



HAL
open science

Effet de l'Humidité sur les Performances d'une Antenne Patch en Substrat MDF

Clément Bourretère, Valentin Lourenço Martins, Jean-Yves Deletage, Anthony Giotto

► **To cite this version:**

Clément Bourretère, Valentin Lourenço Martins, Jean-Yves Deletage, Anthony Giotto. Effet de l'Humidité sur les Performances d'une Antenne Patch en Substrat MDF. JNM 2024, Jun 2024, Antibes (06), France. hal-04729092

HAL Id: hal-04729092

<https://hal.science/hal-04729092v1>

Submitted on 9 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Éffet de l'Humidité sur les Performances d'une Antenne Patch en Substrat MDF

Clément Bourretère¹, Valentin Lourenço Martins^{1,2,3}, Jean-Yves Deletage¹ et Anthony Ghiotto¹

¹Laboratoire IMS, Université de Bordeaux, France

²Nouvelle adresse : ONERA/DEMR, Université de Toulouse, France
clement.bourretere@ims-bordeaux.fr

Résumé — De nombreux efforts sont déployés afin de rendre l'industrie de l'électronique plus verte. Cet article présente une conception d'antenne patch utilisant un substrat MDF fonctionnant à 3,21 GHz avec un gain de 6 dBi. Une étude dans une enceinte climatique est menée pour déterminer l'impact de l'humidité sur les performances de l'antenne en substrat MDF. L'expérience permet de montrer un décalage en fréquence de 700 MHz dans un milieu passant d'une humidité relative de 60% à 100% en gardant une adaptation d'impédance $|S_{11}| < 16$ dB à la fréquence de résonance de l'antenne. L'étude montre l'augmentation de 200% de la tangente de perte avec l'augmentation de l'humidité, diminuant ainsi le gain maximal de l'antenne à 0,14 dBi.

1. Introduction

Dans une période de prise de conscience écologique, l'industrie se questionne sur sa responsabilité et sur ses possibilités d'action. Le secteur de l'électronique est particulièrement polluant [1] et son gaspillage "e-waste" contribue à la pollution du sol, de l'eau et de l'air. Cette pollution, impliquée dans le réchauffement climatique et la dégradation des écosystèmes, impacte également la vie humaine avec de nombreux effets répertoriés sur la santé [1]. Le FR4, substrat très répandu, présente du Tetrabromobispheno-A (TBBA) qui est un perturbateur endocrinien [1]. La contribution la plus élevée au gaspillage électronique vient de l'extraction des minerais [2]. Cependant le gaspillage industriel ou individuel est non négligeable et mérite de l'attention. De nombreux efforts sont à approfondir sur l'extraction des matières premières, les procédés de fabrication mais aussi sur la composition des substrats et leur recyclage.

Cet article présente une antenne patch en substrat MDF (cf. Figure 1), éco-responsable, ainsi que l'étude de l'impact de l'humidité sur ses performances. Une première partie présente l'état de l'art du bois dans les systèmes radio-fréquences (RF). Une seconde partie porte sur la conception de l'antenne patch en substrat MDF. Puis, une troisième partie regroupe les mesures en enceinte climatique et les résultats de cette expérience.

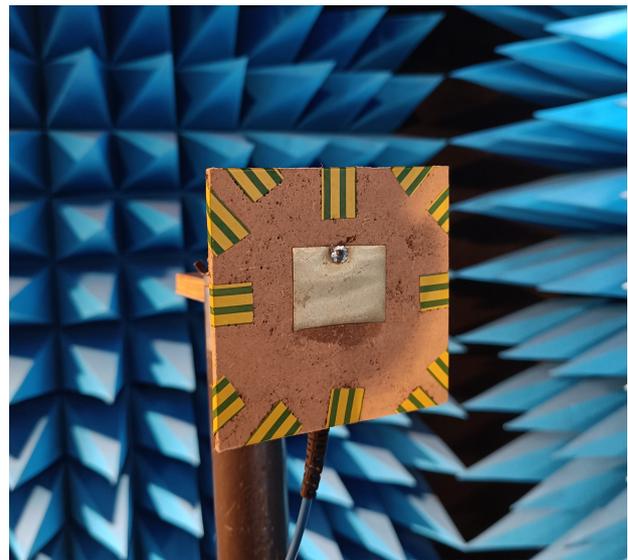


FIGURE 1. Antenne en MDF dans la chambre anéchoïque

2. État de l'art des substrats éco-responsables

2.a. Comparaison de différents substrats

Des alternatives aux substrats électroniques standards tels que le FR4 ou le Rogers ont été étudiés pour des applications bioélectroniques, utilisant des substrats en biomatériaux [3]. Ceux-ci ont tous la particularité d'être des polymères biodégradables issus de matières premières naturelles dont la fabrication nécessite l'intervention de procédés chimiques désavantageux.

2.b. Le substrat bois

L'antenne patch est fabriquée à partir de MDF, du bois directement accessible à l'état naturel, biodégradable et non polluant. De nombreuses recherches ont attestées de la faisabilité de systèmes électroniques sur ce type de matériau avec la preuve de concept d'un transistor basé sur un matériau en bois [4]. Plusieurs efforts sur des antennes utilisant le bois et ses propriétés électriques ont été réalisés comme par exemple des Tags RFID ("Radio Frequency

Identification") [5] utilisant du bois contre-plaqué démontrant l'impact de l'humidité sur la distance de lecture. Une étude d'une plate-forme RFID [6] démontre la faisabilité d'un système comprenant actifs et passifs sur du substrat bois mais aussi un ensemble d'avantages à utiliser le bois : son bas coût, son éco-responsabilité et sa facilité d'emploi. Le MDF est un matériau sensible à l'humidité et il est pertinent d'évaluer son impact dans des applications radio fréquences.

3. Conception d'une antenne patch en substrat MDF

La principale difficulté d'une conception d'antenne sur un substrat MDF est de connaître ses propriétés électromagnétiques. Les paramètres fondamentaux sont la permittivité diélectrique ϵ_r , la tangente de perte $\tan(\delta)$ et les dimensions physiques de hauteur de substrat h , de longueur de patch L et de largeur de patch W (cf. Figure 2 et Tableau 1). Le substrat utilisé pour la réalisation de l'antenne patch en MDF est le MDF ("Medium-Density Fibre-board"), avantageux pour son homogénéité. De la rétro-ingénierie permet de déterminer ses propriétés électromagnétiques. Ainsi, une antenne patch alimentée par sonde ("probe feed") avec des dimensions adaptée aux caractéristiques électromagnétiques du MDF pour un fonctionnement à 3,2 GHz est fabriquée.

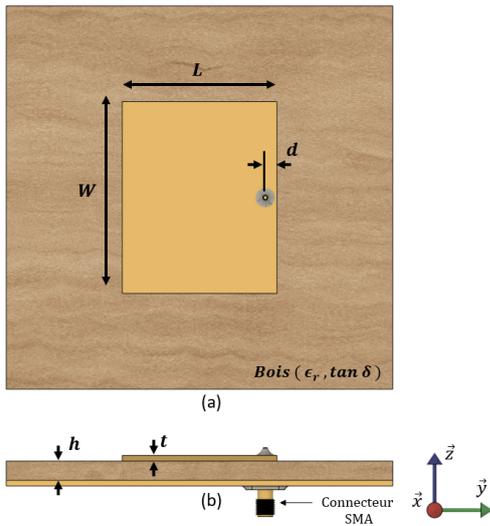


FIGURE 2. Conception d'une antenne patch, (a) vue de dessus, (b) vue de côté

Après mesures sur un analyseur de réseau vectoriel (VNA - Rhode&Schwarz ZND), l'antenne réalisée est centrée à 3,21 GHz et présente une adaptation de -17 dB (cf. Figure 3) avec un gain maximal de 6 dBi mesuré en chambre anéchoïque (cf. Figure 1).

4. Impact de l'humidité sur les performances de l'antenne

4.a. Présentation du banc de mesures

L'humidité a un impact sur le MDF étant donné qu'il s'agit d'un matériau variant avec son environnement, ab-

ϵ_r	$\tan(\delta)$	W	L
2,1	0,05	40	32
r	t	h	d
2	0,1	3	3

TABLEAU 1. Paramètres physiques et dimensions en millimètre de l'antenne

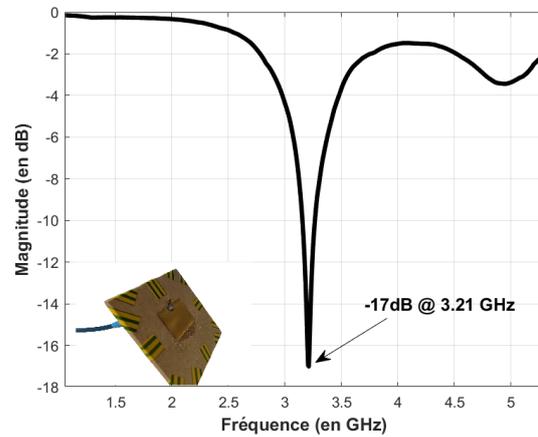


FIGURE 3. Paramètre $|S_{11}|$ de l'antenne en MDF hors enceinte climatique

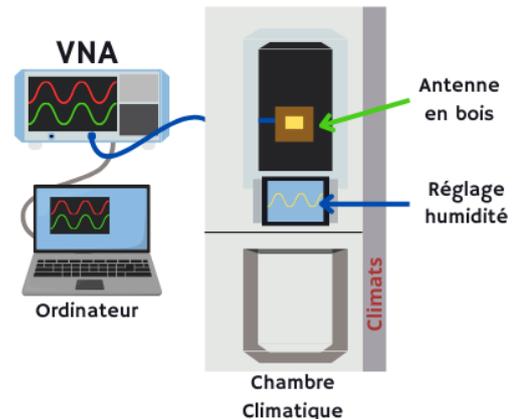


FIGURE 4. Banc de mesures en enceinte climatique

sorbant l'eau. Afin d'observer l'impact de l'humidité sur l'antenne patch en substrat MDF, celle-ci a été placée dans une enceinte climatique (Climats EXCAL²) de type "chaleur humide" (cf. Figure 4,5). Un VNA est disposé en dehors de l'enceinte et est relié à l'antenne par un câble coaxial. Une mousse isolante permet le passage de ce câble et assure l'étanchéité de l'enceinte climatique. Une mousse radiofréquence est placée face à l'antenne pour limiter les interférences dans l'enceinte. La température de l'enceinte climatique est fixée à température ambiante c'est-à-dire à $T = 300 K$. L'humidité relative (HR) présente au sein de l'enceinte climatique, exprimée en %, est contrôlée via l'interface utilisateur de l'enceinte climatique.

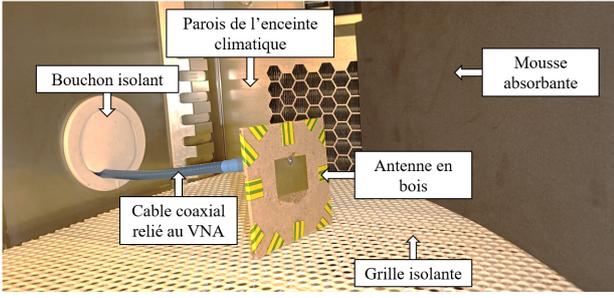


FIGURE 5. Antenne à l'intérieur de l'enceinte climatique

La permittivité équivalente de l'antenne dépend de $\epsilon_{r,MDF}$ mais aussi de $\epsilon_{r,air}$. En se référant à l'équation suivante [7] :

$$\epsilon_{r,air} = 1 + \frac{211}{T} \left(P + \frac{48 \cdot P_S}{T} \cdot HR \right) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

où T est la température ambiante, $T = 300 \text{ K}$, P la pression dans l'enceinte climatique, $P = 760 \text{ mmHg}$ ($1 \text{ mmHg} = 1,33 \text{ hPa}$), P_S la pression de vapeur d'eau saturée à la température T , $P_S = 22,5 \text{ mmHg}$ et HR_{air} l'humidité relative dans l'air.

$$\epsilon_{r,air} = 1,000536 @ HR_{air} = 60\% \quad (2)$$

$$\epsilon_{r,air} = 1,000537 @ HR_{air} = 100\% \quad (3)$$

La variation de la permittivité relative de l'air est négligeable au regard de l'évolution de la permittivité relative du MDF en fonction de l'humidité.

4.b. Les mesures

Le VNA mesure la réflexion ($|S_{11}|_{dB}$) permettant de visualiser l'évolution de l'adaptation de l'antenne avec une contrainte forte d'humidité relative dans l'enceinte climatique (HR_{air}) au cours du temps fixée à 100%. Ceci traduit un vieillissement accéléré. Le paramètre $|S_{11}|$ est enregistré tout au long de l'expérience c'est à dire avec une montée progressive de l'humidité dans le MDF HR_{MDF} allant d'environ 60% (le taux actuel d'humidité dans l'air) à 100%. Les mesures de fréquences de résonance en Figure 6 permettent de déterminer par calcul la permittivité relative $\epsilon_{r,MDF}$ du substrat MDF en fonction de l'humidité et son évolution au cours du temps.

Ne disposant pas de capteur d'humidité à l'intérieur de l'antenne, la valeur de HR_{MDF} n'est pas mesurable. Ainsi, les résultats sont présentés en fonction du temps. L'évolution de la fréquence de résonance de l'antenne en MDF est visible en Figure 7.

La relation entre fréquence de résonance d'une antenne patch et les paramètres physiques de l'antenne [8] permet de déterminer la permittivité relative du MDF (cf. Figure 8) en fonction de la fréquence f_c mesurée sachant

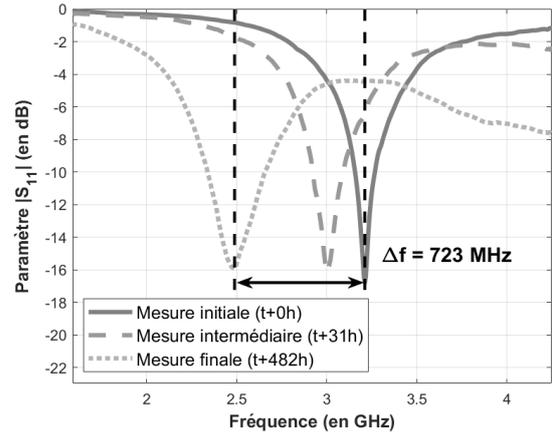


FIGURE 6. Variation du paramètre $|S_{11}|$ de l'antenne pendant la prise d'humidité

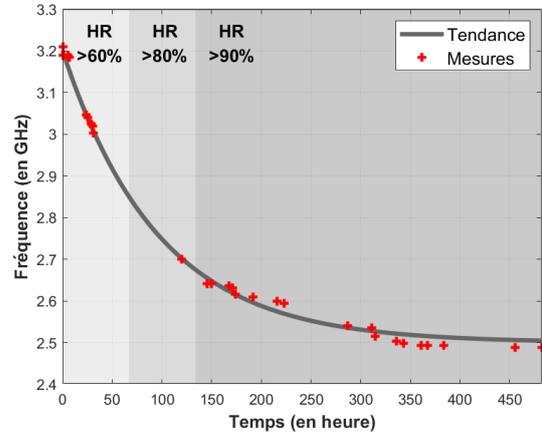


FIGURE 7. Évolution de la fréquence de résonance en fonction du temps

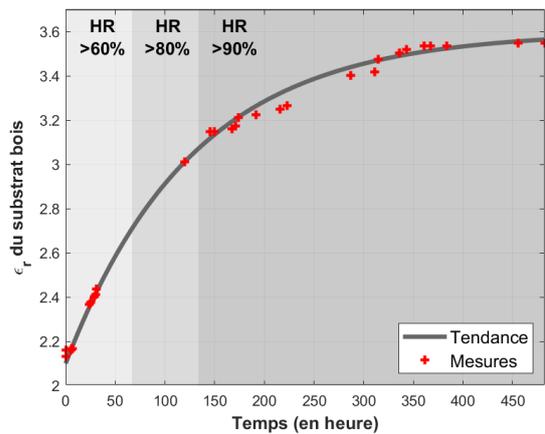


FIGURE 8. Évolution de $\epsilon_{r,MDF}$ en fonction du temps avec $HR = 100\%$

que la célérité c de l'onde dans le vide et la longueur ca-

ractéristique L de l'antenne patch sont invariants :

$$f_c = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Le régime permanent des tendances de la fréquence de résonance et de la permittivité du MDF est atteint à environ 500 heures. Sachant que l'humidité HR_{air} de l'enceinte est depuis le début à 100% , il peut être estimé qu'à $t + 500h$ HR_{MDF} se stabilise à 100%. Par ailleurs, les allures de l'évolution de la fréquence de résonance et de la permittivité relative en fonction du temps respectivement en Figure 7 et Figure 8 suivent une loi de *diffusion* dit aussi *loi de Fick* déjà mis en lumière dans une étude de diffusion d'humidité dans des matériaux composites [9] et donnée par l'équation 5,

$$\frac{\partial c(X,t)}{\partial t} + \text{div } \vec{q}(X,t) = 0 \quad (5)$$

où $c(X,t)$ est la concentration en eau dans le matériau en un point $X = (x, y, z)$ à un instant t et $\vec{q}(X,t)$ le vecteur flux d'humidité [9]. Une solution de la loi de Fick pour le modèle de l'étude est de forme exponentielle (cf. équations 6,7) dont les conditions initiales ("0" pour $HR_{MDF} = 60\%$) et finales ("∞" pour $HR_{MDF} = 100\%$) ainsi que les constantes de temps et la tangente de perte du substrat MDF en fonction de HR_{MDF} figurent dans le tableau 2. Par comparaison, $\tan(\delta)_{FR4} = 0,03 @ 1 GHz$. Ces considérations chimiques permettent de prédire l'évolution des performances de l'antenne au cours du temps et de vérifier via l'allure que les mesures sont réalistes. Les valeurs de permittivité restent cohérentes pour un MDF humide, se situant entre 2,1 et 3,1 [10].

$$f_c(t) = f_{c,\infty} + (f_{c,0} - f_{c,\infty}) \cdot e^{-t/\tau_f} \quad (6)$$

$$\epsilon_r(t) = \epsilon_{r,\infty} + (\epsilon_{r,0} - \epsilon_{r,\infty}) \cdot e^{-t/\tau_\epsilon} \quad (7)$$

$f_{c,0}$	$f_{c,\infty}$	τ_f
3,2 GHz	2,5 GHz	97 h
$\epsilon_{r,0}$	$\epsilon_{r,\infty}$	τ_ϵ
2,1	3,6	128 h

HR_{MDF}	60%	100%
$\tan(\delta)_{MDF}$	0,05 @ 3,2 GHz	0,134 @ 2,5 GHz
G_{max}	6 dBi	0,14 dBi

TABLEAU 2. Résultats de mesure

Lorsque $HR_{MDF} = 100\%$, le gain maximal de l'antenne est de 0,14 dBi. Traduisant l'augmentation de $\tan(\delta)$ passant de 0,05 lorsque $HR_{MDF} = 60\%$ à 0,134.

5. Conclusion

Cet article présente une contribution à l'état de l'art des composants radio-fréquences en substrat éco-responsable avec une antenne patch en substrat MDF à 3,21 GHz ayant un gain de 6 dBi. L'impact de l'humidité a été testé et permet de mettre en évidence plusieurs tendances. Lorsque l'humidité augmente, la fréquence de résonance diminue

avec un décalage fréquentiel de plus de 700 MHz correspondant à un décalage relatif de 21,8%. De plus, la permittivité diélectrique du MDF augmente de 1,5 représentant un décalage relatif de 71%. Cela correspond à des évolutions connues dans la littérature des grandeurs ϵ_r avec le taux d'humidité. Pour une humidité relative HR_{MDF} de 100%, le gain de l'antenne en substrat MDF est de 0,14 dBi soit une diminution de 97,7% par rapport au gain initiale de 6 dBi. Ceci montre l'augmentation des pertes $\tan(\delta)$ avec l'humidité, passant de 0,05 à 0,134 aux fréquences de résonance. Néanmoins, les résultats montrent que le substrat MDF présente des performances intéressantes au regard du FR4 dans des conditions d'utilisation standard et peut ainsi le substituer pour rendre les circuits radio-fréquences éco-responsable.

Références

- [1] Ankit *et al.*, "Electronic waste and their leachates impact on human health and environment : Global ecological threat and management," *Environmental Technology Innovation*, vol. 24, p. 102049, 2021.
- [2] J. Lepawsky, "Sources and streams of electronic waste," *One Earth*, vol. 3, no. 1, pp. 13–16, 2020.
- [3] S. C. Teixeira *et al.*, "Review and perspectives of sustainable, biodegradable, eco-friendly and flexible electronic devices and (bio)sensors," *Biosensors and Bioelectronics : X*, vol. 14, p. 100371, 2023.
- [4] V. C. Tran *et al.*, "Electrical current modulation in wood electrochemical transistor," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, no. 18, p. e2218380120, 2023.
- [5] E. Sipilä *et al.*, "Experimental study on brush-painted passive rfid-based humidity sensors embedded into plywood structures," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2016, pp. 1–8, 01 2016.
- [6] A. Mehmood *et al.*, "Passive uhf rfid-based user interface on a wooden surface," pp. 1760–1763, 12 2019.
- [7] M. Zarnik and D. Belavič, "An experimental and numerical study of the humidity effect on the stability of a capacitive ceramic pressure sensor," *Radioengineering*, vol. 21, pp. 201–206, 04 2012.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [9] J. Fajoui *et al.*, "Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg," p. 61, Jun. 2011.
- [10] H. Sahin and N. Ay, "Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies," *Journal of Wood Science*, vol. 50, no. 4, pp. 375–380, 2004.