Université Gustave Eiffel

Laboratoire ESYCOM

Projet du Graduate Program CODS – Année 2026-2027

Etude de capteurs RF reconfigurables pour la caractérisation de petits échantillons liquides : vers l'extraction de plusieurs paramètres inconnus

Encadrement : Elodie Richalot, Houssem Rouached
Laboratoire ESYCOM

1. Contexte

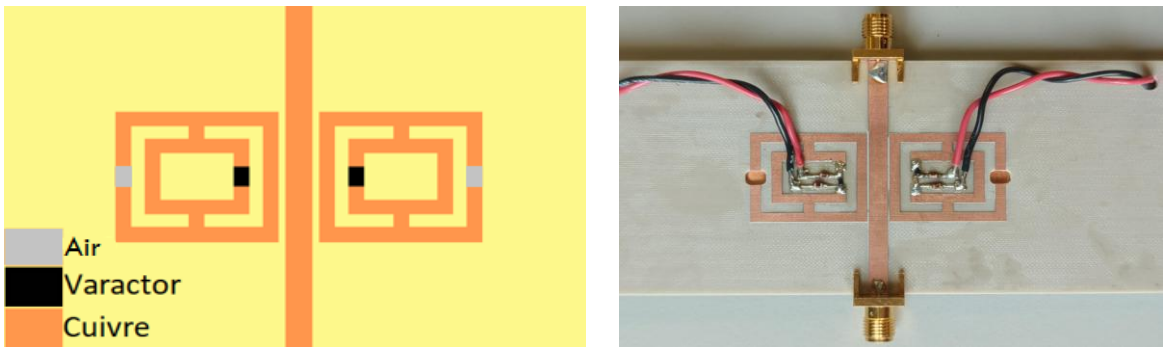
1.1 Problématique et enjeux

Les capteurs radiofréquences (RF) permettent l'analyse non-invasive d'échantillons de petites dimensions. En raison de leur capacité à sonder l'intérieur des échantillons ainsi que la possibilité d'effectuer des analyses en temps réel et in-situ, ces capteurs sont particulièrement pertinents pour de nombreuses applications comme pour l'aide au diagnostic médical [1], le suivi d'infrastructures, la détection de polluants [2] ou le suivi de procédés industriels. Le laboratoire ESYCOM travaille depuis 9 ans sur cette thématique avec 3 thèses soutenues [3]-[6] et une thèse actuellement en cours, et les travaux menés ont permis de montrer la grande sensibilité des capteurs développés.
L'extraction à l'aide d'un unique capteur RF de plusieurs paramètres inconnus (concentrations d'un mélange de plus de deux composés, influence combinée de la température, détermination des propriétés d'un matériau lorsque l'épaisseur de l'échantillon n'est pas connue de façon précise) reste toutefois un problème non résolu. Il devient dans ce cas très difficile d'établir un diagnostic robuste, à la fois précis et sans ambiguïté [7]. En effet, la réponse mesurée peut correspondre à plusieurs compositions différentes, et il est donc nécessaire d'avoir accès à une quantité suffisante d'informations pertinentes et de développer les méthodes d'analyse associées afin d'extraire les paramètres inconnus. Or, la détermination conjointe de plusieurs paramètres inconnus est requise dans de nombreuses applications (comme par exemple avec des échantillons sanguins ou la recherche de défauts).

Cette problématique a très peu été abordée au niveau international. L'apport de l'utilisation de plusieurs harmoniques d'un capteur résonant a été mis en évidence dans [8]. La possibilité d'extraire 3 paramètres inconnus a par ailleurs été montrée dans 2 cas applicatifs précis relatifs à un mélange liquide [9] et à un échantillon solide [10]. Bien qu'intéressants pour leur caractère très novateur, ces travaux restent toutefois très liés aux cas examinés et ne sont pas facilement généralisables. La question de la méthodologie à adopter pour développer des capteurs ainsi que des méthodes d'extraction des paramètres inconnus reste donc à explorer.
C'est dans ce cadre qu'a débuté en 2025 la thèse d'Houssem Rouached portant sur le développement d'une méthode de caractérisation d'échantillons liquides de petits volumes dont au moins 3 paramètres sont inconnus. En raison de leur plus grande sensibilité, des capteurs résonants ont été choisis, mais il est alors nécessaire de compenser la faiblesse de la largeur fréquentielle d'analyse en les rendant accordables [11]-[13] afin d'avoir accès à une quantité d'information suffisante à l'extraction de plusieurs paramètres inconnus.

1.2 Activités d'ESYCOM en lien avec le sujet

Le sujet présenté ici s'appuie sur le travail de thèse d'Houssem Rouached débuté en janvier 2025 [14][15]. Dans ce travail, des résonateurs planaires munis de deux ouvertures sont utilisés pour analyser des échantillons liquides de faible volume (23µl), une ouverture permettant le positionnement de l'échantillon à analyser tandis que la 2ème ouverture permet l'intégration de diodes varactors pour rendre le résonateur fréquentiellement accordable (Fig. 1) ; cette accordabilité électrique permet de caractériser un liquide sur une bande de fréquences. Pour améliorer la robustesse de la mesure vis-à-vis des perturbations liées aux conditions d'utilisation (température, taux d'humidité), une structure différentielle a été adoptée avec l'utilisation de deux résonateurs identiques placés de part et d'autre de la ligne d'excitation, l'un servant de référence et l'autre accueillant l'échantillon sous test.



(a) (b)

Figure 1 : Capteur différentiel résonant électriquement accordable, (a) Schéma du capteur à vide, avec les deux cavités externes pouvant recevoir du liquide et la position des deux diodes varactors, (b) Capteur fabriqué avec son circuit de polarisation.

Les mesures effectuées sur le premier prototype de capteur électriquement accordable ont montré la capacité, en modifiant la tension de polarisation de la diode varactor, de décaler la fréquence de résonance à vide du capteur de 0,65 GHz soit 70% (Fig. 2). Ceci permet la caractérisation de liquides à différentes fréquences ; ainsi, la figure 3 montre les résultats de mesure obtenus lorsqu'un résonateur est à vide (résonateur de référence) et le second est rempli d'eau déionisée (liquide sous test) pour deux tensions de polarisation différentes des diodes varactors. Le décalage fréquentiel de

la réponse montre la possibilité d'effectuer des mesures à partir de plusieurs fréquences de résonance à vide.

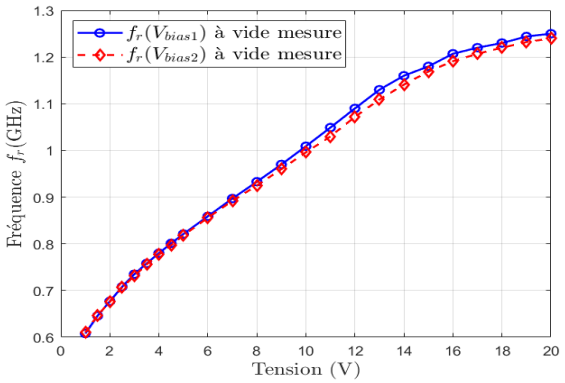


Fig. 2 : Fréquence de résonance mesurée pour chaque résonateur en fonction de la tension de polarisation des diodes varactor.

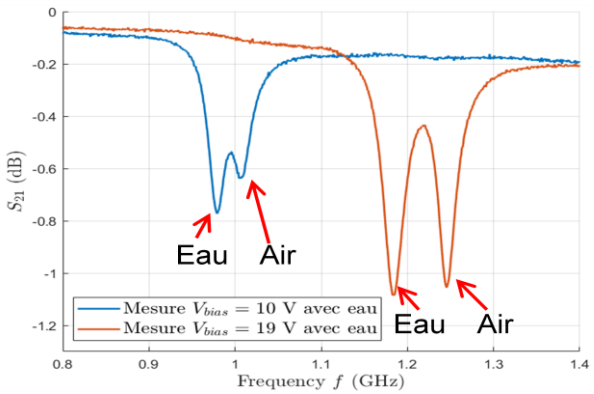


Fig. 3 : Coefficient de transmission pour différentes tensions de polarisation des diodes varactor lorsqu'un résonateur est à vide et le second est rempli d'eau déionisée.

1.3 Evolutions du capteur et perspectives

Des optimisations du premier prototype de capteur ont été effectuées afin d'améliorer sa sensibilité. La fabrication d'un nouveau prototype est attendue au moins de novembre, elle sera suivie d'une campagne de mesures pour caractériser ses propriétés et quantifier les améliorations obtenues.

Par ailleurs, un objectif important de ce travail consiste à développer une méthode d'extraction des propriétés diélectriques d'échantillons liquides ainsi que des paramètres caractéristiques de leur composition. Des travaux ont été entrepris dans cette direction, ils doivent être poursuivis.

2. Sujet du projet

Le travail proposé s'appuiera sur le travail de thèse d'Houssem Rouached actuellement en cours.

Il s'agira tout d'abord de caractériser expérimentalement le premier prototype de capteur, à l'aide d'échantillons liquides obtenus à partir de mélanges, et d'extraire de ces mesures des indicateurs de performance du capteur. Une fois le second prototype conçu, de nouvelles mesures seront effectuées afin de quantifier les améliorations apportées.

Par ailleurs, des études paramétriques seront effectuées à l'aide de simulations électromagnétiques pour valider et enrichir les résultats expérimentaux.

Enfin, un travail sera mené sur la caractérisation de liquides dont plusieurs paramètres sont inconnus (par exemple plusieurs concentrations inconnues dans un mélange) afin d'élaborer une méthode d'extraction adaptée.

3. Travail demandé

Après la prise en main du sujet (lecture d'articles), ce travail s'appuiera d'une part sur un volet expérimental au cours duquel des mesures hyperfréquences seront réalisées à l'aide d'un VNA sur le

dispositif existant ainsi que sur le nouveau prototype fabriqué. D'autre part, des validations et études paramétriques seront effectuées par l'utilisation d'outils de simulation électromagnétique (Ansys HFSS). Afin, un travail plus théorique portera sur le développement d'une méthode d'extraction de plusieurs paramètres inconnus.

Il s'agit donc d'un sujet très complet permettant d'aborder à la fois la mesure hyperfréquence, l'extraction de paramètres et la simulation de dispositifs RF complexes.

Contact

Elodie Richalot (elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr)

Références bibliographiques

[1] H.J. Lee, & H.H. Choi, "Microwave transmission properties of D-(+)-glucose solution with concentration variations." Journal of Physics D: Applied Physics 52.38 (2019): 385401. < 10.1088/1361-6463/ab2d78>.

[2] M. Shaji and M. J. Akhtar, "Microwave coplanar sensor system for detecting contamination in food products," IEEE MTTS International Microwave and RF Conference, New Delhi, India, 2013, pp. 1-4. < 10.1109/IMaRC.2013.6777723>

[3] H. Mariam, P. Poulichet, H. Takhedmit, F. Deshours, E. Richalot and O. Français. "Accurate Characterization by Dielectric Spectroscopy up to 25 GHz of Nano-Liter Range Liquid Volume Within a Microfluidic Channel." IEEE Sensors Journal, 2022, 22 (4), pp.3553 -3564. ⟨10.1109/JSEN.2021.3138771⟩. ⟨hal-04243706⟩.

[4] 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*, 2020, 19 (3), pp.169-177.

[5] J. Pichereau, Z. Fritiss, H. Takhedmit, P. Poulichet, L. Lanquetin, O. Français and E. Richalot. "Sensing biological materials with differential RF broadband and resonating microsensors." 2023 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Nov 2023, Genoa, Italy. pp.65-70, ⟨10.1109/CAMA57522.2023.10352903⟩. ⟨hal-04450122⟩

[6] M. Z. Fritiss, P. Poulichet, H. Takhedmit, L. Lanquetin, S. Protat, P. Vallade, E. Richalot and O. Français. "Design and characterization of a broadband PCB-based coaxial sensor for permittivity screening in skin cancer detection applications." Measurement Science and Technology, 2023, 34 (11), pp.115109. ⟨10.1088/1361-6501/ace9f1⟩. ⟨hal-04427245⟩

[7] Z. Baghdasaryan, A. Babajanyan, L. Odabashyan, J.H. Lee, B. Friedman and K. Lee. "Visualization of microwave near-field distribution in sodium chloride and glucose aqueous solutions by a thermo-elastic optical indicator microscope." Scientific reports 11.1 (2021): 2589. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80328-8.

[8] N. Hosseini, M. Baghelani, and M. Daneshmand. "Selective volume fraction sensing using resonant-based microwave sensor and its harmonics." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 68.9 (2020): 3958-3968. <10.1109/TMTT.2020.2990139>

[9] O.S. Bakam Nguenouho, A. Chevalier, B. Potelon, J. Benedicto and C. Quendo. "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 12, 7209 (2022), https://doi.org/10.1038/s41598-022-11355-w.

[10] J.C. Juan, B. Potelon, A. Aquino, H. García-Martínez, and C. Quendo. "Multi-parameter simultaneous extraction with a novel microwave sensor based on coupled resonators." Scientific Reports, 14.1 (2024), 1-17, https://doi.org/10.1038/s41598-024-72061-3

[11] N. Pejman, S. Hashemi, A. Abdolali, M. Tayarani, and S. Moinzad. "Complex permittivity retrieval of dispersive liquids based on varactor-loaded split-ring resonator." IEEE Sensors Journal, 21(21): 24019–24027, 2021. <10.1109/JSEN.2021.3090683>

[12] Somarith Sam and Sungjoon Lim. Ultra-wideband tunable resonator based on varactor loaded complementary split-ring resonators on a substrate-integrated waveguide for microwave sensor applications [letters]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 60(4) :657–660, 2013.

[13] I. Gil, J. Bonache, J. Garcia-Garcia, and F. Martin. Tunable metamaterial transmission lines based on varactor-loaded split-ring resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(6) :2665–2674, 2006.

[14] H. Rouached, J. Pichereau, J. Swifka, S. Dakhli, F. Choubani, E. Richalot "Study and design of a dual-cavity differential resonant sensor for small liquid samples" 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuMW), Utrecht, Netherland, 2025, pp.2-5 , doi : 10.23919/EuMC65286.2025.11234989.

[15] H.Rouached, J.Pichereau, S. Dakhli, F. Choubani, E. Richalot "Étude et conception d'un capteur résonnant différentiel à double cavité pour des petits échantillons liquides" 18e édition des Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Saint-Etienne, France

Le laboratoire ESYCOM *s'inscrit dans les domaines de l'ingénierie des systèmes de communication, des capteurs et des microsystèmes pour la ville, l'environnement et la personne.*

Les thèmes abordés sont plus spécifiquement :

- *les antennes et propagation en milieux complexes, les composants photoniques - micro-ondes;*

- *les microsystèmes pour l'analyse de l'environnement et la dépollution, pour la santé et l'interface avec le vivant ;*

- *les micro-dispositifs de récupération d'énergie ambiante mécanique, thermique ou électromagnétique.*