

Dipôle Magnétique Large-Bande pour la Radiogoniométrie 3D à l'aide d'une Antenne Vectorielle

J. Duplouy^{1,2}, C. Morlaas¹, H. Aubert²

¹ENAC, TELECOM-EMA, F-31055 Toulouse, France.

²LAAS-CNRS, MINC, F-31400 Toulouse, France.

johan.duplouy@enac.fr

Résumé — Un dipôle magnétique large-bande, disposé sur un support métallique plan et réalisé à partir d'un réseau semi-circulaire d'antennes Vivaldi, est présenté dans cette communication. Les caractéristiques radioélectriques obtenues au regard du diagramme de rayonnement, du niveau de polarisation croisée et de la bande de fréquences font de ce dipôle un bon candidat pour répondre aux besoins de la radiogoniométrie 3D large-bande à l'aide d'une antenne vectorielle.

1. Introduction

La radiogoniométrie a pour objectif d'estimer les directions d'arrivées des ondes électromagnétiques reçues. L'élément clef d'un goniomètre radiofréquence est l'antenne car ses caractéristiques radioélectriques définissent notamment les performances d'estimation et les couvertures fréquentielle et spatiale. La plupart des antennes de radiogoniométrie disponibles sur le marché présentent une couverture angulaire 2D et fonctionnent sur une large bande de fréquences en bande VHF ou UHF. Cependant, certaines applications nécessitent une couverture 3D.

Une technique novatrice utilisée en radiogoniométrie consiste à exploiter la diversité de polarisation d'une antenne vectorielle [1]. Celle-ci est composée de six capteurs orthogonaux présentant chacun un faible niveau de couplage, trois dipôles électriques et trois dipôles magnétiques mesurant ainsi l'ensemble des composantes du champ électromagnétique.

Différentes solutions couvrant l'espace 3D à partir d'antennes vectorielles ont récemment vu le jour. Parmi elles figurent d'une part, une solution active destinée à couvrir les fréquences inférieures à 30 MHz [2] et, d'autre part, une solution passive et bibande couvrant les fréquences GSM [3]. Intrinsèquement, la solution passive présente de nombreux avantages par rapport à la solution active.

En pratique, le dipôle magnétique est réalisé à partir d'une boucle électrique de circonférence inférieure à $\lambda/10$ parcourue par un courant uniforme et en phase [4]. Cependant, l'adaptation de ce capteur sur une large bande de fréquences est difficile car son impédance d'entrée est purement réactive. Alors que de nombreux dipôles élec-

triques large-bande ont récemment été étudiés en détails, peu de travaux portent sur l'élaboration d'un dipôle magnétique large-bande [5, 6]. L'utilisation d'un réseau circulaire composé de huit antennes fentes à transition progressive a par exemple permis d'obtenir un diagramme omnidirectionnel à ± 2 dB dans le plan E dans la bande LTE (1.9-2.7 GHz) [6].

Un pseudo dipôle magnétique, sous-mentionné par le terme dipôle magnétique, disposé sur un support métallique plan pouvant répondre aux besoins de la radiogoniométrie 3D large-bande à l'aide d'une antenne vectorielle est proposé dans cette communication en utilisant une approche similaire à [6].

2. Étude préliminaire

Une étude préliminaire concernant la faisabilité d'une antenne compacte permettant de répondre à un cahier des charges prédéfini a été réalisée. Son but est de déterminer le nombre d'antennes nécessaires présentant une bande de fonctionnement de référence $r_{ref}:1$ afin de couvrir une large bande de fréquences $\frac{f_{max}}{f_{min}}:1$. L'étude suppose le cas idéal où l'antenne présente un diagramme de rayonnement conforme aux spécifications sur la bande $r_{ref}:1$. La Fig. 1 présente les résultats de cette étude pour $\frac{f_{max}}{f_{min}}:1 \in \{2, 2.5, 3\}$. Il apparaît que le nombre d'antennes devient rapidement important afin de couvrir une large bande de fréquences si la bande passante de l'antenne de référence est limitée. Cela est d'autant plus problématique dans le cadre de la conception d'une antenne vectorielle large-bande qui nécessite de multiplier le nombre d'antennes par six.

Par ailleurs, il est possible d'évaluer rapidement la taille minimale d'une antenne résonnante électriquement petite à partir de la bande passante fractionnelle BP , du rapport d'onde stationnaire ROS et de l'efficacité η de celle-ci. Cette évaluation est donnée par

$$BP = \frac{1}{\eta} \frac{(ka)^3}{1 + (ka)^2} \frac{ROS - 1}{\sqrt{ROS}}, \quad (1)$$

avec k le nombre d'onde dans le vide et a le rayon de la sphère minimale englobant l'antenne [7]. La Fig. 2 présente l'évolution de l'efficacité pour une antenne réson-

nante électriquement petite présentant une bande passante de fonctionnement $r_{ref}:1 \in \{2, 2.5, 3\}$ et en considérant un rapport d'onde stationnaire égal à deux. La perte de l'efficacité, engendrée par la miniaturisation, est incompatible avec l'application visée. En effet, la portée est assujettie à celle-ci. L'étude préliminaire montre les limites de faisabilité concernant l'efficacité, la bande passante et la compacité pouvant être obtenues avec une ou plusieurs antennes passives résonantes afin de répondre à un cahier des charges prédéfini.

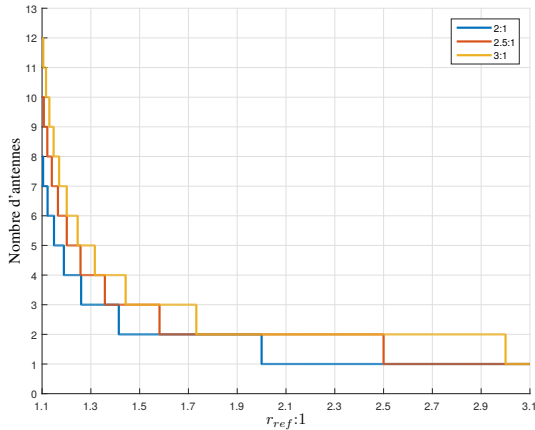


Figure 1. Nombre d'antennes permettant de couvrir $\frac{f_{max}}{f_{min}}:1$ avec une antenne de référence $r_{ref}:1$

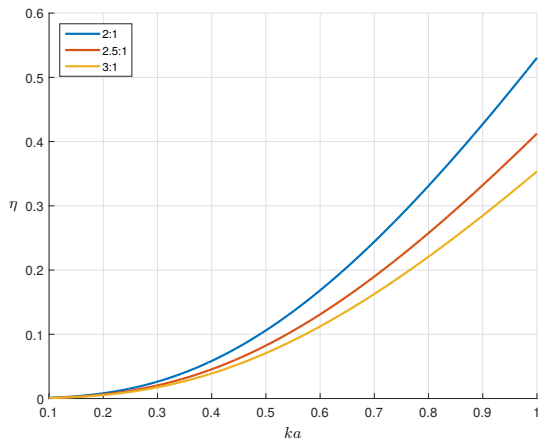


Figure 2. Efficacité η d'une antenne résonante électriquement petite en fonction de sa taille effective ka pour $ROS = 2$ et $r_{ref}:1 \in \{2, 2.5, 3\}$

3. Conception d'un dipôle magnétique large-bande

3.a. Principe utilisé

Le principe sous-jacent à la conception d'un dipôle magnétique large-bande est de synthétiser un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan E sur une large bande de fréquences. Cela peut-être réalisé en uti-

lisant un réseau circulaire d'antennes large-bande. L'antenne Vivaldi est bien connue pour exhiber un diagramme de rayonnement directif et un gain modéré sur une large bande de fréquences. Initialement proposée par Gibson [8], elle présente également un rayonnement symétrique et constant dans les plans E et H sur une large bande de fréquences malgré sa géométrie planaire. Par ailleurs, l'antenne Vivaldi rayonne dans son plan longitudinal et dans la direction de l'ouverture un champ électrique polarisé linéairement. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, l'antenne Vivaldi semble être un bon candidat pour réaliser un réseau d'antennes permettant d'obtenir sur une large bande de fréquences un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan E, correspondant au plan longitudinal du réseau.

3.b. Configuration étudiée

Un réseau semi-circulaire d'antennes Vivaldi disposé sur un support métallique plan infini est représenté Fig. 3 et ses dimensions sont disponibles Tableau 1.

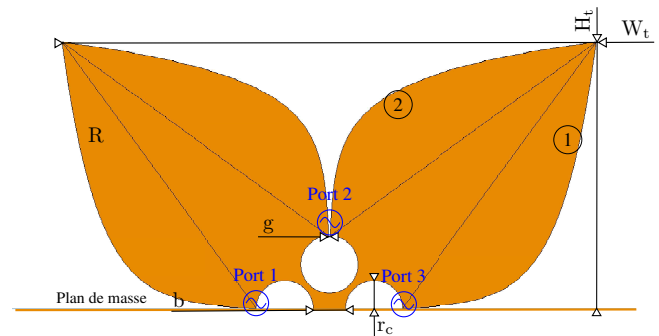


Figure 3. Configuration étudiée

Tableau 1. Dimensions de l'antenne proposée

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
H_t	150 mm	W_t	300 mm
R	50 mm^{-1}	r_c	16 mm
b	18 mm	g	1 mm

Le profil exponentiel (1) caractéristique d'une antenne Vivaldi est défini par

$$x = c_1 e^{Rz} + c_2, \quad (2)$$

avec

$$c_1 = \frac{x_2 - x_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}},$$

et

$$c_2 = \frac{x_1 e^{Rz_2} - x_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}},$$

où R est le taux d'ouverture, (x_1, z_1) et (x_2, z_2) correspondent respectivement aux coordonnées des points de

départ et d'arrivée du profil exponentiel. Le profil exponentiel (2) satisfait également l'équation (2) en échangeant le rôle de x et z .

L'excitation des antennes Vivaldi, illustrée Fig. 3, est spécifiée Tableau 2. Celle-ci, supposée idéale dans le cadre de cette communication, est définie à partir de sources de tension. En pratique, les antennes Vivaldi seront imprimées sur un substrat et alimentées selon une transition ligne-fente grâce à une ligne d'alimentation réalisée en technologie microruban. Un stub radial terminant la ligne d'alimentation peut-être utilisé afin d'augmenter la bande passante de la transition.

Tableau 2. Configuration des excitations

Numéro du port	1	2	3
Amplitude \angle Phase	$1 \angle 0^\circ$	$\sqrt{2} \angle 0^\circ$	$1 \angle 180^\circ$
Impédance d'entrée	50Ω	100Ω	50Ω

La configuration étudiée propose un diagramme de rayonnement dans l'espace supérieur équivalent à celui d'un réseau circulaire composé de quatre antennes Vivaldi en vertu du théorème des images. Par ailleurs, l'antenne ainsi proposée peut facilement être intégrée sur un porteur et sa hauteur est divisée de moitié.

3.c. Performances simulées

Les simulations électromagnétiques ont été réalisées à partir d'un logiciel de simulation électromagnétique basé sur une méthode exacte.

Afin de caractériser la bande de fonctionnement d'une antenne composée de différents ports d'alimentation, il est possible d'utiliser les paramètres S actifs définis par

$$S_{ii} \text{ actif} = \frac{\sum_{n=1}^3 A_n e^{j\phi_n} S_{in}}{A_i e^{j\phi_i}}, \quad (3)$$

où A_n et ϕ_n désignent respectivement l'amplitude et la phase de l'excitation du $n^{\text{ième}}$ port et S_{in} représente le couplage mutuel entre le $i^{\text{ième}}$ et $n^{\text{ième}}$ ports [9]. Les coefficients de réflexion actifs de la configuration étudiée sont représentés Fig. 4 en fonction de la fréquence. L'antenne présente d'une part, une bande passante supérieure à 8:1 et, d'autre part, est incluse dans un demi-cercle de rayon $0.62\lambda_L$, avec λ_L la longueur d'onde dans le vide à la fréquence basse de fonctionnement f_L située à 0.88 GHz.

Le diagramme de rayonnement du dipôle magnétique est tracé en polarisation principale dans le plan E pour différentes fréquences dans la bande de fonctionnement Fig. 5. L'antenne présente un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel sur la bande 3:1. Des fluctuations indésirables de la directivité de l'ordre de 8 dB sont cependant observables à certaines fréquences. La présence d'un minimum de la directivité situé à $1.8f_L$ peut notamment dégrader les performances de goniométrie. Il est par conséquent nécessaire de travailler sur la géométrie de

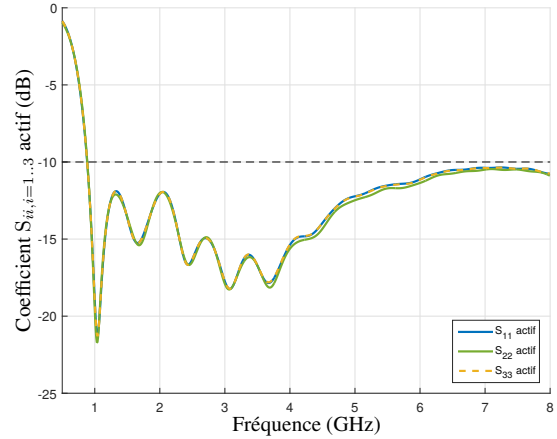


Figure 4. Coefficient de réflexion actif en fonction de la fréquence

l'antenne afin d'améliorer ses caractéristiques de rayonnement. Par ailleurs, l'antenne présente un niveau de polarisation croisée tout à fait acceptable (inférieure à -30 dB) dans le plan transverse.

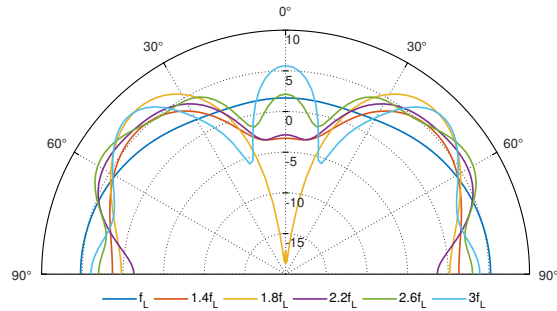


Figure 5. Diagramme simulé en gain dans la polarisation principale et dans le plan E à diverses fréquences

4. Étude paramétrique

Une étude paramétrique portant sur le taux d'ouverture défini par le paramètre R a été réalisée dans le but d'améliorer l'omnidirectionnalité du diagramme de rayonnement du dipôle magnétique large-bande proposé dans la Section 3. Elle vise en particulier à améliorer le diagramme à la fréquence à laquelle un minimum est présent. L'élément clé associé à la conception d'un dipôle magnétique large-bande est de proposer une solution permettant d'obtenir un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel dans le plan E sur une large bande de fréquences. Afin d'assurer le respect de cette règle de conception, une grandeur permettant d'évaluer l'omnidirectionnalité a été introduite. Cette grandeur, noté C , spécifie la variation maximale du gain et est définie à chaque fréquence f par

$$C(f) = G_{\max}(f) - G_{\min}(f), \quad (4)$$

avec G_{\max} et G_{\min} correspondant respectivement aux valeurs maximale et minimale du gain dans le plan E pour

$\theta \in [-90^\circ; 90^\circ]$.

Le variation maximale du gain dans le plan E est représentée Fig. 6 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux d'ouverture R comprises entre 40 mm^{-1} et 60 mm^{-1} . Il ressort que ce paramètre ne permet pas d'améliorer de manière significative l'omnidirectionnalité dans le plan E notamment à la fréquence d'intérêt $1.8f_L$ où le diagramme de rayonnement présente toujours un minimum très marqué. Cependant, la diminution du taux d'ouverture permet d'atténuer le défaut d'omnidirectionnalité autour de 3 GHz.

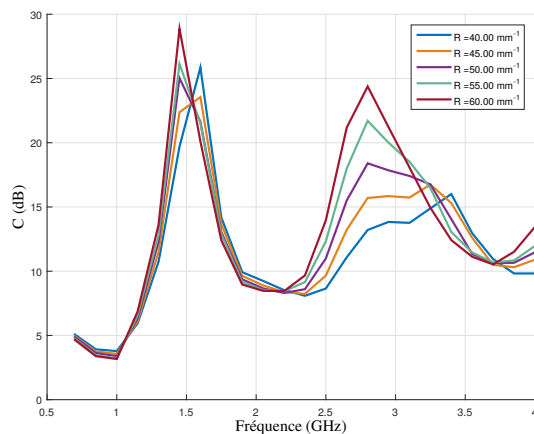


Figure 6. Variation de la grandeur C définie par l'équation (4) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre géométrique R.

5. Perspectives

L'étude paramétrique réalisée dans la Section 4 n'a pas permis de s'affranchir de la présence de fortes chutes de gain dans le plan E de l'antenne proposée dans la Section 3. Le principe utilisé pour la conception du dipôle magnétique large-bande semble pourtant prometteur au regard des premières caractéristiques radioélectriques encourageantes qui ont été obtenues. Un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel dans le plan E peut-être synthétisé tout en conservant une large bande passante en utilisant le même principe grâce à une géométrie ad hoc du réseau circulaire. Une solution serait d'augmenter le nombre d'antennes Vivaldi composant le réseau semi-circulaire afin d'assurer un échantillonnage spatial plus approprié du champ électrique et ainsi, éviter l'apparition de lobes de réseau perturbant le diagramme de rayonnement de l'antenne. Basé sur ce principe, un dipôle magnétique large-bande pour des applications embarquées a été proposée par les auteurs dans [10]. Une antenne vectorielle large-bande disposée sur un plan de masse, constituée de deux dipôles magnétiques et d'un dipôle électrique, a ainsi été créée dont les caractéristiques radioélectriques sont en adéquation avec les besoins de la radiogoniométrie 3D large-bande.

6. Conclusion

La difficulté principale rencontrée lors de la création d'une antenne vectorielle appliquée à la radiogoniométrie 3D large-bande réside dans l'élaboration du dipôle magnétique large-bande. L'étude préliminaire présentée dans cette communication a montré les limites théoriques de faisabilité à l'aide d'antennes résonnantes passives. Afin de s'affranchir des défauts d'une solution active, un dipôle magnétique présentant des caractéristiques radioélectriques susceptibles de répondre aux besoins de la radiogoniométrie 3D large-bande a été proposé dans cette communication.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la DGA (Direction Générale de l'Armement) ainsi que la région Occitanie pour le co-financement de la thèse de Johan Duploux.

Références

- [1] A. Nehorai and E. Paldi, "Vector-sensor array processing for electromagnetic source localization," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 2, pp. 376–398, Feb 1994.
- [2] B. Almog, "Compact 3D direction finder," Patent, Mar, 2013, EP20120184835.
- [3] J. Lominé, C. Morlaas, C. Imbert, and H. Aubert, "Dual-band vector sensor for direction of arrival estimation of incoming electromagnetic waves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3662–3671, Aug 2015.
- [4] W. Stutzman and G. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Wiley, 2012.
- [5] Y. Yu, F. Jolani, and Z. Chen, "A wideband omnidirectional horizontally polarized antenna for 4G LTE applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 686–689, 2013.
- [6] T. S. P. See, X. Qing, and Z. N. Chen, "A wideband horizontally polarized omnidirectional antenna," in *IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, June 2015, pp. 294–295.
- [7] S. Best, "Bandwidth and the lower bound on Q for small wideband antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, July 2006, pp. 647–650.
- [8] P. J. Gibson, "The Vivaldi aerial," in *9th European Microwave Conference*, Sept 1979, pp. 101–105.
- [9] M. Kalfa and E. Halavut, "A fast method for obtaining active s-parameters in large uniform phased array antennas," in *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Oct 2013, pp. 684–688.
- [10] J. Duploux, C. Morlaas, H. Aubert, P. Potier, P. Poulliguen, and C. Djoma, "Grounded colocated antennas for wideband vector sensor applications," in *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, San Diego, July 2017.