

Développement d'un capteur RF multi-résonant intégrant un canal microfluidique pour la caractérisation diélectrique de milieux biologiques par instrumentation six-ports

Directeur : Olivier François ; Co-directeur/suiveur : Hakim Takhedmit, Patrick Poulichet
Laboratoire ESYCOM / ED MSTIC

Contexte

1. Problématique et enjeux

La caractérisation de matériaux et de milieux biologiques par des techniques radiofréquences (RF) est un domaine en fort développement, notamment pour des applications de biosensing et d'analyse non invasive. Les propriétés diélectriques des milieux étudiés, en particulier des liquides biologiques ou de cellules en milieu de culture, constituent des indicateurs pertinents de leur composition et de leur état physiologique.

A l'échelle de la cellule, les capteurs RF intégrant des canaux micro-fluidiques permettent de travailler sur de très faibles volumes d'échantillons, mais présentent encore des limitations. Dans le domaine fréquentiel, les capteurs large bande offrent une information fréquentielle étendue, mais restent peu sensibles aux faibles variations des propriétés diélectriques. À l'inverse, les capteurs résonants présentent une meilleure sensibilité, mais sont souvent limités à une fréquence unique.

L'enjeu de cette thèse est de développer un capteur RF multi-résonant, capable de combiner une bonne sensibilité et une information multi-fréquentielle, afin d'améliorer l'extraction des propriétés diélectriques des milieux d'intérêt. Un accent particulier sera mis sur la conception et l'optimisation du capteur, ainsi que sur des approches de modélisation par circuits équivalents, permettant une meilleure compréhension des mécanismes physiques et une optimisation et exploitation plus fine des résonances.

Par ailleurs, l'utilisation d'analyseurs de réseaux vectoriels reste un frein important au déploiement de ces capteurs hors du laboratoire. Un nouvel axe de recherche consiste donc à explorer des solutions d'instrumentation plus simples, en particulier basées sur un réflectomètre six-ports, afin de réduire le coût, l'encombrement et la complexité du système de mesure, avec pour objectif à terme des applications portables.

2. Activités d'ESYCOM en lien avec le sujet

Les travaux menés à ESYCOM portent depuis plusieurs années sur les capteurs RF, la microfluidique et l'instrumentation micro-ondes pour la caractérisation de matériaux et de milieux biologiques. Plusieurs thèses ont permis d'explorer différentes approches, qui ont mis en évidence à la fois le potentiel et les limites des solutions existantes.

La thèse de **Houssein Mariam** a porté sur des capteurs RF large bande en réflexion et en transmission, jusqu'à 25 GHz, intégrant des canaux micro-fluidiques. Ces travaux ont permis une analyse spectrale étendue, mais ont montré une sensibilité limitée aux faibles variations de permittivité diélectrique.

La thèse de **Zied Fritiss** a exploré une approche différentielle basée sur un coupleur hybride 180° et des sondes coaxiales sur substrat PCB, opérant sur une bande fréquentielle relativement large. Cette approche a démontré l'intérêt de structures différentielles sensibles, notamment pour des applications de détection de mélanomes.

Plus récemment, la thèse de **Joséphine Pichereau** s'est concentrée sur un capteur résonant différentiel à double SRR (Split Ring Resonator ou Résonateur à ligne fendue), à fréquence fixe, pour la caractérisation de mélanges

binaires. Ce travail a mis en évidence l'apport des capteurs résonants et a introduit des méthodes d'analyse avancées, basées sur des circuits équivalents et sur la décomposition en sommes de Lorentziennes, pour extraire des résonances proches.

Le sujet de thèse proposé ne constitue donc pas une simple continuité, mais un recentrage des travaux autour de la conception et de l'optimisation de capteurs RF multi-résonants, avec une approche plus systématique par modélisation électrique. Il introduit également un nouvel axe fort autour de la simplification de l'instrumentation, via l'utilisation d'un réflectomètre six-ports, afin de préparer le développement de systèmes de mesure compacts et portables à plus long terme.

Sujet de la thèse

Cette thèse vise à concevoir, fabriquer et caractériser un capteur RF multi-résonant, autour du GHz, et intégrant de la micro-fluidique (volume analysé < 100 nl) pour la caractérisation diélectrique de milieux liquides et en s'appuyant sur des architectures permettant d'obtenir plusieurs résonances exploitables, par exemple via :

- (i) des multi-résonateurs à fréquences fixes,
- (ii) un capteur unique présentant naturellement plusieurs modes/résonances,
- (iii) un capteur reconfigurable dont la(les) résonance(s) est(ont) ajustable(s) (diodes PIN, varactors, ...), et/ou (iv) des structures inspirées des méta-matériaux (types SRR/CSRR).

Les travaux incluront une démarche de conception et d'optimisation (simulation/modélisation électromagnétique et circuit), notamment de la sensibilité/sélectivité du ou des capteurs, ainsi qu'une exploitation avancée des signatures multi-résonantes au moyen de modèles par circuits équivalents et de méthodes d'analyse adaptées à la séparation de résonances proches.

En complément, cette thèse pourra explorer l'utilisation d'outils de machine learning et d'intelligence artificielle pour traiter et exploiter les quantités de données attendues (signatures multi-fréquentielles, séries temporelles), avec l'objectif d'en tirer un meilleur profit pour la caractérisation fine des milieux cibles.

Enfin, un axe majeur portera sur la simplification de l'instrumentation par le développement d'une mesure en réflexion et/ou transmission basée sur un réflectomètre six-ports (calibration, estimation du coefficient de réflexion et/ou transmission, comparaison à des mesures de référence), afin de préparer une chaîne de mesure plus compacte, moins coûteuse et orientée vers des systèmes portables. La figure 1 ci-dessous montre le synoptique global du travail de thèse.

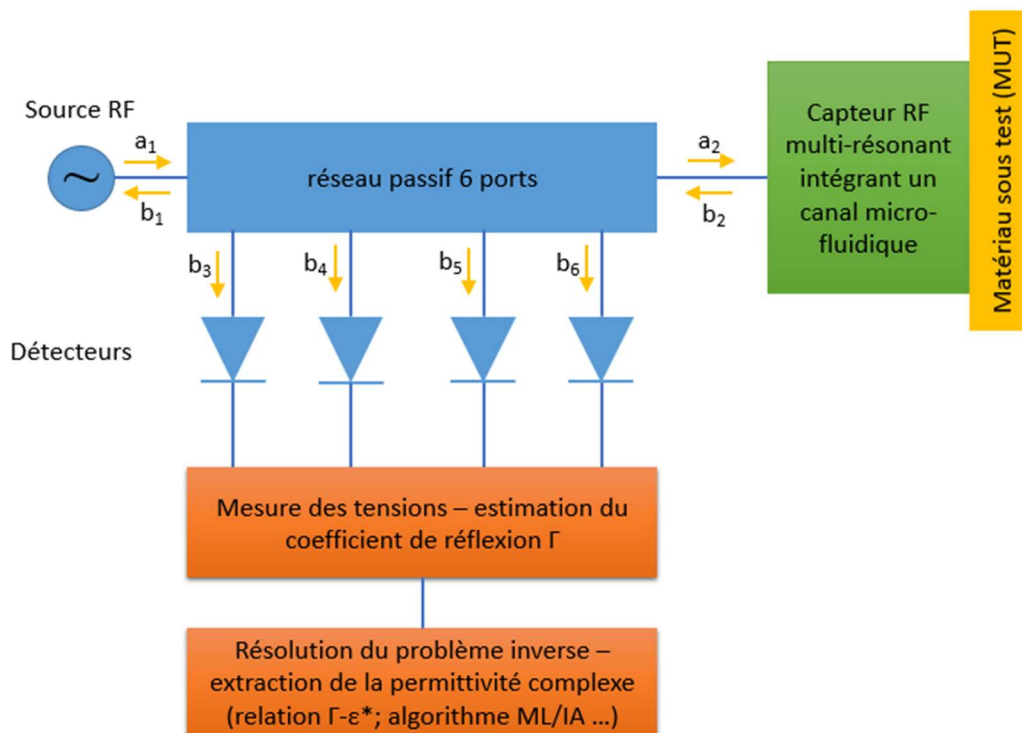


Figure 1 synoptique global du travail de thèse

Travail demandé

- Conception, modélisation et optimisation du capteur multi-résonant : Choix du capteur multi-résonant, simulations électromagnétiques, développement de modèles (dont circuits équivalents) et critères de performance (sensibilité, sélectivité, facteur de qualité).
- Fabrication du capteur et intégration d'un canal micro-fluidique
- Conception/fabrication/validation du réflectomètre six-ports : Conception et calibration du six-ports, reconstruction du coefficient de réflexion et/ou de transmission, validation par comparaison à des mesures de référence (VNA) et analyse des incertitudes.
- Exploitation des signatures multi-résonantes par l'utilisation du ML/IA : Traitement des données multi-résonantes, extraction de paramètres pertinents, modèles ML/IA pour améliorer la caractérisation fine et la robustesse face aux variabilités expérimentales.
- Campagnes de tests sur milieux cibles et démonstrations : Mesures sur milieux de référence puis cibles (complexes/biologiques), évaluation des performances, démonstration "capteur + micro-fluidique + mesure + traitement".

Références bibliographiques

1. YONG, Jing Lei, LI, Peng, HE, Xing Li, et al. Multi-Frequency Microwave Liquid Identification Sensor Based on Interdigital Split Ring Resonators. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025.
2. PIEKARZ, Ilona, GÓRSKA, Sabina, RAZIM, Agnieszka, et al. Planar single and dual-resonant microwave biosensors for label-free bacteria detection. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, vol. 351, p. 130899.
3. AALIZADEH, Majid, AZMOUDEH AFSHAR, Morteza, et FAN, Xudong. Machine Learning Enabled Multidimensional Data Utilization Through Multi-Resonance Architecture: A Pathway to Enhanced Accuracy in Biosensing. ACS omega, 2025, vol. 10, no 20, p. 20713-20722.
4. CHONG, Chuanyin, HONG, Tao, et HUANG, Kama. Design of the complex permittivity measurement system based on the waveguide six-port reflectometer. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, vol. 71, p. 1-12.
5. GHANNOUCHI, Fadhel M. et BOSISIO, Renato G. Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2002, vol. 38, no 2, p. 505-508.

Profil recherché

Doit mentionner à minima :

1. les disciplines abordées pendant la thèse sont l'électronique et l'ingénierie des circuits RF et micro-ondes
2. le « profil idéal ou typique » est une école d'ingénieurs en électronique ou en télécom ou un Master EEA contenant des cours sur les circuits microondes

Contact

hakim.takhedmit@univ-eiffel.fr ; olivier.francais@esiee.fr ; patrick.poulichet@esiee.fr

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.*