



**HAL**  
open science

## Conception d'un système embarqué pour l'analyse de tissus biologiques spécifiques

Joséphine Masini, Nadia Benfaddoul, Sylvain Feruglio, Dimitri Galayko,  
Frédérique Deshours, Georges Alquié, Olivier Meyer, Hamid Kokabi

► **To cite this version:**

Joséphine Masini, Nadia Benfaddoul, Sylvain Feruglio, Dimitri Galayko, Frédérique Deshours, et al..  
Conception d'un système embarqué pour l'analyse de tissus biologiques spécifiques. Colloque National  
du GDR SoC2, Jun 2024, Toulouse, France. hal-04730700

**HAL Id: hal-04730700**

**<https://hal.science/hal-04730700v1>**

Submitted on 10 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.

# Conception d'un système embarqué pour l'analyse de tissus biologiques spécifiques

J. Dupeyron Masini<sup>1,2</sup>, N. Benfaddoul<sup>1</sup>, S. Feruglio<sup>1</sup>, D. Galayko<sup>1</sup>, F. Deshours<sup>2</sup>, G. Alquié<sup>2</sup>, O. Meyer<sup>2</sup> et H. Kokabi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, CNRS UMR7606, Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), F-75005 Paris, France

<sup>2</sup> Sorbonne Université, CNRS UMR8507, Laboratoire Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs),

F-75005 Paris, France

Josephine.masini@sorbonne-universite.fr

**Résumé**— Cet article présente le développement d'un système embarqué équipé d'un capteur micro-ondes fonctionnant à 2.3 GHz, destiné à l'analyse de tissus biologiques spécifiques. Son application cible est l'identification des plaques d'athérome d'origine carotidienne, qui peuvent conduire à des accidents vasculaires cérébraux (AVC). Le système intègre un Raspberry Pi 4, un écran tactile et un analyseur de réseaux vectoriels open-source (LibreVNA) permettant l'automatisation des mesures des paramètres diélectriques de tissus biologiques. Développée en Python, cette solution offre une méthode efficace et abordable pour diagnostiquer les lésions athéromateuses. La communication entre les différents scripts (mesure, interprétation) est assurée via le protocole MQTT (Message Queued Telemetry Transfer).

**Mots-clés**— capteur résonnant micro-ondes, permittivité, tissu biologique, LibreVNA

## I. INTRODUCTION

Les accidents vasculaires cérébraux (AVC) d'origine carotidienne demeurent un enjeu majeur de santé publique, tant pour leur prévalence que pour leurs conséquences dramatiques en termes de mortalité et de handicap. Malgré un impact clinique significatif, l'évaluation du risque d'AVC associé aux lésions carotidiennes reste un défi majeur. Les techniques conventionnelles, telles que l'échodoppler et le scanner, présentent des limites dans la caractérisation fine de la composition de la plaque d'athérome avant opération, entravant ainsi une évaluation précise du risque d'AVC. Les capteurs micro-ondes (MO) se démarquent des autres procédés par leur capacité à sonder les tissus biologiques en fonction de leur composition, à partir des propriétés électriques de ceux-ci, de façon non invasive. Différents travaux de recherche visent à évaluer l'utilisation de cette technologie en ce sens [1, 2]. Cependant, ce type de capteur nécessite une instrumentation lourde, tel qu'un analyseur de réseaux vectoriel (VNA) et un logiciel de simulation électromagnétique (HFSS, CST) pour identifier les paramètres recherchés par itérations successives ou par résolution du problème inverse. Il existe un besoin de disposer en milieu médical d'un système portable embarquant les mêmes performances de mesure et de calcul.

## II. CONCEPTION DU CAPTEUR MICRO-ONDES

### A. Principe physique

La famille de capteurs mise en œuvre dans cette étude est de type *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR). Ce sont des circuits résonants dont le comportement est régi par les interactions électro-magnétiques avec un matériau diélectrique placé à proximité. En particulier, les CSRRs se comportent comme des filtres coupe-bande, dont le couplage capacitif avec le matériau sous test fait varier la fréquence et l'amplitude du pic de résonance. Cette variation est notamment régie par la *permittivité complexe* du matériau

$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ , exprimée via la *permittivité relative* ( $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}$ ) et le *facteur de dissipation* ( $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ ). Il est possible de corrélérer, à partir de la mesure de module du *coefficient de transmission* du capteur (paramètre  $S_{21}$ ), la variation de la fréquence de résonance ( $\Delta f$ ) par rapport au capteur à vide, i.e. sans échantillon, avec la variation de la permittivité relative  $\varepsilon_r$  du matériau (Fig. 1). La variation de l'amplitude du pic de résonance par rapport au capteur à vide ( $\Delta A$ ) peut quant à elle se corrélérer avec la variation des pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ) du matériau sous test.

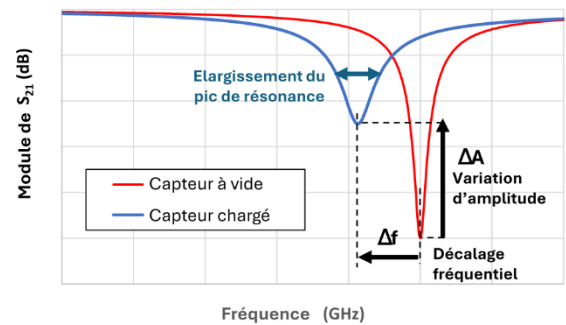


Fig. 1. Illustration du décalage fréquentiel et en amplitude induit par le capteur

### B. Contraintes de conception

Dans le cadre d'un dispositif portable, la conception du capteur doit viser : (1) un encombrement réduit ; (2) une sensibilité suffisante pour que les variations soient mesurables par la chaîne d'acquisition ; (3) une fréquence de résonance offrant le meilleur compromis entre la plage de variation de la fréquence de résonance et le respect de la bande passante de la chaîne d'acquisition. .

Le choix d'un résonateur sub-longueur d'onde permet de minimiser la taille du capteur tout en augmentant la fréquence de résonance. L'ajout d'un ligne faible impédance au niveau du CSRR augmente le couplage capacitif entre le capteur et l'échantillon sous test et améliore ainsi le confinement du champ électrique. Deux variantes du capteur ont été conçues en technologie microruban, à des fréquences caractéristiques de 2 GHz et 4 GHz, dans des substrats de type FR4 et Rogers RO4003C (Fig. 2).

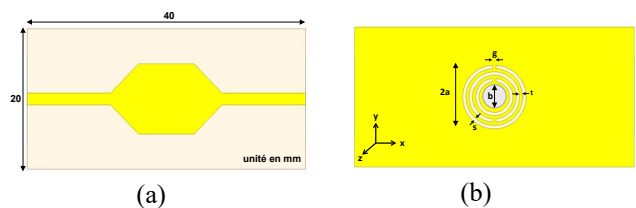


Fig. 2. Topologie de la structure du capteur microondes (a) Ligne d'alimentation élargie (b) Plan de masse gravé avec le CSRR

### III. PROTOTYPAGE DE LA PLATEFORME EMBARQUEE

#### A. Base matérielle

Le matériel fournit une plateforme de prototypage rapide d'un ensemble portable. la chaîne d'acquisition comporte trois éléments : un ordinateur mono-carte de type Raspberry Pi 4 pour disposer d'un environnement linux embarqué, un écran tactile pour disposer d'une interface utilisateur et un VNA portatif de conception libre, le LibreVNA [3], connecté en USB au Raspberry Pi.

#### B. Synoptique fonctionnel

Le découpage fonctionnel du prototype s'axe autour du protocole de mesure suivant : la *stimulation* de l'échantillon, via le capteur par un balayage en fréquences, l'*acquisition* des paramètres S à l'aide du LibreVNA, le *traitement* des données pour extraire des courbes les paramètres caractéristiques  $\Delta f$  et  $\Delta A$ , et l'*interprétation* des résultats grâce à une base de données d'étalonnage associée à des algorithmes de classification/segmentation, créée à partir de simulations du capteur chargé par des matériaux diélectriques aux propriétés connues. Le schéma synoptique du système est donné à la Fig. 3.

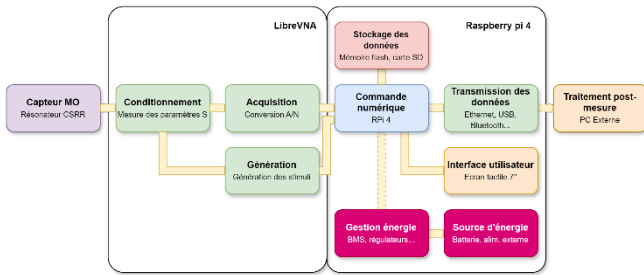


Fig. 3. Synoptique fonctionnel du système avec la correspondance du matériel utilisé

#### C. Choix d'implémentation logicielle

Le choix d'une plateforme Linux simplifie l'accès au matériel via des interfaces standardisées, et la répartition des fonctionnalités au sein de processus séparés, interconnectés via un mécanisme de *communication inter-processus* (IPC). L'implémentation repose sur Python pour l'acquisition, via le LibreVNA, le traitement et l'interprétation des données. l'IPC est assurée par un *broker* selon le protocole *Message Queued Telemetry Transport* (MQTT), pour assurer l'IPC de manière légère et extensible. Enfin, Node-Red coordonne les phases de mesure, la transmission des informations via MQTT, et fournit une interface utilisateur, permettant une gestion intuitive des flux de données via une approche no-code [4].

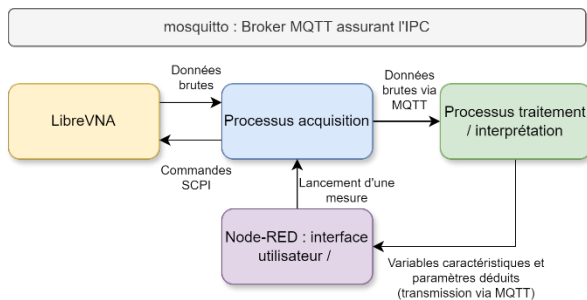


Fig. 4. Illustration du processus logiciel de mesure

### IV. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

#### A. Première version du prototype

Une première version fonctionnelle du dispositif montre d'ores et déjà une aptitude à faciliter l'utilisation de ce capteur (Fig. 5) ; le protocole expérimental habituel de plusieurs heures est réduit à quelques minutes, ce qui facilite le test et la validation de capteurs sur des échantillons donnés. Le choix d'une architecture logicielle répartie simplifie l'écriture de chaque phase de mesure, fiabilisant ainsi les développements, et garantit leur extensibilité de manière saine. Pour un même tissu biologique, l'écart-type des mesures des paramètres diélectriques entre plusieurs échantillons est actuellement de l'ordre de 8% à 11.5%.

#### B. Leviers d'amélioration

Pour améliorer les mesures, le perfectionnement de la base d'étalonnage est un vecteur d'affinement à travailler, en ajustant le nombre de paramètres utilisés et le nombre de points de simulation. L'ajout de capteurs supplémentaires, tels qu'un capteur de température, de pression pour évaluer la distorsion de l'échantillon, ou bien d'un capteur pour mesurer le taux d'hydratation de l'échantillon, permettraient d'améliorer la mesure en ciblant plus précisément les conditions expérimentales.

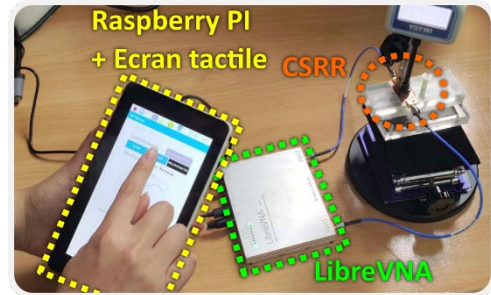


Fig. 5. Photographie du prototype

### V. CONCLUSION

Cette communication présente les choix permettant de créer une plateforme embarquée utilisable à terme en milieu opératoire pour la caractérisation diélectrique de tissus biologiques à l'aide d'un capteur micro-ondes. Grâce à une modélisation du processus de mesure et l'utilisation de composants standardisés, cette approche facilite le prototypage rapide et l'itération tout en permettant une qualification quantitative du capteur. L'intégration automatisée du processus de mesure et de traitement dans une plateforme unique accélère la recherche et l'innovation dans ce domaine, démontrant ainsi son utilité potentielle.

### RÉFÉRENCES

- [1] J. Masini et al., "Capteur micro-ondes en vue du diagnostic médical de l'athérosclérose," in 9ème édition des Journées d'Etude en Télésanté (JETSAN), Aubervilliers, France, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-042206471>.
- [2] R. Shahbaz et al., "Identification of Carotid Plaques Composition Through a Compact CSRR-Based Microwave Sensor," IRBM, vol. 44, no. 2, p. 100734, Apr. 2023, doi: [10.1016/j.irbm.2022.09.001](https://doi.org/10.1016/j.irbm.2022.09.001).
- [3] J. Käberich, "LibreVNA - 100kHz to 6GHz 2 port USB based VNA." Jul. 2022. [Online]. Available: <https://github.com/jankae/LibreVNA>
- [4] A. P. S and S. M. D. Kumar, "Delay Estimation of Healthcare Applications Based on MQTT Protocol: A Node-RED Implementation," in 2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), IEEE, Jul. 2022. doi: [10.1109/conecct55679.2022.9865759](https://doi.org/10.1109/conecct55679.2022.9865759).