



**HAL**  
open science

## Caractérisation multi-paramètres avec un capteur radiofréquence à résonateurs couplés

Carlos G. Juan, Benjamin Potelon, Cédric Quendo, Hector Garcia-Martinez,  
Anyela Aquino

► **To cite this version:**

Carlos G. Juan, Benjamin Potelon, Cédric Quendo, Hector Garcia-Martinez, Anyela Aquino. Caractérisation multi-paramètres avec un capteur radiofréquence à résonateurs couplés. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes (06), France. hal-04588509

**HAL Id: hal-04588509**

**<https://hal.science/hal-04588509>**

Submitted on 27 May 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.

# Caractérisation multi-paramètres avec un capteur radiofréquence à résonateurs couplés

C. G. Juan<sup>1,2,3</sup>, B. Potelon<sup>3,4</sup>, C. Quendo<sup>3</sup>, H. García-Martínez<sup>5</sup>, A. Aquino<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Bioingénierie, Université Miguel Hernández de Elche, 03202 Elche, Espagne

<sup>2</sup> Dépt. Électronique, Techn. Inform. et Projets, Université Technique de Carthagène, 30202 Carthagène, Espagne

<sup>3</sup> Univ. Brest, CNRS, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, F-29238 Brest, France

<sup>4</sup> IMT Atlantique, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, F-29238 Brest, France

<sup>5</sup> Dépt. Sci. Matériaux, Optique et Tech. Électronique, Université Miguel Hernández d'Elche, 03202 Elche, Espagne  
carlos.juan01@umh.es; benjamin.potelon@imt-atlantique.fr

**Résumé** – Ce travail présente un capteur micro-ondes résonant dédié à la détection simultanée de trois caractéristiques d'un échantillon solide : sa permittivité diélectrique, sa tangente de pertes et son épaisseur. Le dispositif est composé de trois résonateurs couplés sur deux substrats différents, l'échantillon étant situé entre eux, dans une configuration «sandwich». La présence et les propriétés de l'échantillon ont un impact sur les différents couplages inter-résonateurs. Une méthode d'analyse de la réponse du dispositif pour l'extraction des caractéristiques souhaitées de l'échantillon est proposée, ainsi qu'une procédure d'étalonnage expérimental. Ce concept est ensuite appliqué avec 990 simulations et 18 mesures expérimentales. Les bons résultats valident cette approche de détection multi-paramètres.

## 1. Introduction

Le développement de capteurs diélectriques résonants micro-ondes suscite un intérêt constant au sein de la communauté scientifique depuis plusieurs décennies [1]. Ces capteurs, dédiés à extraire des paramètres inhérents aux matériaux sous test (MST), comme la permittivité complexe, la position ou l'orientation par exemple, présentent des avantages intéressants. Ils peuvent permettre une mesure sans contact, une surveillance en temps réel, des dimensions réduites, une intégration facile avec d'autres équipements, une portabilité, une faible consommation d'énergie, etc. [2], [3].

Grâce à tous ces avantages, ces capteurs trouvent des applications intéressantes dans de nombreux domaines, tels que le biomédical, l'agriculture, les communications ou la caractérisation des matériaux [4], [5]. Dans le contexte actuel, avec les techniques modernes de fabrication additive, dont les résultats dépendent fortement des propriétés diélectriques des matériaux, la caractérisation des matériaux apparaît comme une application intéressante [6].

Ces capteurs sont basés sur la dépendance de leur réponse électrique aux propriétés diélectriques et à la géométrie du MST lorsqu'il est placé à leur proximité [7]. Les changements dans les propriétés du MST peuvent être observés à travers plusieurs paramètres de diffusion mesurés de la réponse du dispositif, tels que la fréquence de résonance [8], les pertes d'insertion [9], le facteur de

qualité [6], [7] ou la phase [10]. Les sensibilités élevées atteignables [10], [11] posent la question de la sélectivité ou la possibilité de discerner différents paramètres ou caractéristiques du MST [12].

Récemment, l'extraction simultanée de deux caractéristiques avec des capteurs résonants a été démontrée pour des échantillons solides [2], [3], [13] et pour des échantillons liquides [14]–[16]. Cependant, l'extraction simultanée de trois caractéristiques d'un échantillon avec ces capteurs n'a pas encore été entièrement réalisée, même en appliquant des techniques sophistiquées d'intelligence artificielle [17].

Dans ce travail, nous proposons un capteur composé de trois résonateurs couplés pour l'extraction simultanée de trois caractéristiques des échantillons. Nous testons l'hypothèse selon laquelle, lorsque la présence de l'échantillon a un impact sur la réponse des résonateurs et leurs couplages, si une quantité suffisante d'informations est disponible à partir de trois pics résonants, nous pourrions extraire trois caractéristiques différentes de l'échantillon. Pour le tester, nous proposons l'utilisation d'échantillons solides et l'extraction de la permittivité diélectrique, de la tangente de pertes et de l'épaisseur de l'échantillon, qui sont des caractéristiques très courantes habituellement extraites avec ces capteurs [2], [13].

## 2. Conception du capteur

Le capteur proposé repose sur trois résonateurs open-loop (OLR) couplés, en plus de deux lignes d'entrée/sortie (E/S), tous ces éléments étant gravés sur deux couches. La structure est composée de deux substrats superposés. Le substrat supérieur n'a pas de couche de cuivre sur sa face supérieure, tandis que les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> OLR sont gravés sur sa face inférieure recouverte de cuivre. Les lignes d'E/S et le 2<sup>ème</sup> OLR sont gravés sur la face supérieure du substrat inférieur, la face inférieure de ce même substrat étant métallisé afin de créer un plan de masse.

Dans cette configuration, le MST est pris en sandwich entre les deux substrats, placé entre les lignes d'E/S et la 2<sup>ème</sup> OLR situé sur le substrat inférieur et la couche contenant le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>ème</sup> OLR. La Fig. 1 présente une vue éclatée de la structure de détection.

Le MST étant pris en sandwich, les lignes des champs électromagnétiques liés aux couplages de proximité sont

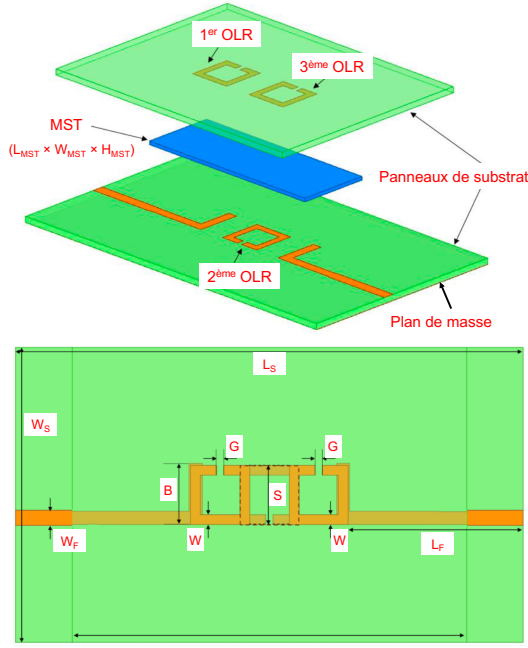


Figure 1. Conception du capteur.

Param.	Valeur	Description
$L_S$	135.0	Longueur du substrat inférieur
$L_T$	95.0	Longueur du substrat supérieur
$W_S$	80.0	Largeur des substrats supérieur et inférieur
$L_F$	56.61	Longueur de la ligne d'E/S
$W_F$	3.1	Largeur de ligne d'E/S
$B$	12.1	Longueur du bout de couplage
$G$	1.5	Écart ouvert OLR
$S$	12.0	Longueur du côté OLR
$W$	2.0	Largeur de ligne OLR
$h$	1.6	Épaisseur du substrat
$th$	$\sim 0.035$	Épaisseur de la couche de cuivre
$L_{MST}$	$> 55.0$	Longueur minimale du MST
$W_{MST}$	$> 20.0$	Largeur minimale MST
$H_{MST}$	0.8–1.2	Épaisseurs du MST en simulation

Tableau 1. Paramètres de conception (en mm).

impactés par les propriétés diélectriques du MST et ses dimensions (en particulier l'épaisseur). Les effets des propriétés du matériau à caractériser impactent ainsi directement les paramètres  $S$ , ce qui, réciproquement, doit permettre remonter aux valeurs de ces paramètres ou propriétés à partir des réponses électriques.

Afin de tester cette idée, une implémentation du capteur est proposée. Trois OLR identiques fonctionnant à 2 GHz chacun ont été sélectionnés. L'impédance des lignes d'E/S a été réglée sur  $50 \Omega$  pour permettre des mesures adaptées avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Le substrat choisi était un FR4 de  $1600 \mu\text{m}$  d'épaisseur ( $\epsilon_r = 4.4$ ,  $\tan \delta = 0.02$ ). Des connecteurs SMA ont été soudés pour permettre les mesures avec le VNA. Toutes ces décisions ont été prises dans le but de parvenir à une implémentation générique de la structure qui nous permet de tester notre hypothèse de recherche. L'optimisation de tous ces aspects reste cependant l'objet de travaux futurs.

Les dimensions retenues pour ce capteur, représentées sur la Fig. 1, sont résumées dans le Tableau 1. L'épaisseur

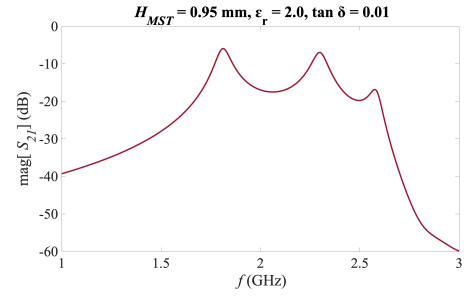


Figure 2. Exemple de réponse du capteur.

du MST (paramètre que nous souhaitons pouvoir extraire à partir de la réponse de notre capteur) doit être située dans une gamme définie afin de garantir des niveaux acceptables de couplages. Nous avons déterminé que la gamme acceptable d'épaisseur pour le matériau à caractériser se situe entre 0.8 mm et 1.2 mm.

### 3. Mesures et extraction de données

La réponse du capteur en termes de paramètre  $S_{21}$ , (Fig. 2), montre trois pics différents. La Fig. 2 présente la réponse électrique associée à une simulation pour un échantillon ayant  $H_{MST} = 0.95 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 2.0$  et  $\tan \delta = 0.01$ . Le principe de mesure repose sur l'identification de certains paramètres de cette réponse qui peuvent être utilisés pour récupérer les propriétés du MST.

La réponse de la Fig. 2 montre plusieurs paramètres qui peuvent apparaître comme pertinent à cet égard. D'une part, plusieurs paramètres associés à chaque pic  $p_i$  (où  $i = 1, 2, 3$ ) pris individuellement peuvent être analysés, tels que la fréquence de résonance associée ( $f^{p_i}$ ), le niveau maximum du paramètre de transmission ( $\max[S_{21}]^{p_i}$ ), la bande passante associée ( $BW^{p_i}$ ), ou le facteur de qualité à vide associé ( $Q_u^{p_i}$ ). D'autre part, certains paramètres de la réponse globale peuvent également être considérés, comme par exemple la bande passante globale  $\Delta f$  définie comme la plage de fréquence entre la première et la dernière fréquence de résonance ( $\Delta f = f^{p_3} - f^{p_1}$ ).

#### 3.a. Problème direct

À partir de cet ensemble de paramètres potentiels, directement calculables à partir de la réponse du capteur, le but est de trouver l'ensemble le plus approprié à partir duquel les caractéristiques du MST ( $H_{MST}$ ,  $\epsilon_r$  et  $\tan \delta$ , supposées inconnues) peuvent être obtenues. Dans le but de récupérer trois caractéristiques inconnues du MST, seuls trois paramètres de la réponse du capteur doivent être sélectionnés afin de ne pas avoir un problème surdimensionné. Autrement dit, il s'agit de définir trois fonctions reliant chacun des trois paramètres sélectionnés aux trois caractéristiques inconnues du MST. Formellement, si l'on nomme les trois paramètres sélectionnés  $Par1$ ,  $Par2$  et  $Par3$ , nous devons obtenir trois fonctions ( $X$ ,  $Y$  et  $Z$ ) satisfaisant  $Par1 = X(H_{MST}, \epsilon_r, \tan \delta)$ ;  $Par2 = Y(H_{MST}, \epsilon_r, \tan \delta)$ ; et  $Par3 = Z(H_{MST}, \epsilon_r, \tan \delta)$ .

Ces équations constituent le problème direct de la procédure de mesure proposée et permettraient de prédire les valeurs attendues de  $Par1$ ,  $Par2$  et  $Par3$  associées à la réponse du capteur, pour un MST donné. Une fois que ce problème direct a été défini avec précision, les caractéristiques inconnues du MST peuvent être obtenues

en résolvant les relations inverses de ces équations, c'est-à-dire en résolvant le problème inverse, permettant une caractérisation d'échantillons inconnus à partir des valeurs de *Par1*, *Par2* et *Par3*.

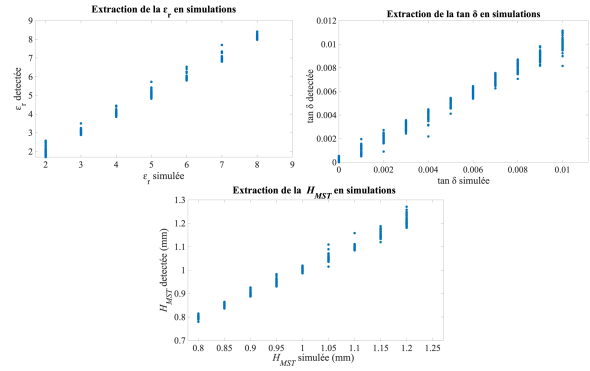
Pour définir le problème direct, dans le seul but de tester notre hypothèse (sans aucun objectif d'optimisation), nous avons réalisé, avec le logiciel ANSYS HFSS, un ensemble complet de simulations électromagnétiques du capteur. Dans ces simulations, la permittivité diélectrique relative  $\epsilon_r$  du MST variait de 1 à 10 par pas de 1, la tangente de pertes  $\tan \delta$  de 0 à 0.01 par pas de 0.001 et l'épaisseur de l'échantillon  $H_{MST}$  de 0.8 à 1.2 mm par pas de 0.05 mm, soit un total de 990 simulations, ce qui permet d'obtenir suffisamment de points pour définir les fonctions avec précision. Ces fonctions, inconnues, sont ensuite approximées.

Après l'exécution des simulations, les paramètres de chaque réponse simulée ont été extraits. La première étape de l'approximation consiste à prendre une valeur fixe pour  $\tan \delta$  (disons  $\tan \delta_1$ ) et à sélectionner toutes les simulations avec cette valeur de  $\tan \delta$ . Le résultat, par exemple pour *Par1*, est un ensemble de valeurs *Par1*, chacune associée à un point ( $H_{MST}$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\tan \delta_1$ ),  $H_{MST}$  et  $\epsilon_r$  étant variables. Cela permet de définir différentes courbes *Par1* vs  $H_{MST}$  pour différentes valeurs de  $\epsilon_r$  ( $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ , ...,  $\epsilon_{rN}$ ), toutes ces courbes étant associées à la valeur  $\tan \delta_1$ . Chacune de ces courbes peut alors être approximée par un polynôme quadratique par régression des moindres carrés, telle que *Par1*( $\epsilon_{rn}$ ,  $\tan \delta_1$ ) =  $a_n H_{MST}^2 + b_n H_{MST} + c_n$ , avec  $n = 1, 2, \dots, N$ .

Ainsi, un ensemble de coefficients  $a_n$ ,  $b_n$  et  $c_n$  sont obtenus. Lors de la deuxième étape, tous ces coefficients sont tracés par rapport à leurs valeurs  $\epsilon_r$  correspondantes, et les trois courbes résultantes sont approximées à l'aide de nouveaux polynômes quadratiques. Par exemple, pour les coefficients  $a$  :  $a_{(\tan \delta_1)} = \alpha_a \epsilon_r^2 + \beta_a \epsilon_r + \gamma_a$ . Ensuite, ces deux étapes d'approximation sont répétées pour toutes les valeurs de  $\tan \delta$  afin que l'ensemble des coefficients soient obtenus en fonction de la valeur de  $\tan \delta$ , regroupés par type  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$ ,  $\alpha_c$ ,  $\beta_a$ ,  $\beta_b$ ,  $\beta_c$ ,  $\gamma_a$ ,  $\gamma_b$  et  $\gamma_c$ . En suivant une procédure similaire, ces coefficients sont tracés en fonction du  $\tan \delta$  et les courbes sont ajustées lors de la troisième étape d'approximation. Par exemple, pour  $\alpha_a$  :  $\alpha_a = A_{\alpha_a} \tan^2 \delta + B_{\alpha_a} \tan \delta + C_{\alpha_a}$ .

Avec cette procédure, nous avons obtenu un total de 27 coefficients, définissant ainsi le problème direct. Il convient de noter que, à des fins de vérification, nous avons arbitrairement choisi une séquence pour l'obtention des coefficients (fixer d'abord  $\tan \delta$ , puis chaque valeur  $\epsilon_r$  et ensuite balayer  $H_{MST}$ ), mais nous aurions pu en choisir un autre. L'étude de l'impact de cet ordre, ainsi que d'autres variables telles que le type d'approximation ou l'ordre des polynômes, apparaît comme intéressante mais difficile, et reste une perspective à ces travaux.

Une fois tous ces coefficients obtenus, nous pouvons donc définir le problème direct, pour toute combinaison de paramètres. À partir de la réponse du capteur et en s'appuyant sur le modèle compagnon du problème direct obtenu (les fonctions  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ ), il est tout à fait possible de mettre en œuvre la résolution du problème inverse, c'est-à-dire l'approche de détection multi-paramètres désirée. Sur la base de connaissances générales sur les



**Figure 3. Résultats de la détection en simulations.**

capteurs micro-ondes et selon certaines métriques issues de la théorie de l'information, nous avons sélectionné la combinaison (*Par1*, *Par2*, *Par3*) = ( $Q_u^{p1}$ ,  $f_r^{p3}$ ,  $\Delta f$ ).

### 3.b. Problème inverse et validation expérimentale

À partir de ces paramètres, extraits des réponses électriques de chacune des 990 simulations, et en utilisant la fonction MatLab *vpsolve*, nous avons résolu le problème inverse, c'est-à-dire extrait les valeurs de  $H_{MST}$ ,  $\tan \delta$  et  $\epsilon_r$ . Afin d'évaluer la fiabilité de la méthode, nous avons tracé des graphes avec, en abscisses, les paramètres associés aux simulations dans la base de données et en ordonnées, les valeurs extraites correspondantes obtenues par résolution du problème inverse en chaque simulation. La Fig. 3 montre ces résultats pour chaque paramètre.

Afin de valider expérimentalement la démarche, nous avons fabriqué le capteur et effectué des mesures avec 5 vis en nylon pour presser l'échantillon. Afin de couvrir l'ensemble des plages de valeurs, plusieurs substrats ainsi que des pièces imprimées en 3D avec du PLA à différentes densités ont été utilisés comme échantillons. 21 échantillons au total ont été caractérisés, avec  $H_{MST}$  allant de 0.41 à 1.67 mm,  $\epsilon_r$  allant de 2.164 à 9.237 et  $\tan \delta$  allant de 0.0003 à 0.0214.

Malgré le bon accord entre mesure et simulation pour le capteur à vide (sans échantillon), nous avons ensuite constaté un décalage en fréquence pour toutes les mesures avec des échantillons. Ce décalage n'était pas constant, mais semblait étroitement lié à la permittivité effective de l'échantillon, ce qui est logique compte tenu de la relation entre la fréquence de résonance d'un résonateur à micro-ondes et la permittivité effective du milieu.

Nous avons donc décidé de mettre en place une procédure expérimentale de calibration pour pallier ce décalage en fréquences. Nous avons choisi trois échantillons (représentant la diversité des valeurs de  $H_{MST}$ ,  $\epsilon_r$  et  $\tan \delta$ ) comme échantillons d'étalonnage, laissant ainsi 18 échantillons disponibles pour des caractérisations. Après étude de la relation entre le  $\epsilon_r$  du MST et la  $f_r^{p2}$  (approximativement la fréquence centrale de fonctionnement) obtenue dans des simulations ainsi qu'expérimentalement avec les échantillons de calibration. Cela a permis de définir  $f_r^{p2, \text{mesurée}} - f_r^{p2, \text{simulée}}$  (la correction requise) en fonction du  $\epsilon_r$  du MST. Ensuite, en définissant le  $\epsilon_r$  du MST en fonction de la  $f_r^{p2}$  mesurée grâce à la mesure des substrats de calibration, nous avons obtenu la correction expérimentale suivante ( $\vec{f}_{\text{corr}}$ ) à appliquer au

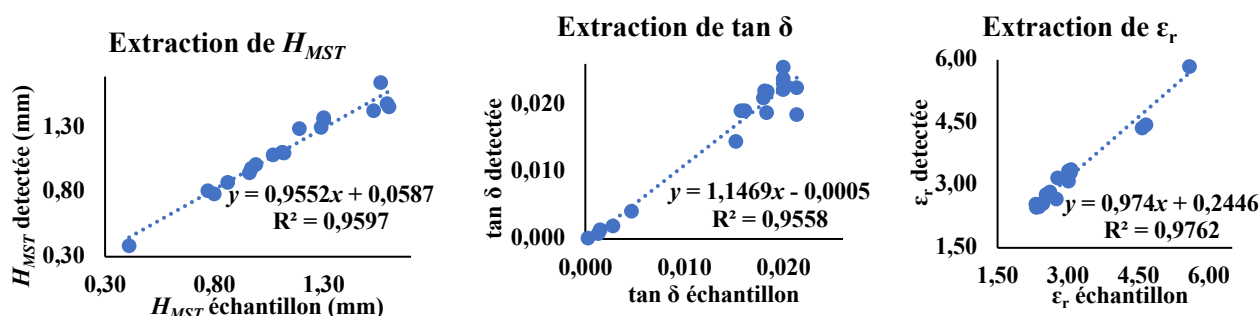


Figure 4. Résultats expérimentaux pour le capteur multi-paramétrique.

vecteur fréquence mesuré ( $\vec{f}_{\text{mes}}$ ) en fonction de la  $f_{\text{p}^2}$  directement obtenue avant la correction ( $f_{\text{r}^2\text{av}}$ ) :

$$\vec{f}_{\text{corr}} = \vec{f}_{\text{mes}} + 0.8682 f_{\text{p}^2\text{av}}^2 - 3.7688 f_{\text{r}^2\text{av}} + 3.8922.$$

Grâce à cette procédure d'étalonnage, les 18 mesures expérimentales ont pu être traitées et analysées en résolvant le problème inverse. Afin de limiter le nombre de solutions proposées, des plages de valeurs ont été fixées pour chaque variable :  $H_{\text{MST}} \in [0,1, 1,7]$  mm,  $\epsilon_{\text{r}} \in [1,5, 10,0]$  et  $\tan \delta \in [-0,003, 0,035]$ . Les propriétés extraites des échantillons pour les 18 mesures sont représentées sur la Fig. 4 et placées par rapport aux propriétés réelles des échantillons. Le bon accord entre les propriétés détectées et réelles du MST démontre la faisabilité expérimentale d'une mesure multi-paramétrique.

#### 4. Conclusions

Ce travail prouve la faisabilité de mesures multiparamétriques via des capteurs résonants micro-ondes. Un capteur composé de 3 résonateurs a été conçu, tirant parti de la dépendance entre les couplages inter-résonateurs et les propriétés de l'échantillon. Une méthode pour analyser la réponse du capteur et récupérer les propriétés souhaitées de l'échantillon a été développée. L'extraction multi-paramétrique présente de bons résultats.

#### 5. Remerciements

Carlos G. Juan souhaite remercier Rég. Bretagne, ainsi que « Cons. d'Innov., Univ., Cien. i Soc. Digital de la Gen. Val. » (Gouv. de Rég. Valencia, Espagne) et Europ. Social Fund, et aussi « Min. de Cien., Innov. y Univ. » (Gouv. d'Espagne) et l'Un. Europ., pour financer en part son travail à travers des projets SAD–No–Needle, CIAPOS/2021/267 (APOSTD), et RYC2022-036257-I (programme « Ramón y Cajal »), respectivement.

#### Références

[1] U. Kaatz, « *Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials* », Metrologia, vol. 47, n° 2, pp. S91–S113, 2010.  
 [2] A. Aquino, et al., « *Dielectric permittivity sensor based on planar open-loop resonator* », IEEE Sens. Lett., vol. 5, n° 3, p. 3500204, 2021.  
 [3] T. Haq et S. Koziel, « *New complementary resonator for permittivity- and thickness-based dielectric characterization* », Sensors, vol. 23, n° 22, p. 9138, 2023.

[4] C. G. Juan, et al., « *Microwave planar resonant solutions for glucose concentration sensing: A systematic review* », Appl. Sci., vol. 11, n° 15, p. 7018, 2021.  
 [5] S. Trabelsi et S. O. Nelson, « *Microwave sensing of quality attributes of agricultural and food products* », IEEE Instrum. Meas. Mag., vol. 19, n° 1, p. 36–41, 2016.  
 [6] C. G. Juan, et al., « *Study of  $Q_{\text{r}}$ -based resonant microwave sensors and design of 3-D-printed devices dedicated to glucose monitoring* », IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 70, p. 8005716, 2021.  
 [7] C. G. Juan, et al., « *Concentration measurement of microliter-volume water–glucose solutions using  $Q$  factor of microwave sensors* », IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 68, n° 7, pp. 2621–2634, 2019.  
 [8] G. Govind et J. Akhtar, « *Design of an ELC resonator-based reusable RF microfluidic sensor for blood glucose estimation* », Sci. Rep., vol. 10, p. 18842, 2020.  
 [9] T. Chretiennot, et al., « *Microwave-based microfluidic sensor for non-destructive and quantitative glucose monitoring in aqueous solution* », Sensors, vol. 16, p. 1733, 2016.  
 [10] P. Casacuberta, et al., « *Highly sensitive reflective-mode phase-variation permittivity sensors using coupled line sections* », IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 71, n° 7, pp. 2970–2984, 2023.  
 [11] C. G. Juan, et al., « *Highly-sensitive glucose concentration sensor exploiting inter-resonators couplings* », 49<sup>th</sup> Europ. Microw. Confe., EuMC, Paris, France, 2019, pp. 662–665.  
 [12] C. G. Juan, et al., « *On the selectivity of planar microwave glucose sensors with multicomponent solutions* », Electronics, vol. 12, n° 1, pp. 191, 2023.  
 [13] A. Alimenti, et al., « *A dielectric loaded resonator for the measurement of the complex permittivity of dielectric substrates* », IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, p. 6001009, 2023.  
 [14] A. Buragohain, et al., « *Highly sensitive differential hexagonal split ring resonator sensor for material characterization* », Sens. Actuator A-Phys., vol. 363, p. 114704, 2023.  
 [15] O. S. Bakam Nguenouho, et al., « *Dielectric characterization and modelling of aqueous solutions involving sodium chloride and sucrose and application to the design of a bi-parameter RF-sensor* », Sci. Rep., vol. 12, p. 7209, 2022.  
 [16] O. S. Bakam Nguenouho, et al., « *Electromagnetic characterization of aqueous sodium lactate solutions and its application for enhanced concentration monitoring* », IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, p. 8005308, 2023.  
 [17] M. Abdolrazzagh, et al., « *AI-assisted ultra-high-sensitivity/resolution active-coupled CSRR-based sensor with embedded selectivity* », Sensors, vol. 23, n° 13, p. 6236, 2023.