

# Antennes à structures périodiques pour réduire l’empreinte environnementale

M. Mo<sup>1</sup>, J. Verdier<sup>2</sup>, B. Allard<sup>2</sup>, J.-M. Duchamp<sup>1</sup>, Ph. Benech<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, laboratoire G2Elab, UMR5269

<sup>2</sup> Univ Lyon, INSA Lyon, Université Lyon1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Laboratoire Ampère, UMR5005  
manqi.mo@grenoble-inp.fr

**Résumé** – Cet article présente une première étude sur l’application de motifs périodiques sur une antenne planaire et sur une antenne sur substrat en acide Polylactique.(PLA) Les simulations démontrent que l’application de tels motifs sur une antenne patch permet de miniaturiser l’antenne ainsi que de réduire la quantité de conducteur souvent un métal « lourd » et polluant dans notre cas du cuivre. Une antenne patch a été fabriquée et mesurée en tant qu’antenne de référence pour la comparer à des antennes dotées de motifs "carré partiel décalé"(model A) et motifs "rectangle partiel"(model B) en FR4 et les deux premiers modèles sont réalisés en PLA. Les mesures révèlent que le model A en FR4 présente un facteur de réduction de 6,7% et xx% pour celui en PLA et le modèle B en FR4 présente un facteur de 12,7%

## 1. Introduction

Les objets communicants type « Internet of Things » (IoT) nécessitent une source d’énergie et doivent pouvoir échanger des informations soit par couplage électromagnétique, soit par transmission d’ondes radio et requièrent donc une antenne. Par ailleurs la dispersion de ces objets dans nos environnements nécessite une vigilance sur leur cycle de vie et les matériaux utilisés. Dans ce contexte le projet ANR AMBRE se propose d’étudier la réalisation de ces objets sur un substrat polymère biosourcé à base d’acide Polylactique (ou PLA). Ces objets sont constitués de plusieurs fonctions : un ou plusieurs capteurs, un microcontrôleur (pour le traitement de l’information) et un élément de stockage (type capacité) ainsi qu’une antenne voire un circuit pour la récupération d’énergie électromagnétique (EM). Plusieurs travaux ont été initiés autour des performances issues de l’association de couches diélectriques type PLA et d’encres conductrices pour les circuits électroniques plutôt en basse fréquence voire pour des antennes [1]. Toutefois plusieurs voies exploratoires antennaires prometteuses restent à étudier. En effet les pertes supplémentaires : diélectriques et conductrices induites respectivement par le PLA et les encres conductrices peuvent être acceptables pour des signaux faibles fréquence mais rédhibitoires pour un élément rayonnant telle qu’une antenne.

Dans cet article nous présentons une étude sur des antennes planaires du type patch mais intégrant des motifs périodiques particuliers avec deux objectifs réduire la présence de métaux lourds (conducteurs) ainsi que le volume de diélectrique pour réduire la taille des antennes, tout en maintenant un gain suffisant. Dans une première étape pour avoir une antenne de référence et une validation des concepts des antennes ont été réalisées sur

un substrat FR4. Dans un second temps, elles ont été réalisées sur un substrat de type PLA par à l’aide d’une méthode d’impression additive 3D.

Des travaux issus de la littérature [2-3-4] montrent qu’en structurant les surfaces métalliques (élément rayonnant et/ou plan de masse) d’une antenne de type patch à l’aide de motifs périodiques il est possible d’améliorer les caractéristiques des antennes.

Nous présentons une première étude concernant des motifs périodiques. L’objectif est de déterminer l’influence du nombre et de leurs dimensions pour dans un second temps les implanter sur un substrat PLA [1].

Dans cet article, nous présentons dans la partie 2 les résultats de simulation de structures de patch classiques et avec des motifs périodiques. Dans la troisième partie nous présentons des résultats de mesure, puis nous concluons.

## 2. Antennes en FR4

### 2.a. Antennes patch classiques

Les antennes patch sont des antennes bien connues et dont la conception est bien décrite dans [5]. La conception de ce type d’antenne peut être décomposée en plusieurs étapes. L’étape clé est la détermination de la longueur ( $L_{patch}$ ) pour fixer la fréquence de fonctionnement de l’antenne ( $f_c$ ) en fonction de  $\epsilon_{r,eff}$  la permittivité relative effective de l’antenne (qui dépend de celle du substrat).

$$L_{patch} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{c}{2 f_c \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \quad (1)$$

Le rayonnement de ce type d’antenne peut être décrit par un circuit électrique équivalent une capacité en parallèle avec la résistance de rayonnement de l’extrémité. Du fait de la longueur électrique du patch en  $\lambda_g/2$ , la capacité de l’extrémité opposée à la ligne est vue sur l’autre bord comme une réactance de valeur opposée à celle de la capacité équivalente. Il en résulte que l’impédance de ce type d’antenne à la fréquence  $f_c$  est réelle  $R_{in}$  et égale à :

$$R_{in} = \frac{60 \lambda_0}{W_{patch} \left( 1 - \frac{1}{24} \left( 2\pi \frac{h}{\lambda_0} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

avec  $\lambda_0 = \frac{c}{f_c}$

Pour des substrats classiques cette impédance est proche de 200  $\Omega$ . De plus, nous avons volontairement choisi une géométrie carrée pour le patch afin de faciliter l’implantation de motifs périodiques symétriques. Ce choix impose un  $W_{patch}$  plus petit et donc une impédance d’entrée encore plus grande. Pour garantir une adaptation d’impédance à 50  $\Omega$  il est nécessaire d’avoir recours soit

à une ligne d'accès utilisée en transformateur d'impédance soit des fentes qui permettent de décaler le plan d'excitation. La solution choisie a été celle de la ligne d'accès de longueur  $L_{accès}$  et de largeur  $W_{accès}$ , pour limiter l'impact sur la périodicité des motifs. Une antenne dans la bande de fréquence autour de 900 MHz a été réalisée, sur un substrat FR4 de permittivité relative  $\epsilon_r = 4,5$  et d'épaisseur  $h = 1,6$  mm. L'antenne de référence en FR4 est un carré de 79,4 mm de côté avec une ligne d'accès de 35 mm de longueur et de 2 mm de largeur.

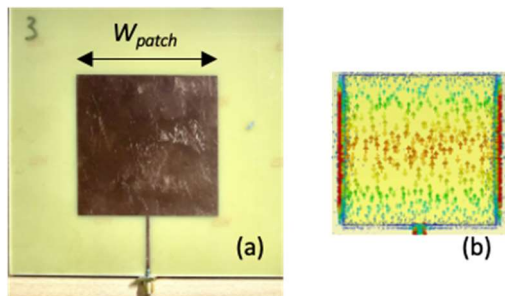


Figure 1. Photo de l'antenne patch classique sur FR4 (a) ainsi que la distribution des lignes de courant à la fréquence de résonance (b)

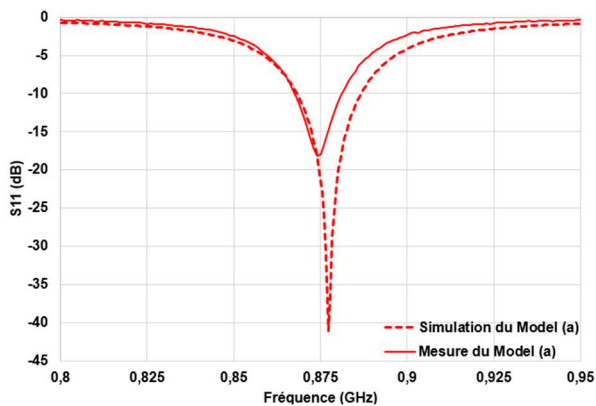


Figure 3. Mesures et simulation de l'adaptation  $S_{11}$  de l'antenne patch autour de 900 MHz

L'antenne est conçue pour fonctionner à une fréquence de 877 MHz. La simulation (CST Microwave) indique un coefficient de réflexion de -41 dB, tandis que la mesure montre une fréquence de résonance à 875 MHz et un coefficient de réflexion de -20 dB. Cette disparité peut être expliquée par une différence d'adaptation des connecteurs et des problèmes de soudure.

### 2.b. Antennes patch à motif périodique

Plusieurs articles décrivent l'amélioration des performances des antennes en utilisant une répétition périodique de motifs voire de méta-surfaces. Cependant, dans aucun article, le choix de la forme, des dimensions et du nombre de ces motifs périodiques ne sont justifiés. Dans cette partie nous tentons de proposer une méthode de dimensionnement de ces motifs. Un premier motif nommé « carré partiel » est proposé. Il s'agit de supprimer un quart de la surface conductrice de l'élément rayonnant. Cette suppression est motivée par la réduction des matériaux « lourds » difficiles à recycler et qui sont

présents dans les encres conductrices. De plus, cette absence de conducteur a pour effet d'augmenter le parcours des lignes de courant et donc la longueur effective de l'antenne d'où une réduction de la fréquence d'accord. Une réduction des dimensions de l'antenne permet de réaccorder la fréquence de fonctionnement à la fréquence désirée et induit moins de matières à recycler.

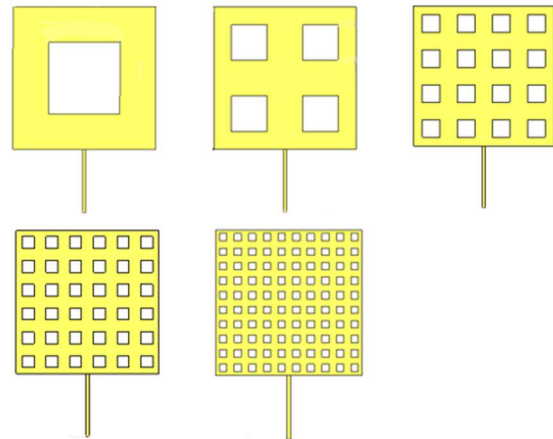


Figure 4. Antenne patch avec des périodes de motif « carré partiel » de 1 à 100

Le principe consiste à subdiviser l'élément rayonnant de l'antenne patch en un nombre croissant de motifs identiques soit celui du « carré partiel ». La Figure 5 décrit des antennes patch dont période ( $n$ ) du motif « carré partiel » est égale à  $n = 1, n = 4, n = 16, n = 36$  et  $n = 100$ .

Antenne	$f_0$ (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Gain maximal (dB)
Classique	0,903	-28,1	-1,1
$n = 1$	0,7	-10,9	-7,2
$n = 4$	0,83	-14	-3,8
$n = 16$	0,86	-17	-3,1
$n = 36$	0,872	-21,5	-1,9
$n = 64$	0,878	-23,3	-2
$n = 100$	0,884	-25	-1,7

Tableau 2. Résultats de simulations des antennes à motifs carré de la figure 4

Les résultats des simulations (décrit dans le tableau 2) indiquent que l'utilisation du motif « carré partiel » permet de réduire la taille de l'antenne (ou réduire la fréquence de fonctionnement) mais au détriment de l'adaptation d'impédance et du gain de l'antenne. À mesure que le nombre de période  $n$  du motif « carré partiel » augmente, les performances de l'antenne convergent vers celles de l'antenne patch de référence.

En effet, la suppression de 25% de la surface du conducteur coté élément rayonnant modifie la distribution des lignes de courant. Les résultats présentés sur la Figure 5 montre l'évolution de cette distribution du courant en fonction du nombre de période du motif « carré partiel » et pour  $n = 64$  la distribution du courant est très proche à celle du patch de référence.

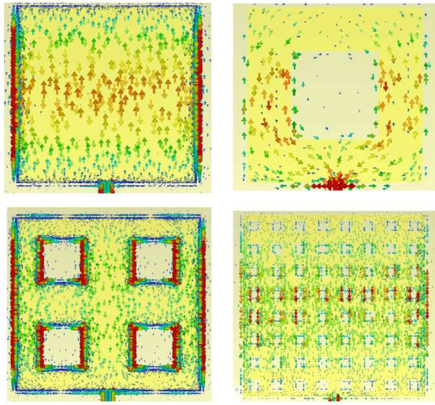


Figure 5. Distribution des courants dans les antennes patch de référence et celles pour  $n=1$ ,  $n=4$  et  $n=64$

Pour tenter de conserver, l'effet de miniaturisation lié à l'accroissement de la longueur des lignes de courant nous avons imaginé de décaler les motifs périodiques d'une demi-période comme décrit sur Figure 6 (qui est la version modifiée de l'antenne de  $n=16$  périodes de la Figure 4). Pour augmenter l'effet d'allongement des lignes de courant nous avons tenté de doubler le nombre de motifs périodiques mais seulement dans la direction de propagation d'où la forme rectangulaire des parties privées de conducteurs présentées sur la Figure 6(b), les linge d'accès sont dimensionnées et décalées pour adapter l'impédance.

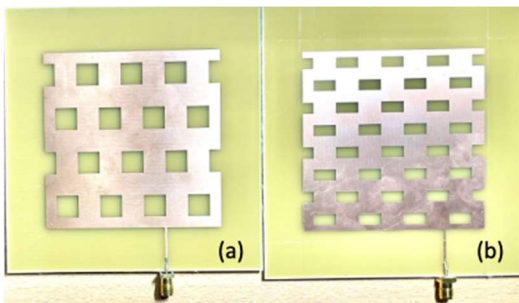


Figure 6. Photos des Antennes motif « carré partiel » décalé (model a)  $n=16$  (a) et motif « rectangle partiel » (model b) décalé  $n=16$  (b) sur FR4

La figure 7 présente les résultats de simulation et de mesure du coefficient de réflexion des antennes de la figure 6

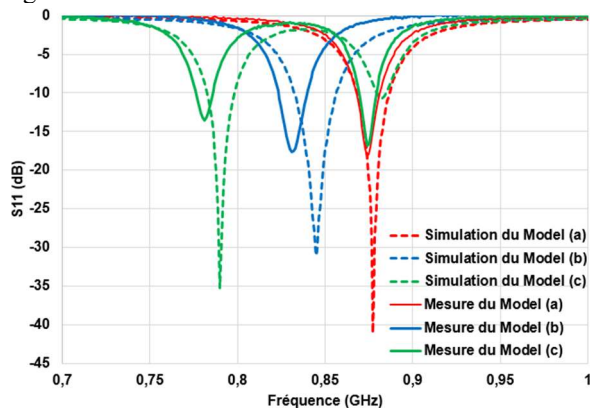


Figure 7. Simulation et mesure de paramètres  $S_{11}$  des antennes

Le modèle (a) présente une fréquence de résonance de 835 MHz tandis que le modèle (b) affiche une fréquence de résonance de 795 MHz. Cela correspond à un facteur de miniaturisation ( $FM = \frac{f_{original}}{f_{miniaturisée}} - 1$ ) d'environ 5% pour le modèle (a) et de 10% pour le modèle (b) par rapport à l'antenne de référence qui rayonne à 877 MHz.

L'effet de miniaturisation est présenté dans le tableau suivant :

	$f_0$ (MHz) (Sim.)	$f_0$ (MHz) (Mes.)	FM (Sim.)	FM (Mes.)
Model (a)	877	875	0	0
Model (b)	844	831	4%	5,3%
Model (c)	790	782	11%	11,9%

Tableau 3. Comparaison entre antennes fabriquées dans cet article.

Le gain maximal des antennes est également évalué en utilisant l'équation de Friis. La valeur du gain maximal est corrigée en prenant en compte la correction d'adaptation.

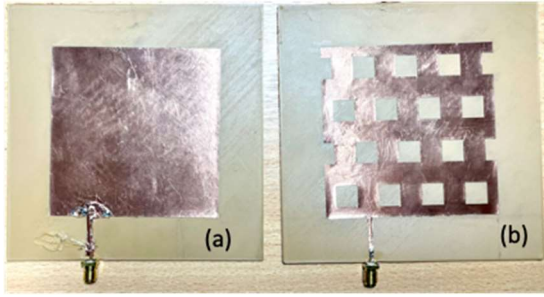
	En simulation (dB)	En mesure (dB)
Model (a)	-0,9	-2,74
Model (b)	-3,19	-5,47

Tableau 4. Le gain maximal des antennes mesurées

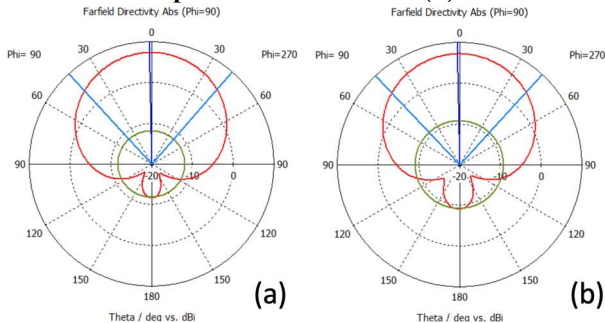
### 3. Antennes en PLA

Dans cette partie nous présentons l'étude et les mesures d'antennes patch à motifs périodiques analogues à celles présentées dans la section précédente mais conçues sur un substrat PLA (acide polylactique). Pour aller un peu plus loin dans la démarche d'éco-conception et de recyclabilité, après la réduction du volume des conducteurs ou métaux lourds, une étude du remplacement du diélectrique par du PLA. C'est un type de bioplastique fabriqué à partir de ressources renouvelables telles que l'amidon de maïs ou la canne à sucre. De plus le PLA est largement utilisé en impression 3D et offre une simplicité de réalisation avec une grande diversité de forme. La permittivité relative diélectrique du PLA disponible au laboratoire a été extraite à partir de la méthode des deux lignes de propagation [6]. La valeur obtenue est  $\epsilon_r = 2,55$  entre 1 et 3 GHz. Deux antennes patchs ont été réalisées avec ce substrat PLA d'épaisseur  $h = 1$  mm. Les couches conductrices ont été réalisées à l'aide de films de cuivre autocollants d'épaisseur  $t = 35$   $\mu$ m. Les motifs sur ces conducteurs ont été réalisés à l'aide d'une machine de découpe laser. Une antenne patch « 100% » et une seconde avec 25% de cuivre en moins à motif « carré partiel » décalé ont été réalisées (figure 8). Pour ces deux antennes l'adaptation d'impédance a été réalisée par un décalage de la ligne d'accès.

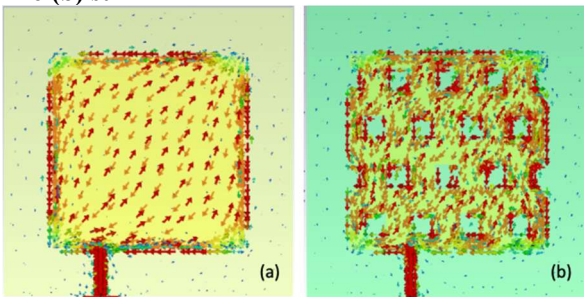




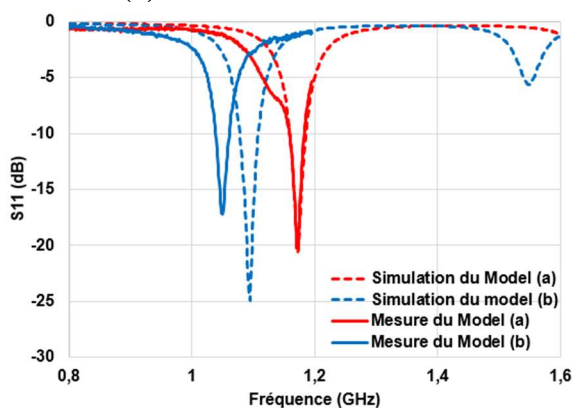
**Figure 8. Photos des antennes patch « 100% » (a) et à motif « carré partiel » décalé  $n=16$  (b) sur PLA**



**Figure 9. Diagramme de rayonnement des antennes patch « 100% » (a) et à motif « carré partiel » décalé  $n=16$  (b) sur PLA**



**Figure 10. Distribution de la densité de courant des antennes patch « 100% » (a) et à motif « carré partiel » décalé  $n=16$  (b) sur PLA**



**Figure 11. Simulation et mesures de paramètres  $S_{11}$  des antennes de type (a) et (b) sur PLA**

Les simulations des diagrammes de rayonnement aux fréquences de résonance conduisent à 1,17 GHz (antenne fig.8(a)) avec un gain du lobe principal de 7,3 dBi et de 1,09 GHz avec 7,1 dBi (antenne fig.8(b)) (Figure 9). Un facteur de miniaturisation de 7.3 % est obtenue et les distributions de la densité de courant de chacune de ces antennes à la fréquence de résonance sont décrites (Figure 10). Les résultats de mesures et de simulations des

paramètres de réflexion  $S_{11}$  confirment cet effet de réduction (Figure 11)

#### 4. Conclusion

Cet article propose deux innovations pour la conception d'antennes patch. La première est la réduction de la surface rayonnante du conducteur et la seconde l'utilisation d'un diélectrique type PLA (bioplastique).

Dans un premier temps la suppression du cuivre organisée en motif périodiques « carré » permet d'obtenir des performances comparables à celle d'une antenne patch entière (100%). Une étude sur la période du motif montre que plus elle est petite devant la longueur de l'antenne moins cette réduction du cuivre (dans notre cas 25%) n'a d'impact. De plus l'agencement décalé de ces motifs permet de réduire la fréquence de résonance (donc la taille) de ce type d'antennes de l'ordre de 5 à 10%. Cette réduction semble être liée à la modification des lignes de courant. Cette première étude doit être complétée par l'exploration d'autres motifs périodiques.

Dans un second temps le substrat classique FR4 a été remplacé par un substrat PLA. Ce substrat, réalisé par impression 3D, présente des atouts environnementaux qui en font une alternative pertinente aux substrats classiques. De plus, la méthode de réalisation de l'antenne patch sur PLA à l'aide de dépôt de film de cuivre autocollants, découpés au laser, en font une technique propice à la déconstruction et à la recyclabilité.

Les antennes réalisées sur PLA présentent des gains plus faibles que celles en FR4 (quelques dB) mais surtout une signature environnementale plus faible dans les matériaux et les quantités nécessaires qu'il convient encore que quantifiée.

#### Références

- [1] Nguyen, X.V.L. et al. "Radio-Frequency Energy Harvesting Using Rapid 3D Plastronics Prototyping Approach: A Case Study". *J. Low Power Electron. Appl.* 2023, 13, 19. <https://doi.org/10.3390/jlpea13010019>
- [2] Ali, T, et al. "Multiband, frequency reconfigurable, and metamaterial antennas design techniques: Present and future research directions, *Internet Technology*", *Letters* 2018; 1:e19. <https://doi.org/10.1002/itl2.19>
- [3] C. Miliadis et al., "Metamaterial-Inspired Antennas: A Review of the State of the Art and Future Design Challenges," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89846-89865, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091479
- [4] Le-Wei Li, et al.; "A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna". *Appl. Phys. Lett.* 19 April 2010; 96 (16): 164101. <https://doi.org/10.1063/1.3396984>
- [5] C.A. Balanis, "Antenna Theory, Analysis and Design", Chapter 14 (Fourth Edition), Wiley, 2005
- [6] N. K. Das, et al., "Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant," in *IEEE MTT*, vol. 35, no. 7, pp. 636-642, Jul 1987, doi: 10.1109/TMTT.1987.1133722