3D wire antennas for UHF RFID applications using genetic algorithm," in *32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, URSI GASS 2017*, 2017, pp. 1–4.
- [7] E. E. Altshuler and D. S. Linden, "Wire-antenna designs using genetic algorithms," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 1997.
- [8] H. Iba and C. C. Aranha, "Introduction to genetic algorithms," *Adaptation, Learning, and Optimization*, 2012.
- [9] P. Diaz-Gomez and D. Hougen, "Initial Population for Genetic Algorithms: A Metric Approach.," *Proc. 2007 Int. Conf. Genet. Evol. Methods*, 2007.
- [10] C. M. Studio, "Antenna Design and Simulation," *CST Microwave Studio*, 2016. .
- [11] Y. Ban, C. Li, C. Sim, G. Wu, and K. Wong, "4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2981–2988, 2016.
- [12] M. Li *et al.*, "Eight-Port Orthogonally Dual-Polarized Antenna Array for 5G Smartphone Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 9, pp. 3820–3830, 2016.

- [13] W. Chen and Y. Lin, "Design of 2×2 Microstrip Patch Array Antenna for 5G C-Band Access Point Applications," in *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, 2018, pp. 1–2.
- [14] H. Wang and G. Yang, "Design of 4×4 microstrip Quasi-Yagi beam-steering antenna array operation at 3.5GHz for future 5G vehicle applications," in *2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*, 2017, pp. 331–334.
- [15] Y. Li, C. Sim, Y. Luo, and G. Yang, "High-Isolation 3.5 GHz Eight-Antenna MIMO Array Using Balanced Open-Slot Antenna Element for 5G Smartphones," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 6, pp. 3820–3830, 2019.
- [16] A. Yadav, M. K. Saraswat, V. Palukuru, and R. Gautam, "Antenna array for 5G C-band for mobile terminals," in *2019 TEQIP III Sponsored International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW)*, 2019, pp. 293–297.