



## L'HOMME CONNECTÉ

### Interactions corps/antennes à 60 GHz : Impact de la méthode d'alimentation d'antenne

### Antenna / human body interactions in the 60 GHz band: Impact of the antenna feeding method

---

Carole Leduc\*, Maxim Zhadobov\*, Nacer Chahat\*\* et Ronan Sauleau\*

\*Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR), UMR CNRS 6164, Université de Rennes 1, carole.leduc@univ-rennes1.fr, maxim.zhadobov@univ-rennes1.fr, ronan.sauleau@univ-rennes1.fr

\*\* NASA Jet Propulsion Laboratory  
Nacer.E.Chahat@jpl.nasa.gov

---

Mots-clefs : Ondes millimétriques, réseaux corporels sans fil, dosimétrie, antennes  
Keywords: Millimeter waves, wireless body area networks, dosimetry, antennas

---

#### Résumé

Ce papier présente les résultats d'une étude comparative entre plusieurs réseaux d'antennes imprimées (2x2 éléments) 60 GHz dont la méthode d'alimentation diffère de l'un à l'autre. Chaque réseau est analysé et comparé aux autres en termes de dimension, de performance en rayonnement à 60 GHz et de couplage avec le corps humain. Le niveau d'exposition du corps est quantifié et interprété à l'aide d'un fantôme équivalent de la peau.

Les résultats de cette étude sont importants compte tenu de l'augmentation du nombre d'applications dans la bande 57-64 GHz (réseaux personnels sans fil à haut débit, réseaux hétérogènes, réseaux corporels émergents, etc.). Ce sont les premiers mettant en avant l'impact de certains critères de conception liés à l'alimentation des antennes, sur les interactions avec le corps, et ceci via l'évaluation et la quantification des niveaux d'exposition. La présence d'un plan de masse sur la face arrière du réseau et le maintien d'un écart de  $0,5 \lambda_0$  entre chaque antenne sont deux de ces critères. Le premier permet de réduire le niveau de rayonnement en direction du fantôme / corps, provenant d'éléments rayonnants tel que les lignes d'alimentation, induisant ainsi une réduction d'un facteur 100 des valeurs crêtes de débit d'absorption spécifique (DAS) à la surface du fantôme équivalent. Le second permet de limiter l'apparition de lobes secondaires, influant sur le niveau de rayonnement arrière des réseaux, lequel peut doubler les valeurs de DAS.

#### Summary

This article presents results of a comparative study between several 60-GHz patch antenna arrays with different feeding types. Dimensions, radiation patterns, and antenna/body coupling have been analyzed for each array and compared. Exposure levels induced in the human body model have been quantified and interpreted using a human skin equivalent phantom.

These results are of uppermost importance given the increasing number of wireless applications in the 57-64 GHz band (WPAN, heterogeneous networks, BAN, etc.). This is the first report highlighting the impact of some design characteristics and choice of antenna feeding method on the user exposure. It is demonstrated that using a ground plane and an inter-element spacing of  $0.5 \lambda_0$  allows improving / stabilizing antenna characteristics and simultaneously the exposure of a user. In particular, the presence of a ground plane results in a reduction of the back radiation from the radiating elements as well as from the feeding lines; this enables to reduce the user exposure in terms of the specific absorption rate (SAR) by a factor 100. Furthermore, an inter-element spacing of  $0.5 \lambda_0$  allows reducing the side lobe levels of the radiation pattern, resulting in a reduction of the user exposure by two.

#### 1. Introduction

Les réseaux corporels sans fils ont suscité ces dernières années une forte dynamique de recherche dans les domaines de la conception d'antennes, de l'évaluation des interactions corps/antennes, mais aussi de la propagation à la surface et autour du corps.

Récemment la bande millimétrique et plus particulièrement la bande 57-64 GHz a été identifiée comme très prometteuse pour les communications sécurisées à haut débit dans le cadre des réseaux corporels sans fil [1], notamment en raison de plusieurs avantages comparés aux fréquences plus basses [2], à savoir : (1) des débits de transferts de données pouvant atteindre 7 Gbit/s offrant la possibilité de transférer des vidéo HD par exemple ; (2) un

fort pic d'absorption atmosphérique à 60 GHz dû aux molécules d'oxygène dans l'air permettant la réduction des interférences et donc la sécurisation entre réseaux voisins ; (3) une réduction de la taille des dispositifs. Ce dernier point est important, car, pour être facilement intégrables sur le corps, les antennes doivent être compactes, discrètes et légères.

Dernièrement, plusieurs structures antennaires ont été développées à 60 GHz pour les réseaux corporels, par exemple des antennes souples réalisées sur textile [3]. Des techniques permettant l'évaluation dosimétrique des interactions entre corps et antennes en millimétrique ont également été décrites [4,5]. Mais jusqu'à présent, la minimisation des interactions des structures rayonnantes avec le corps humain n'a fait l'objet d'aucune étude dans la bande millimétrique. Pourtant, c'est un point essentiel du point de vue de la sécurité sanitaire des utilisateurs. En effet, les limites d'expositions ne fournissent aucune recommandation en matière d'exposition aux ondes millimétriques *en champs proche* [6]; or ces niveaux peuvent être localement très élevés en raison de la faible profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans le corps.

C'est dans ce contexte général, que nous avons réalisé une étude ayant pour objectif de proposer des solutions minimisant l'exposition à 60 GHz des utilisateurs dans le cadre des communications centrées sur le corps. Pour cela, plusieurs réseaux d'antennes imprimées 60 GHz dont l'alimentation diffère de l'un à l'autre, ont été conçus et comparés numériquement. Les niveaux d'exposition relatifs à chaque type d'alimentation ont été quantifiés, afin de mettre en avant les topologies de conception assurant :

- (1) une exposition minimale de l'utilisateur ;
- (2) une stabilité des performances antennaires en présence du corps.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Principe

Trois types de réseaux ont été étudiés (Fig. 1). Ils comportent  $2 \times 2$  éléments écartés par un espace inter-élément noté  $d_s$ , et diffèrent principalement en raison de la technique d'alimentation utilisée. Leurs performances en impédance et rayonnement sont étudiées en présence du corps.

Modification de la méthode d'alimentation entraîne des différences importantes entre les structures des réseaux d'antennes, notamment en ce qui concerne la topologie (nombre et épaisseur des couches de substrat(s)). Le substrat qui compose les structures des différents réseaux est du Rogers Duroïd 5880 ( $\epsilon_r = 2,23$  et  $\tan(\delta) = 0,003$  à 60 GHz) dont l'épaisseur peut varier en fonction du réseau d'antennes. Les épaisseurs utilisées en conception sont des épaisseurs standards (127  $\mu\text{m}$  pour les plus fines, de 381  $\mu\text{m}$  pour les plus épaisses).

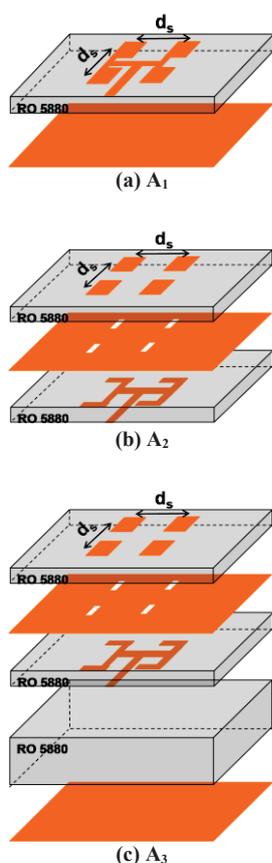


Fig. 1: Schémas en vue explosée des réseaux d'antennes étudiés

Le premier réseau d'antennes  $A_1$  (Fig. 1a), est le réseau de départ de l'étude. Les éléments rayonnants sont alimentés par des lignes microruban. L'écart entre éléments rayonnants  $d_s$  est de  $0,68\lambda_0$ . Il est difficile de le réduire car l'arborescence d'alimentation se situe au même niveau que les antennes. Sur la face arrière de la structure se trouve un plan de masse dont les dimensions sont identiques à celles du substrat (14mm $\times$ 14mm).

Le second réseau d'antennes  $A_2$  (Fig. 1b) possède une structure multicouche permettant de séparer sur deux niveaux l'arborescence d'alimentation et les éléments rayonnants ; ainsi il est possible de maintenir un écart entre antennes égal à une demi-longueur d'onde dans le vide, à savoir 2,5mm à 60 GHz. Les antennes sont alimentées par des fentes couplées (ACPA) excitées par des lignes microruban se trouvant sur la face opposée.

Le troisième réseau d'antennes  $A_3$  (Fig. 1c) possède certains points communs avec le réseau  $A_2$ . En effet, il s'agit également d'un réseau multicouche permettant de séparer sur deux niveaux différents l'arborescence d'alimentation d'une part et les éléments rayonnants d'autre part, ce qui permet de maintenir la valeur de  $d_s$  égale à  $0,5\lambda_0$ . Les antennes sont alimentées par fentes couplées (ACPA), mais, à la différence du réseau  $A_2$ , les fentes sont excitées par lignes triplaques. Ce réseau possède donc une couche de substrat supplémentaire et un plan réflecteur sur la face opposée à la face rayonnante.

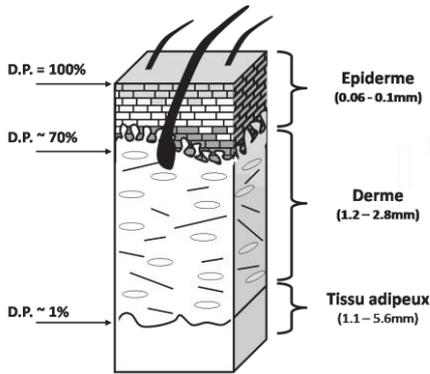
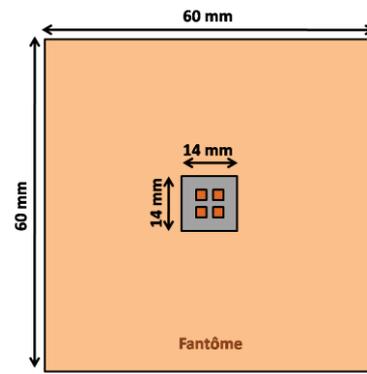


Fig. 2: Schéma structurelle de la peau humaine



(a) Vue de dessus



(b) Vue latérale

Fig. 3: Schémas du positionnement des réseaux en présence du fantôme

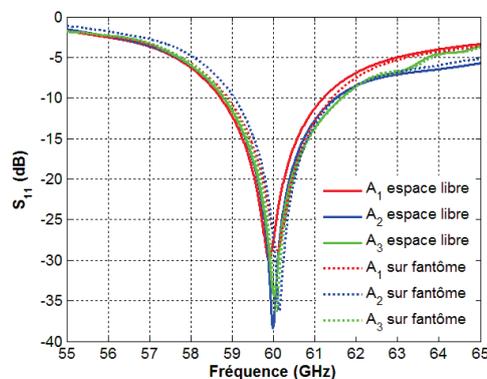
## 2.2. Evaluation des interactions corps/antennes

Afin d'évaluer numériquement les interactions entre le corps humain et les antennes à 60 GHz (exposition de l'utilisateur et modifications des performances d'antennes due à la présence du corps), nous utilisons un fantôme possédant des propriétés diélectriques équivalentes à celles des tissus humains. En bande millimétrique, l'absorption du rayonnement est limitée aux couches superficielles du corps : à 60 GHz la profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans les tissus est seulement de l'ordre de 0,5 mm ; l'absorption est donc essentiellement concentrée dans la peau (Fig. 2). Environ 30% de la puissance est absorbée par l'épiderme et 69% par le derme. L'utilisation d'un fantôme équivalent homogène possédant des propriétés diélectriques équivalentes à celles de la peau humaine est donc suffisante à 60 GHz. Il existe plusieurs modèles diélectriques de peau humaine. Pour cette étude, le modèle de Gabriel *et al.* [6] est pris comme référence ; il établit les propriétés suivantes<sup>o</sup>:  $\epsilon_r = 7,98$  et  $\tan(\delta) = 1,37$ . Le positionnement des réseaux d'antennes par rapport au fantôme est présenté schématiquement sur Fig. 3.

## 3. Résultats

### 3.1. Adaptation des réseaux d'antennes sur la bande 55-65 GHz

Les dimensions des réseaux d'antennes sont optimisées de manière à obtenir une adaptation centrée sur 60 GHz (Fig. 4). Il est aussi important de noter que, quelle que soit la méthode d'alimentation, les bandes passantes ont des largeurs équivalentes de l'ordre de 2,5 GHz et que la présence du fantôme n'a que très peu d'impact sur l'adaptation.

Fig. 4: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  des différents réseaux en espace libre et sur le fantôme

### 3.2. Rayonnement des réseaux d'antennes à 60 GHz

L'analyse des diagrammes de rayonnement dans le plan E des différents réseaux, révèle des différences importantes liées à la méthode d'alimentation (Fig. 5).

Le réseau  $A_1$  possède un écartement entre antennes  $d_s$  supérieur à  $0,5 \lambda_0$ , générant des lobes secondaires de rayonnement avec des niveaux élevés (Fig. 5a). Le rapport entre le niveau du lobe principal et celui des lobes secondaires est seulement d'environ -10 dB. Ces lobes secondaires ont un impact sur le rayonnement arrière, puisqu'ils engendrent des niveaux élevés dans les régions  $[+90^\circ ; +120^\circ]$ , et  $[-90^\circ ; -120^\circ]$ .

La comparaison des diagrammes de rayonnement des réseaux  $A_2$  (Fig. 5b) et  $A_3$  (Fig. 5c), permet de quantifier la réduction de niveau de rayonnement arrière induite notamment par la présence d'un plan de masse. Le niveau à  $180^\circ$  passe de -5 dB à -27 dB, soit une réduction supérieure à 20 dB du rayonnement arrière.

Les diagrammes de rayonnement de chaque réseau sont comparés en espace libre et sur le fantôme. On peut observer que le rayonnement arrière du réseau  $A_2$  sans plan de masse est plus fortement impacté par la présence du fantôme que les réseaux  $A_1$  et  $A_3$ , en raison d'une forte absorption dans le fantôme. En présence du fantôme, les niveaux de rayonnement arrière de tous les réseaux sont compris entre -30 et -40 dB.

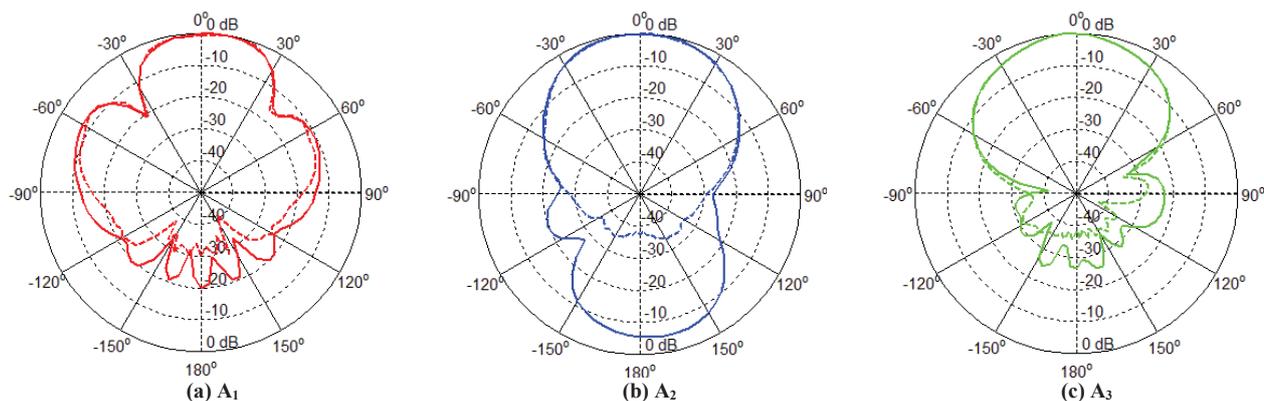


Fig. 5: Diagrammes de rayonnement dans le plan E : en espace libre (—) et sur fantôme (---)

### 3.3 Comparaison des niveaux d'exposition

Les niveaux d'exposition du fantôme sont évalués à l'aide du logiciel de simulation CST MWS en termes de DAS pour une puissance injectée de 10mW.

La forme de la distribution de DAS pour le réseau  $A_1$  (Fig. 6a) est liée aux niveaux des lobes secondaires sur le diagramme de rayonnement (Fig. 5a). Ces derniers engendrent des valeurs maximales de DAS de l'ordre de 7,1 W/kg. Pour le réseau  $A_2$ , les valeurs crêtes de DAS sont concentrées sous le réseau d'antennes, ce qui est en lien avec le phénomène observé en Fig. 5b. La comparaison des valeurs de DAS des réseaux  $A_2$  et  $A_3$  révèle un rapport de plus de 100. En effet, pour  $A_2$ , le DAS maximal est d'environ 374 W/kg alors que pour le réseau  $A_3$  il est seulement de 3,16 W/kg. Il est important de remarquer que, pour le réseau  $A_3$ , la forme de la distribution de DAS (Fig. 6c) est plus diffuse ; il n'y a pas de zone privilégiée d'absorption du rayonnement électromagnétique.

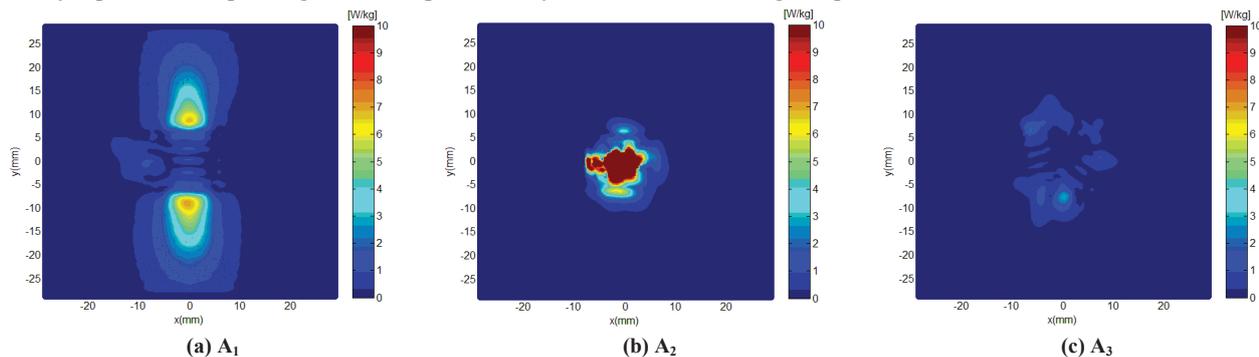


Fig. 6: Distribution de DAS à la surface du fantôme pour des réseaux d'antennes

Ces résultats montrent que la distribution de valeurs crêtes est liée aux spécificités des formes de diagramme de rayonnement. Ils mettent en évidence qu'en s'imposant certain critère sur le choix d'alimentation des réseaux d'antennes il est possible de réduire de façon significative les valeurs crêtes et donc de garantir la sécurité sanitaire des utilisateurs.

## 4. Conclusion

A travers cette étude nous avons exploré et proposé des solutions efficaces afin d'une part de réduire le niveau de DAS et d'autre part d'améliorer la robustesse des performances du réseau d'antennes en présence du corps. Plus particulièrement, l'analyse et la comparaison numériques de différents réseaux d'antennes imprimées ont permis :

- (1) de s'assurer que les performances antennaires sont peu sensibles à la présence du fantôme. L'analyse de l'adaptation sur la bande 55-65 GHz a mis en évidence de très faibles variations de bande passante entre les réseaux en espace libre et ceux en présence du fantôme équivalent ;
- (2) d'évaluer le niveau d'exposition relatifs à chaque type d'alimentation. La comparaison des diagrammes de rayonnement a montré que les niveaux de rayonnement arrière peuvent varier de plusieurs dizaines de dB en fonction du type d'alimentation ;
- (3) de quantifier l'impact de certains éléments ou critères de conception des réseaux d'antennes sur le couplage corps/antennes et de souligner leur intérêt. En effet, pour limiter le couplage, un espace inter-élément de l'ordre de  $0,5\lambda_0$  ainsi que la présence d'un plan de masse arrière sont indispensables (résultats attendus qualitativement, mais quantifiés ici en termes de DAS).

L'étude antennaire est maintenant en cours de finalisation avec la réalisation déjà de deux des trois réseaux d'antennes présentés dans ce papier. Ces réseaux ont été en partie mesurés, et l'étude dosimétrique expérimentale est en cours. Une évaluation thermique des expositions en champ proche est également envisagée : elle est indispensable du point de vue sécurité sanitaire dans le cadre des réseaux corporels en raison de l'absence de norme et recommandations en bande millimétrique en zone de champ proche.

## Remerciements

Cette étude a été financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR). Ce travail a bénéficié du soutien du Labex COMIN Labs (programme ANR « Investissements d'avenir » ANR-10-LABX-07-01) dans le cadre du projet ResCor/BoWi et de l'Université de Rennes 1.

## Références bibliographiques

- 1- A. Pellegrini, A. Brizzi, L. Zhang, K. Ali, Y. Hao, X. Wu, C. C. Constantinou, Y. Nechayev, P. S. Hall, N. Chahat, M. Zhadobov, R. Sauleau. Antennas and propagation for body-centric wireless communications at millimeter-wave frequencies: A review. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55(4), pp. 262 - 287, Aug. 2013.
- 2- P. F. M. Smulders, "Exploiting the 60-GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects and Future Directions," *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no. 1, pp. 140-147, Jan. 2002
- 3- N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq, and R. Sauleau, "Wearable End-fire Textile Antenna for On-Body Communications at 60 GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters*, vol. 11, pp. 799-802, Jul. 2012
- 4- N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq, S. I. Alekseev, and R. Sauleau, "Characterization of the Interactions Between a 60-GHz Antenna and the Human Body in an Off-Body Scenario," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5958-5965, Dec. 2012
- 5- M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement, and Y. Le Drean, "Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 3, no. 2, pp 237-247, Apr. 2011
- 6- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, vol. 74, pp. 55-64, 2012
- 7- S. Gabriel, R. W. Lau and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for dielectric spectrum of tissues", *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, pp. 2271-2293, Nov. 1996