

Proposition de sujet de projet GP CODS :

## **Capteur hyperfréquence pour la caractérisation d'échantillons biologiques liquides : comment extraire les paramètres utiles lorsque plusieurs grandeurs sont inconnues**

Les capteurs hyperfréquences sont aujourd'hui utilisés pour déterminer différents paramètres tels que la permittivité d'un matériau, son taux d'humidité ou sa position. La miniaturisation des dispositifs les rend par ailleurs adaptés à l'étude d'échantillons de petites dimensions allant jusqu'à la cellule unique, ce qui les rend particulièrement pertinents pour l'étude d'échantillons biologiques en vue d'une aide au diagnostic médical. Une difficulté inhérente aux échantillons médicaux est toutefois leur forte variabilité ; par exemple dans un échantillon sanguin plusieurs paramètres changent d'un patient à l'autre, et l'extraction des paramètres d'intérêt devient alors plus complexe et demande la collecte d'une quantité d'information plus importante [1].

Le laboratoire ESYCOM mène une activité de recherche importante autour des dispositifs RF d'une part et des capteurs d'autre part, et travaille ainsi les capteurs RF appliqués aux milieux biologiques. Ainsi, la thèse d'Houssein Mariam (soutenue en décembre 2020) portait sur le développement d'un capteur microfluidique hyperfréquence large bande [2][3] (Fig. 1). De très bons résultats ont été obtenus pour la caractérisation de faibles volumes de liquides, et il a été montré que les capteurs développés étaient sensibles à la présence d'une ou plusieurs micro-billes de dimension similaire à celle d'une cellule biologique. Zied Fritiss (soutenance de thèse prévue en novembre 2024) a quant à lui travaillé au développement d'un capteur large bande pour la peau dédié à la détection du mélanome [4] (Fig. 2).

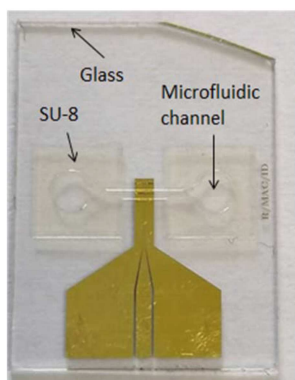


Fig. 1 : Capteur microfluidique large bande développé par Houssein Mariam à ESYCOM.

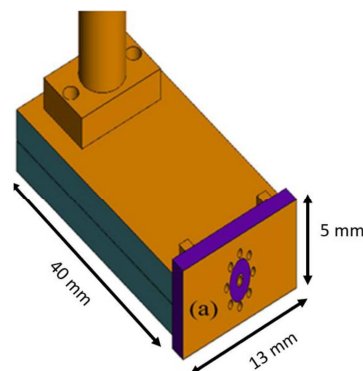


Fig. 2 : Capteur pour la détection du mélanome développé par Zied Fritiss à ESYCOM.

Les capteurs large bande (comme ceux précédemment cités) présentent l'avantage de permettre la caractérisation d'un échantillon sur une large bande fréquentielle, ce qui est particulièrement intéressant dans une phase d'étude préliminaire d'un milieu, mais leur sensibilité est réduite par rapport à celle d'un capteur résonant. C'est pourquoi dans la thèse de Josephine Pichereau, actuellement en cours, un capteur résonant a été développé pour l'analyse de petits échantillons liquides [5]. Ce capteur est constitué de deux résonateurs symétriques excités par une ligne microruban (Fig. 3). Deux cavités creusées dans le substrat sont destinées à recevoir des échantillons liquides à tester. La variation de la permittivité du milieu liquide induit un décalage de la fréquence de résonance du résonateur associé (Fig. 4), ce qui donne une information sur les propriétés du milieu. La Fig. 4 montre la variation du coefficient de transmission de ce capteur lorsqu'une des deux cavités est remplie d'éthanol (ce qui implique une résonance fixe à 1,35 GHz) et la seconde cavité est remplie d'un mélange variable d'eau et d'éthanol (10E90W signifie 10% d'eau et 90% d'éthanol en volume) : on observe nettement un décalage progressif du pic relatif au deuxième résonateur, indicateur de la différence entre les deux milieux liquides.

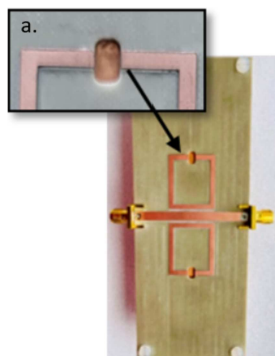


Fig. 3 : Capteur résonant développé par Josephine Pichereau à ESYCOM.

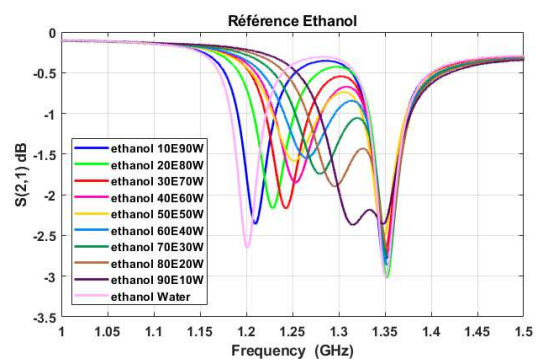


Fig. 4 : Variation du coefficient de transmission du capteur présenté en Fig. 3 en fonction des échantillons liquides sous test. Une cavité est remplie d'éthanol et la seconde reçoit différents mélanges eau-éthanol.

Si ce capteur résonant présente l'avantage de la précision, son inconvénient est que l'information relative à une seule résonance n'est pas suffisante pour extraire simultanément plusieurs paramètres inconnus (par exemple plusieurs concentrations inconnues dans un mélange). C'est pourquoi un nouveau capteur a été conçu, pour lequel les résonateurs sont munis de deux cavités (Fig. 5). L'idée est alors d'utiliser la flexibilité offerte par la deuxième cavité (à savoir la cavité la plus proche de la ligne microruban, appelée par la suite cavité intérieure) pour effectuer plusieurs mesures sur un même échantillon mais dans des conditions de charge différentes. Ainsi, la Fig. 6 montre la variation

des fréquences de résonance dans les différentes configurations du capteur avec des échantillons d'eau.

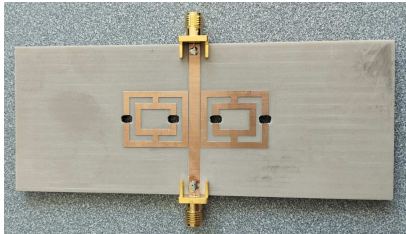


Fig. 5 : Capteur résonant différentiel muni de résonateurs à deux cavités.

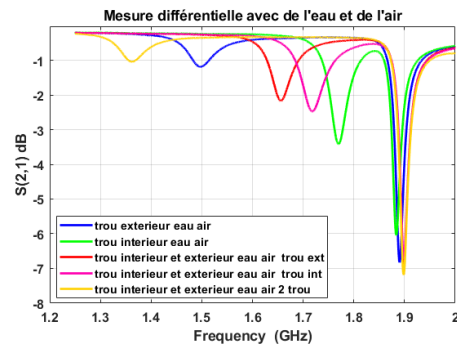


Fig. 6 : Résultats de mesure avec le capteur de la Fig. 5 en remplissant les différentes cavités d'eau ou en les laissant vides.

Au cours de ce travail, le principe des capteurs hyperfréquences résonants sera tout d'abord pris en main à l'aide de simulation (logiciel HFSS) ainsi que de mesure sur les dispositifs existants, et plusieurs indicateurs seront examinés (amplitude et phase des coefficients de réflexion et de transmission, pertes, fréquence et largeur de résonance) pour analyser leur sensibilité à la variation des paramètres d'intérêt. Les propriétés du capteur ajustable (Fig. 5) seront ensuite analysées plus précisément, à l'aide de simulations et de mesure, dans le but de déterminer la variation des indicateurs retenus en fonction du remplissage des cavités intérieures.

L'objectif de ce projet est de proposer une méthode d'extraction de la composition d'un mélange liquide dont deux proportions sont inconnues.

Ces travaux seront effectués à l'aide du matériel disponible au laboratoire ESYCOM, à savoir des appareils de mesure hyperfréquence (VNA, banc de mesure sous pointes), ainsi que la micrograveuse pour les réalisations et des imprimantes 3D pour la fabrication de dispositifs microfluidiques.

Ce travail s'appuiera à la fois sur des mesures et sur des simulations hyperfréquences (logiciel HFSS disponible au laboratoire).

Il sera encadré d'une part par des enseignants-chercheurs ayant encadré les thèses de Houssein Mariam et Zied Fritiss, à savoir Hakim Takhedmit ([hakim.takhedmit@univ-eiffel.fr](mailto:hakim.takhedmit@univ-eiffel.fr)), et Elodie Richalot ([elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr](mailto:elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr)), et travaillera d'autre part en lien étroit avec une doctorante en 3<sup>ème</sup> année de thèse, Josephine Pichereau.

## Bibliographie :

- [1] Bakam Nguenouho, O. S., Chevalier, A., Potelon, B., Benedicto, J., & Quendo, C. (2022). Dielectric characterization and modelling of aqueous solutions involving sodium chloride and sucrose and application to the design of a bi-parameter RF-sensor. *Scientific Reports*, 12(1), 7209.
- [2] Houssein Mariam, Patrick Poulichet, Hakim Takhedmit, Elodie Richalot, Olivier Français. "Dielectric Property Characterization of Liquid Media Using an Open-Ended Probe Within a Microfluidic Chip », *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, Lavoisier, 2020, 19 (3), pp.169-177.
- [3] Houssein Mariam, Patrick Poulichet, Hakim Takhedmit, Frederique Deshours, Elodie Richalot *et al.*, "Accurate Characterization by Dielectric Spectroscopy up to 25 GHz of Nano-liter Range Liquid Volume within a Microfluidic Channel » , *IEEE Sensors Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, 22(4) pp. 3553-3564.
- [4] M. Z. Fritiss ; P.Poulichet ; H. Takhedmit ; L. Lanquetin ; S. Protat ; P. Vallade ; E. Richa-lot ; O. Français (2023)."Design and characterization of a broadband PCB-basedcoaxial sensor for permittivity screening in skin cancer detection applications."Measurement Science and Technology, 34(11), 115109, doi : 10.1088/1361-6501/ace9f1
- [5] Pichereau Josephine, Takhedmit Hakim, Poulichet Patrick, Protat Stéphane, Français Olivier, Richalot Elodie, « Caractérisation des propriétés dielectriques d'échantillons liquides et solides par une structure RF à double résonateur en anneau fendu à 1,35 GHz », Journées Nationales Microondes, Juan-les-Pins, Juin 2024.