

- *English version below* -

Proposition de thèse

Caractérisation de maladies de peau par spectroscopie diélectrique radiofréquence : complémentarité des mesures en réflexion et en transmission pour une approche robuste à l'aide d'un dispositif d'utilisation simple

Directeur : Patrick Poulichet - Co-directrice : Elodie Richalot

Laboratoire ESYCOM / ED MSTIC

1. Contexte

1.1 Problématique et enjeux

La détection et le diagnostic précoces des maladies de la peau représentent un enjeu majeur en dermatologie. Les méthodes traditionnelles de diagnostic reposent soit sur un examen visuel se limitant aux propriétés superficielles de la peau, soit sur des examens plus approfondis mais invasifs et coûteux. La spectroscopie diélectrique aux fréquences RF et micro-ondes émerge comme une technique innovante pour l'analyse des tissus cutanés. En effet, cette approche présente l'avantage de donner accès aux propriétés des couches internes des tissus, contrairement à l'examen visuel ; ainsi, elle offre une alternative non invasive permettant d'analyser les propriétés des tissus cutanés sur des profondeurs pouvant être ajustées, ce qui pourrait être exploité pour la détection précoce de maladies (avant l'apparition de marques visibles) ou pour affiner un diagnostic. Cette approche repose sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les tissus biologiques, permettant d'obtenir des informations précises sur leurs propriétés électriques (par la conductivité σ) et diélectriques (par la permittivité complexe ϵ), et, par extension, sur leur composition et leur structure. Les sondes RF et/ou micro-ondes à développer doivent être spécifiquement adaptées aux caractéristiques des pathologies ciblées, afin d'assurer une mesure précise et fiable. Elles doivent également être conçues et optimisées pour fournir des résultats reproductibles dans des conditions d'utilisation réelles, garantissant ainsi la fiabilité des diagnostics. De plus, ces sondes doivent être facilement intégrables dans des dispositifs portables pour les rendre facilement utilisables par des professionnels de santé. Dans le cadre **du suivi de l'évolution de maladies cutanées**, cela doit

permettre d'offrir une solution pratique pour un usage par les professionnels de santé à la fois en contexte hospitalier et en cabinet médical.

1.2 Activités d'ESYCOM en lien avec le sujet

Le sujet présenté ici s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux menés au sein du laboratoire ESYCOM par l'équipe encadrante :

- **La thèse d'Houssein Mariam (soutenue en décembre 2020)** portait sur le développement d'un capteur microfluidique hyperfréquence large bande [1], [2]. 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.
- Un autre axe de travail porte sur l'utilisation de résonateurs planaires permettant d'analyser des liquides ou solides placés à proximité d'une ouverture dans le résonateur rectangulaire. **Ce travail a fait l'objet de la thèse de Joséphine Pichereau** soutenue en décembre 2025. Une structure différentielle comportant deux résonateurs permet de placer sur l'un d'entre eux un milieu de référence, rendant la structure plus robuste aux variations liées aux conditions expérimentales [3][4]. Ce capteur résonant a ensuite été modifié pour le rendre fréquentiellement accordable grâce à l'ajout de diodes varactors dans le cadre de la **thèse de Houssein Rouached** actuellement en cours [5].
- Cette approche différentielle a également été retenue dans le **travail de thèse de Zied Fritiss**, qui a porté sur la conception, la simulation et la réalisation d'une sonde destinée à détecter de façon précoce le cancer de la peau. Il s'agit d'une sonde large bande dans une bande de fréquence de 1GHz à 5GHz (figure 1) [3][6].

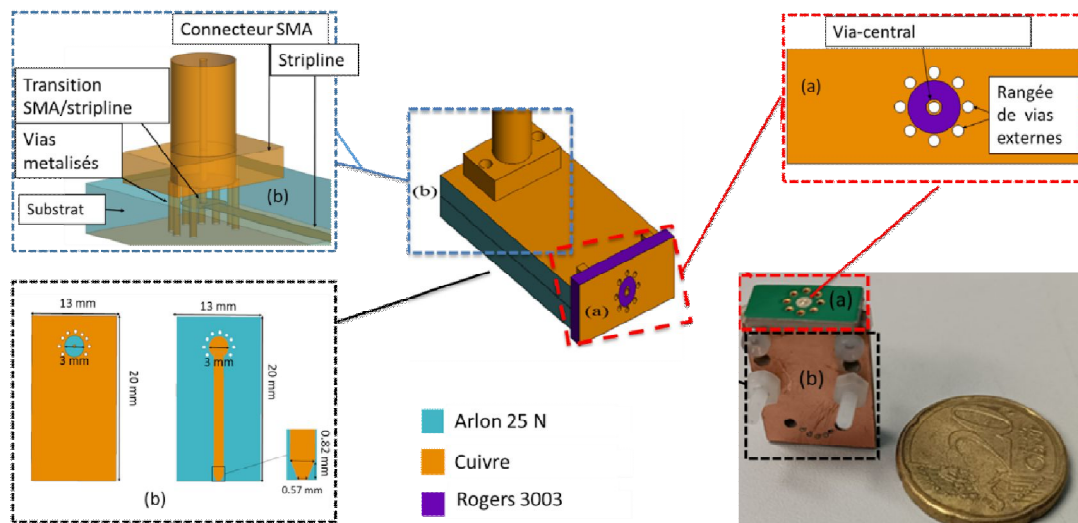


Figure 1 : Sonde d'analyse du cancer de la peau.

La bande fréquentielle d'analyse a été choisie en fonction de la variation importante de la permittivité relative de la peau saine par rapport à une tumeur sur cette bande, induisant une modification de la réflexion du signal électromagnétique en bout de sonde au niveau de la zone de contact. Cet effet a été mis à profit au sein d'une structure différentielle comportant deux sondes identiques reliées à un coupleur (Fig. 2), de manière à mesurer directement un indicateur caractéristique d'une différence des propriétés de la peau aux deux points sondés. **Cette approche originale** est particulièrement pertinente pour l'application visée car elle permet de s'affranchir de la difficulté inhérente aux

mesures in-vivo liées à la variabilité des paramètres physiologiques des individus. Toutefois, le coupleur utilisé dans le dispositif de mesure différentiel limite sa bande fréquentielle de fonctionnement de sorte que nous étudierons dans la suite de nos travaux le principe d'une comparaison de la peau du patient entre deux points en s'affranchissant de la structure différentielle.

Le sujet de thèse présenté s'inscrit plus particulièrement dans la continuité de cette dernière thèse, et fait suite à des tests en conditions réelles ayant fait apparaître des évolutions nécessaires du dispositif développé.

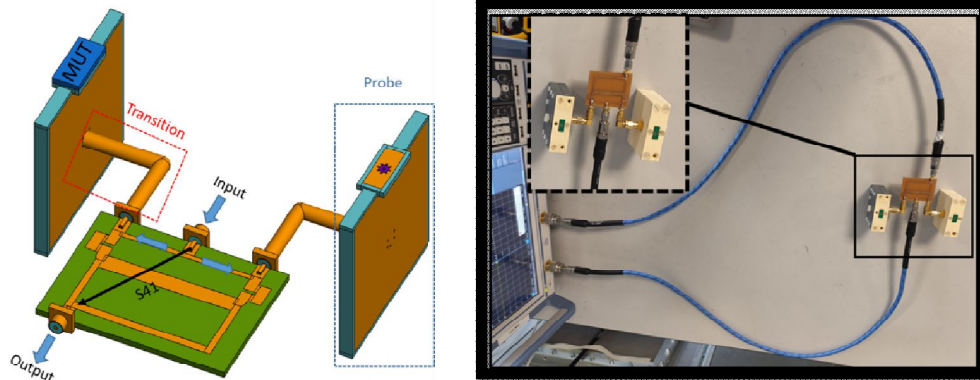


Figure 2 : Structure différentielle pour la détection du cancer de la peau. A gauche, principe de fonctionnement et accès de mesure, à droite banc de mesure.

1.3 Tests en milieu hospitalier et limitations du dispositif de mesure actuel

Un intérêt a été identifié pour le suivi du développement d'une maladie rare se traduisant par des tumeurs sur la peau, la neurofibromatose. Il serait en particulier intéressant de proposer un dispositif capable de détecter le développement d'un neurofibrome à un stade précoce c'est-à-dire avant l'apparition d'une protubérance visible sur la peau.

Les tests expérimentaux effectués sur un patient ainsi que les discussions avec les médecins dermatologues de l'Hôpital Henri Mondor à Créteil ont permis de mettre en avant les évolutions souhaitables du capteur pour rendre son utilisation plus simple et pour que ce dispositif constitue une aide fiable au diagnostic médical. Ces différents aspects seront examinés au cours de ce travail de thèse.

2. Sujet de la thèse

Le travail proposé s'appuiera sur les connaissances acquises avec la thèse de Zied Fritiss afin d'optimiser le capteur en fonction de l'épaisseur de peau à sonder ainsi que la résolution spatiale recherchée (surface à examiner). Pour cela, l'influence de la bande fréquentielle de mesure sera examinée ainsi que la géométrie du capteur. Ce travail nécessitera une analyse des résultats de mesure en les confrontant à des simulations électromagnétiques.

Par ailleurs, deux approches sont envisageables pour sonder la peau, consistant en la mesure d'un coefficient de réflexion à l'aide d'une unique sonde ou d'un coefficient de transmission entre deux sondes proches appliquées sur la peau. Pour tester cette deuxième configuration, il conviendra de développer une sonde permettant d'effectuer des mesures en transmission entre plusieurs points

rapprochés de quelques millimètres sur la peau. Ces deux approches conduisent à des résultats différents et une étude sera menée pour évaluer leur précision respective par rapport à l'extraction des paramètres utiles à l'établissement d'un diagnostic (tels que les propriétés des tissus, la largeur et la profondeur d'une tumeur), en fonction de la géométrie du capteur. Ce travail nécessitera la compréhension des phénomènes biologiques examinés (tels que l'évolution au cours du temps de la forme et de la profondeur d'une tumeur), ce qui impliquera des échanges avec des médecins dermatologues.

Par ailleurs, pour assurer un contact satisfaisant entre la sonde et la peau, l'ajout d'une couche de contact sera envisagé. A partir des propriétés de cette couche, des solutions (relatives à différents choix de matériaux) seront proposées et testées.

Enfin, nous aimerions concevoir un système plus compact pour rendre sa manipulation plus aisée et la mesure plus ergonomique, et proposer un protocole de mesure facile à suivre tout en fournissant des résultats facilement interprétables. Ainsi, la configuration de mesure proposée dans le cadre de la thèse de Zied Fritiss, à savoir un dispositif différentiel, a montré plusieurs faiblesses (utilisation complexe, bande fréquentielle de fonctionnement réduite, grande sensibilité à la connectique) rendant nécessaire l'utilisation d'une approche alternative. Il s'agira donc, en s'appuyant sur l'expérience acquise lors des tests expérimentaux, de proposer un dispositif plus ergonomique et de tester la robustesse du protocole de mesure, sachant que les propriétés de la peau varient en fonction de la personne et de la zone du corps considérée.

Une fois le protocole de mesure établi, le dispositif sera rendu portable grâce à l'utilisation de circuits programmables et d'un nano-VNA. Pour cette partie, une collaboration avec des chercheurs de Sorbonne Université ayant travaillé au développement d'un dispositif d'imagerie médical portable [7] est envisagée.

3. Positionnement de ce travail par rapport à l'état de l'art

En raison de la prévalence importante du cancer de la peau (9 500 personnes diagnostiquées chaque jour aux Etats-Unis) [8] et de la faible fiabilité du diagnostic visuel (estimé à 66-82% chez les dermatologues) [9], des travaux ont été menés par plusieurs équipes pour chercher des méthodes alternatives d'aide au diagnostic et les capteurs électromagnétiques ont montré leur pertinence pour cette application.

L'utilisation d'une sonde coaxiale à effet de bout a montré une bonne sensibilité aux propriétés de la peau autour du GHz, avec la possibilité de distinguer des réponses différentes avec une peau saine, une tumeur bénigne, une tumeur maligne et un grain de beauté [8] [10]. Toutefois, afin de détecter des hétérogénéités de taille réduite, une miniaturisation de la zone sensible du capteur est nécessaire et un embout fin permettant une bonne visibilité de la zone sondée est requis pour permettre un positionnement précis sur la zone suspecte.

A cet effet, une montée en fréquence associée à une réduction des dimensions du dispositif a été proposée avec une sonde à effet de bout fonctionnant autour de 100GHz [11]. Les inconvénients de cette solution sont d'une part une variation de la permittivité entre peau saine et tumeur beaucoup plus réduite que dans la bande du GHz, et un équipement coûteux.

La possibilité d'utiliser l'information relative à la transmission entre plusieurs sondes a été évoquée dans une étude théorique [12], montrant l'intérêt de cette approche associée à une mesure multi-

fréquentielle. Cette direction prometteuse n'a pas été exploitée dans des applications concrètes d'analyse du cancer de la peau et sera examinée au cours de cette thèse.

La possibilité de combiner différentes approches pour affiner le diagnostic a été proposée avec l'utilisation conjointe d'une sonde hyperfréquence et d'une méthode d'analyse d'image [13]. Cette approche semble pertinente et l'utilisation de différentes sondes hyperfréquences permettant d'extraire des grandeurs différentes sera également considérée dans ce travail.

Dans le cadre de la thèse de Zied Fritiss, une sonde à effet de bout fonctionnant à des fréquences autour de 2,5GHz et capable de détecter une hétérogénéité de diamètre inférieur à 1mm a été développée, alliant ainsi une grande résolution spatiale à une bonne sélectivité (liée à la bande fréquentielle choisie). Par ailleurs, l'approche différentielle proposée n'a, à notre connaissance, jamais été utilisée dans cette configuration. L'expérience acquise avec ce travail et plus généralement dans le cadre des sondes RF positionne donc très avantageusement l'équipe sur la thématique des sondes RF pour la détection du cancer de la peau.

Par ailleurs, il n'existe à l'heure actuelle aucun capteur RF dédié à la détection de la neurofibromatose et la possibilité de sonder les propriétés internes de la peau présente un grand intérêt médical. En effet, une différence importante entre le développement de cette maladie et celui du cancer cutané tient au fait que les neurofibromes se développent initialement dans les couches internes de la peau avant d'atteindre la couche superficielle alors que le développement d'une tumeur débute sur les couches superficielles ce qui la rend visuellement détectable. Une approche spécifique et se distinguant des capteurs existants sera donc nécessaire pour sonder en profondeur les propriétés de la peau permettant ainsi une détection précoce des neurofibromes, avant qu'ils n'atteignent la surface de la peau.

4. Travail demandé

Plusieurs topologies de capteurs seront tout d'abord testées, à la fois pour des mesures en réflexion à partir d'un unique accès d'excitation et pour des mesures en transmission entre plusieurs capteurs rapprochés. Dans ce deuxième cas, la problématique de couplage entre sondes devra être étudiée et prise en compte dans la conception et l'optimisation du dispositif. Ce travail s'appuiera d'une part sur des mesures effectuées avec différentes sondes et d'autre part sur des simulations électromagnétiques permettant de déterminer la zone de peau sondée (étendue et profondeur) et d'optimiser la configuration de mesure.

Suite à cette première étude, des sondes optimisées permettant des mesures en réflexion ou en transmission seront conçues et testées. Il est envisageable que plusieurs topologies de sondes soient retenues pour répondre à plusieurs types de pathologies ou accéder à des grandeurs différentes. Un travail sera alors mené sur un protocole de mesure à la fois simple à appliquer et assurant une bonne fiabilité des résultats. En particulier, la robustesse du diagnostic sera testée sur des peaux de propriétés différentes pour tenir compte de la variabilité biologique en conditions réelles. Ces tests seront effectués dans un premier temps sur des échantillons mimant les propriétés de la peau (appelés « tissus fantômes ») et qu'il conviendra de fabriquer à l'aide de produits communs et non toxiques [6], avant d'envisager des tests sur des personnes.

Les résultats obtenus permettront de mettre en lumière les limitations des premières sondes conçues et de les modifier en conséquence. D'autres aspects seront dans un deuxième temps examinés :

- Tout d'abord, une attention sera portée au contact entre la sonde et la peau pour éviter la présence d'une couche d'air non maîtrisée et pour assurer un bon contact sur les différentes parties du corps. Ceci nécessitera de s'intéresser aux propriétés de différents matériaux souples et de tester par simulation différentes possibilités avant la fabrication d'un prototype.
- L'ergonomie du dispositif de mesure sera ensuite optimisée pour permettre un positionnement précis en facilitant le geste du praticien. Ce travail s'appuiera sur l'expérience tirée des tests effectués et sur les retours des médecins.
- Pour finir, le dispositif de mesure sera rendu compact et portable pour une plus grande facilité d'utilisation et une réduction de son coût (en évitant l'utilisation d'un VNA coûteux). Cette partie du travail nécessitera le choix et la programmation de circuits, en particulier avec l'utilisation d'un nano-VNA.

Détails du travail à réaliser :

- Prise en main des outils et appropriation du sujet : utilisation de sondes existantes, mesure avec un VNA sur des échantillons des permittivités connues, simulation des sondes fonctionnant en réflexion et en transmission.
 - Familiarisation avec les phénomènes biologiques d'intérêt et réflexion sur les grandeurs pertinentes à extraire.
 - Mise en place d'un protocole de mesure et tests de celui-ci.
 - Fabrication et caractérisation d'échantillons de tissus fantômes de propriétés variables.
 - Optimisation, fabrication et caractérisation d'une ou plusieurs sondes.
 - Tests de fiabilité des sondes et du protocole de mesure pour différents tissus fantômes.
 - Analyse de propriétés recherchées pour la couche d'interface souple entre la sonde et la peau, recherche de solutions et évaluation de leurs performances.
 - Réflexion sur l'ergonomie de la sonde et amélioration de celle-ci.
1. Fabrication des sondes optimisées. Mesures sur des tissus fantômes et sur des volontaires.
 - Rédaction d'articles de revue et de conférences nationales et/ou internationales.
 - Rédaction de la thèse.

Profil recherché

Idéalement, le candidat ou la candidate aura suivi un master ou une formation d'ingénieur dans le domaine de l'électronique et des radiofréquences. Il ou elle saura utiliser un logiciel de simulation électromagnétique, et effectuer des mesures à l'aide d'un VNA. Un plus serait d'avoir une forte appétence pour les applications en direction du vivant (milieu biologique).

Contacts

Directeur de thèse: Patrick Poulichet - Email: patrick.poulichet@esiee.fr

Co-directrice de thèse : Elodie Richalot – Email : elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr

Références bibliographiques

- [1] [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.
- [2] [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.
- [3] PICHEREAU, Josephine, FRITISS, Zied, TAKHEDMIT, Hakim, *et al.* Sensing biological materials with differential RF broadband and resonating microsensors. In : *2023 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)*. IEEE, 2023. p. 65-70.
- [4] J. Pichereau, H. Takhedmit, U. Kuhl, O. Legrand, J. Leszczynski, S. Protat, P. Poulichet, O. Francais, E. Richalot "Extraction and Analysis of the Resonance Properties of a Differential SRR-based RF Sensor," 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Stockholm, Sweden, 2025, pp. 1-5, doi : 10.23919/Eu-CAP63536.2025.10999217.
- [5] 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.
- [6] Mohamed Zied Fritiss, Patrick Poulichet, Hakim Takhedmit, Laurent Lanquetin, Stephane Protat, et al.. 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] Joséphine Dupeyron Masini, Frédérique Deshours, Georges Alquie, Rania Shahbaz, Sylvain Feruglio, Olivier Meyer, Dimitri Galayko, Hamid Kokabi et Jean-Michel Davaine. « Complementary Split-Ring Resonator for Non-Invasive Diagnosis of Carotid Artery Atherosclerosis : Towards Future In-Vivo Measurements ». In : *Innovation and Research in BioMedical engineering 46.2* (avr. 2025), p. 100883. doi : 10.1016/j.irbm.2025.100883. url : <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-05187385>.
- [8] R. Schiavoni, A. Cataldo, G. Maietta, E. Filieri, et al., "Microwave Reflectometry Sensing System for Low-Cost in-vivo Skin Cancer Diagnostics," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13918-13928, 2023. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3243843.
- [9] K. Chand, P. Mehta, D. G. Beetner, R. Zoughi et W. V. Stoecker, "Microwave Reflectometry as a Novel Diagnostic Method for Detection of Skin Cancers," in *Proc. 22nd IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)*, Ottawa, ON, Canada, May 2005, pp. 1425-1428. DOI:10.1109/IMTC.2005.1604385.
- [10] P. Mehta, K. Chand, D. Narayanswamy, D. G. Beetner, R. Zoughi et W. V. Stoecker, "Microwave Reflectometry as a Novel Diagnostic Tool for Detection of Skin Cancers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, pp. 1309-1316, Aug. 2006. DOI:10.1109/TIM.2006.876566.

[11] F. Töpfer, S. Dudorov et J. Oberhammer, "Micromachined Millimeter-Wave Near-Field Probe for Skin Cancer Diagnosis," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 6, pp. 2050-2059, Jun. 2015.

[12] L. Beilina, A. Eriksson, N. Neittaanmäki, "Frequency Inversion Method and Device for Malignant Melanoma Detection Using RF/Microwaves," arXiv, Oct. 2024.

[13] A. Cataldo, L. Cino, C. Distanto, G. Maietta, A. Masciullo, P. L. Mazzeo et R. Schiavoni, "Integrating Microwave Reflectometry and Deep Learning Imaging for In-Vivo Skin Cancer Diagnostics," Measurement, vol. 235, 114911, Aug. 2024. DOI:10.1016/j.measurement.2024.114911.

[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.*

PhD Thesis Proposal

Characterization of skin diseases via radiofrequency dielectric spectroscopy: complementarity of reflection and transmission measurements for a robust approach using a user-friendly device.

Director: Patrick Poulichet | **Co-director:** Elodie Richalot

Laboratory: ESYCOM / ED MSTIC

1. Context

1.1 Problem statement and challenges

Early detection and diagnosis of skin diseases represent a major challenge in dermatology. Traditional diagnostic methods rely either on visual examination—limited to the superficial properties of the skin—or on more in-depth but invasive and costly procedures. Dielectric spectroscopy at RF and microwave frequencies is emerging as an innovative technique for skin tissue analysis.

Unlike visual examination, this approach provides access to the properties of internal tissue layers. It offers a non-invasive alternative for analyzing skin tissue properties at adjustable depths, which could be exploited for early disease detection (before visible marks appear) or to refine a diagnosis.

This approach is based on the interaction of electromagnetic waves with biological tissues, providing precise information on their electrical properties (via conductivity σ) and dielectric properties (via complex permittivity ϵ), and by extension, their composition and structure. The RF and/or microwave probes to be developed must be specifically adapted to the characteristics of the targeted pathologies to ensure accurate and reliable measurements. They must also be optimized for reproducible results in real-world conditions. Furthermore, these probes must be easily integrated into portable devices to ensure they are practical for healthcare professionals in both hospital and private practice settings.

1.2 ESYCOM activities related to the subject

The research presented here follows several projects conducted within the ESYCOM laboratory by the supervising team:

- **Houssein Mariam's Thesis (2020):** Focused on developing a wideband microwave microfluidic sensor (Fig. 1). Excellent results were obtained for characterizing small liquid volumes, showing sensitivity to micro-beads similar in size to biological cells.

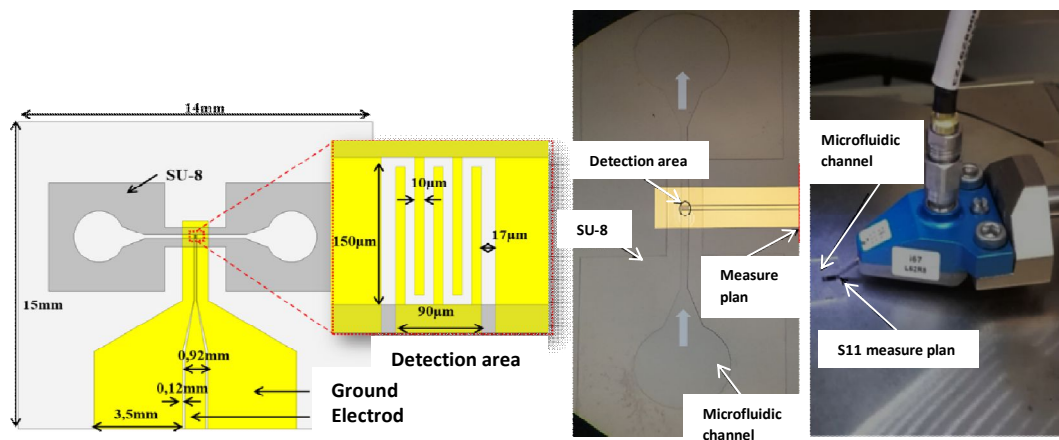


Fig. 1: Geometry of the microfluidic sensor and photograph of the measured device.

- **Resonant Structures:** Explored for their higher sensitivity. Work by Joséphine Pichereau (2025) utilized planar differential resonators to analyze liquids or solids within the opening of a rectangular resonator (Fig. 2). Using two resonators allows one to serve as a reference, making the structure robust against experimental variations. The difference in permittivity between samples is reflected in the shift of resonance frequencies and bandwidths. This sensor was later made frequency-tunable using varactor diodes by Houssein Rouached.

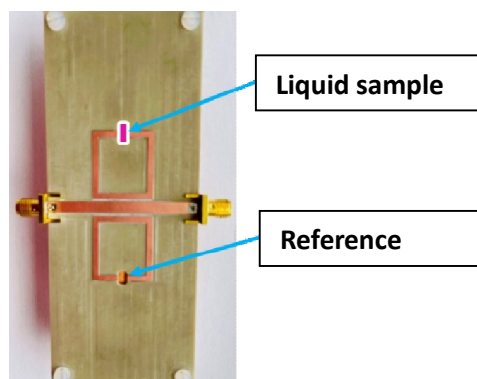


Fig. 2: Resonant and planar differential sensor.

- **This differential approach** was also adopted in the doctoral work of Zied Fritiss, which focused on the design, simulation, and fabrication of a probe intended for the early detection of skin cancer. To this end, we designed a probe that transmits the electromagnetic field from the VNA (Vector Network Analyzer) to the skin or tissue under analysis as efficiently as possible. This is a wideband probe operating within a frequency band of 1 GHz to 5 GHz. Figure 3 illustrates the assembly structure used to deliver the radio frequency signal to the skin with maximum efficiency [3][6].

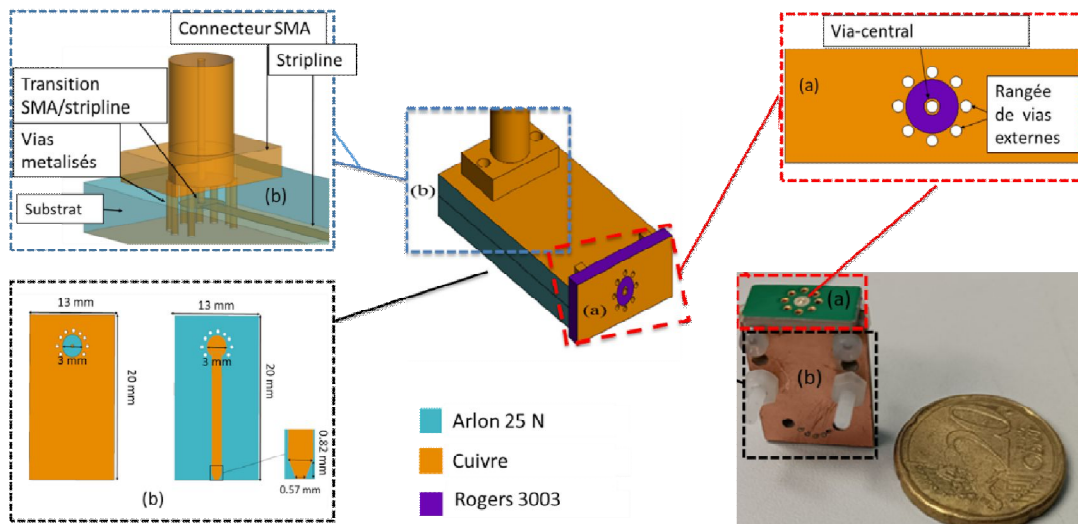


Fig 3: Skin cancer analysis probe.

The analysis frequency band was chosen based on the significant variation in the relative permittivity between healthy skin (around 30) and melanoma (around 50-60) in this band, causing a change in the reflection of the electromagnetic signal at the tip of the probe, at the point of contact between the probe and the skin being examined. This effect was exploited in a differential structure comprising two identical probes connected to a coupler (Fig. 4), so as to directly measure an indicator characteristic of a difference in skin properties at the two probed points. This original approach is particularly relevant for the intended application because it overcomes the difficulty inherent in in-vivo measurements related to the variability of individuals' physiological parameters: thus, by choosing an area of healthy skin on the patient as the reference medium, the reliability of the diagnosis is increased by adapting to the properties of the patient's skin in the area of interest and to his physiological state at the time of the test. However, the coupler used in the differential measurement device limits its operating frequency band, so that in our future work we will retain the principle of comparison with the patient's skin while moving away from the differential structure.

The thesis topic presented here is a continuation of the latter thesis and follows on from real-world tests that revealed necessary changes to the device developed.

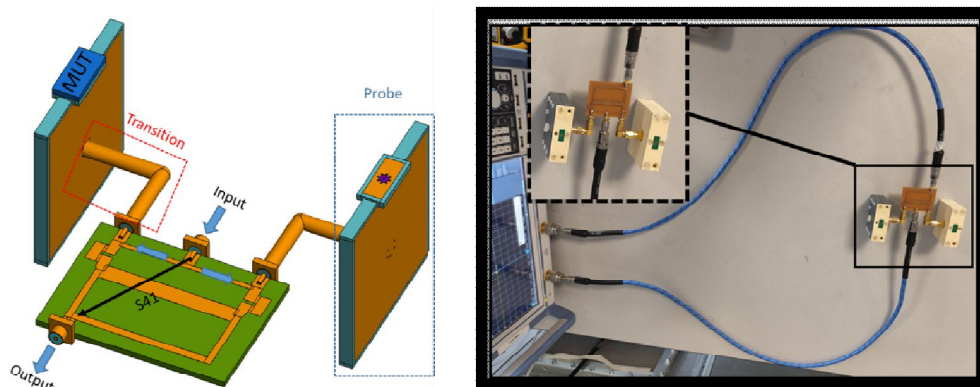


Fig. 4: Differential structure for skin cancer detection. Left: operating principle and measurement access; right: measurement bench.

1.4 Hospital testing and limitations of the current measurement device

Interest has been identified in monitoring the development of a rare disease that causes tumors on the skin, known as neurofibromatosis. It would be particularly useful to offer a device capable of detecting the development of a neurofibroma at an early stage, i.e., before a visible lump appears on the skin.

Experimental tests carried out on a patient and discussions with dermatologists at Henri Mondor Hospital in Créteil have highlighted desirable improvements to the sensor to make it easier to use and ensure that the device is a reliable aid to medical diagnosis. These various aspects will be examined in this thesis.

2. Thesis Objectives

The proposed work will build on the knowledge acquired in Zied Fritiss' thesis in order to optimize the sensor according to the thickness of the skin to be probed and the desired spatial resolution (area to be examined). To this end, the influence of the measurement frequency band will be examined, as well as the geometry of the sensor. This work will require an analysis of the measurement results by comparing them with electromagnetic simulations.

In addition, two approaches are possible for probing the skin, consisting of measuring a reflection coefficient using a single probe or a transmission coefficient between two probes placed close to each other on the skin. To test this second configuration, a probe will need to be developed that can take transmission measurements between several points on the skin that are a few millimeters apart. These two approaches yield different results, and a study will be conducted to evaluate their respective accuracy in extracting parameters useful for diagnosis (such as tissue properties, tumor width and depth), depending on the geometry of the sensor. This work will require an understanding of the biological phenomena examined (such as the evolution of the shape and depth of a tumor over time), which will involve discussions with dermatologists.

In addition, to ensure satisfactory contact between the probe and the skin, the addition of a contact layer will be considered. Based on the properties of this layer, solutions (relating to different material choices) will be proposed and tested.

Finally, we would like to design a more compact system to make it easier to handle and more ergonomic to use, and propose an easy-to-follow measurement protocol that provides easily interpretable results. The measurement configuration proposed in Zied Fritiss' thesis, namely a differential device, has shown several weaknesses (complex use, reduced operating frequency band, high sensitivity to connectivity), making it necessary to use an alternative approach. Based on the experience gained during the experimental tests, the aim will therefore be to propose a more ergonomic device and to test the robustness of the measurement protocol, bearing in mind that skin properties vary depending on the individual and the area of the body being considered.

Once the measurement protocol has been established, the device will be made portable through the use of programmable circuits and a nano-VNA. For this part, collaboration with researchers from Sorbonne University who have worked on the development of a portable medical imaging device [7] is being considered.

3. Position relative to the State of the Art

Due to the high prevalence of skin cancer (9,500 people diagnosed every day in the United States) [8] and the low reliability of visual diagnosis (estimated at 66-82% among dermatologists) [9], several teams have conducted research to find alternative methods to aid diagnosis, and electromagnetic sensors have proven to be relevant for this application.

The use of a coaxial tip-effect probe has shown good sensitivity to skin properties around GHz, with the ability to distinguish different responses in healthy skin, benign tumors, malignant tumors, and moles [8][10]. However, in order to detect small heterogeneities, miniaturization of the sensor's sensitive area is necessary, and a thin tip allowing good visibility of the probed area is required to enable precise positioning on the suspicious area.

To this end, an increase in frequency combined with a reduction in the size of the device has been proposed with a tip-effect probe operating around 100GHz [11]. The disadvantages of this solution are, on the one hand, a much smaller variation in permittivity between healthy skin and tumors than in the GHz band, and, on the other hand, expensive equipment. This is why, as part of Zied Fritiss's thesis, we sought to reduce the dimensions of the sensor's sensitive area while maintaining operation in the GHz range.

The possibility of using information relating to transmission between several probes has been mentioned in a theoretical approach [12], demonstrating the value of this approach in combination with multi-frequency measurement. This promising direction has not been exploited in concrete applications for skin cancer analysis and will be examined in this thesis.

The possibility of combining different approaches to refine diagnosis has been proposed with the joint use of a microwave probe and an image analysis method [13]. This approach seems relevant, and the use of different microwave probes to extract different quantities will also be considered in this work.

As part of Zied Fritiss's thesis, a tip-effect probe operating at frequencies around 2.5 GHz and capable of detecting heterogeneity with a diameter of less than 1 mm was developed, combining high spatial resolution with good selectivity (linked to the chosen frequency band). Furthermore, to our knowledge, the proposed differential approach has never been used in this configuration. The experience gained with this work and more generally in the field of RF probes therefore places the team in a very advantageous position in the field of RF probes for skin cancer detection.

Furthermore, there is currently no RF sensor dedicated to the detection of neurofibromatosis, and the possibility of probing the internal properties of the skin is of great medical interest. Indeed, an important difference between the development of this disease and that of skin cancer is that neurofibromas initially develop in the inner layers of the skin before reaching the surface layer, whereas tumor development begins in the surface layers, making it visually detectable. A specific approach, distinct from existing sensors, will therefore be necessary to probe the properties of the skin in depth, enabling early detection of neurofibromas before they reach the skin's surface.

4. Proposed work plan

The objective of this thesis is to design and optimize an RF sensor for biomedical applications, particularly the detection and monitoring of skin abnormalities. The device developed should provide reliable and robust diagnostic support, despite the variability of skin properties depending on the individual, his physiological condition, and the area of the body being examined, by enabling the

determination of relevant biological parameters to be defined in collaboration with partner dermatologists.

Several sensor topologies will first be tested, both for reflection measurements from a single excitation source and for transmission measurements between several closely spaced sensors. In the latter case, the issue of coupling between probes will need to be studied and taken into account in the design and optimization of the device. This work will be based on measurements taken with different probes and on electromagnetic simulations to determine the area of skin being probed (extent and depth) and optimize the measurement configuration.

Following this initial study, which will enable geometric parameters to be set with regard to the skin abnormalities being investigated, optimized probes for reflection or transmission measurements will be designed and tested. It is conceivable that several probe topologies will be selected to address several types of pathologies or to access different quantities. Work will then be carried out on a measurement protocol that is both easy to apply and ensures reliable results. In particular, the robustness of the diagnosis will be tested on skin with different properties to take into account biological variability in real conditions. These tests will initially be carried out on samples that mimic the skin properties (called "phantom tissues") and which will need to be manufactured using common, non-toxic products [6], before considering tests on humans.

The results obtained will highlight the limitations of the first designed probes and allow them to be modified accordingly. Other aspects will be examined in a second phase:

- First, attention will be paid to the contact between the probe and the skin to avoid the presence of an uncontrolled layer of air and to ensure good contact with different parts of the body. This will require studying the properties of different flexible materials and testing different possibilities through simulation before manufacturing a prototype.

- The ergonomics of the measuring device will then be optimized to allow precise positioning by facilitating the practitioner's movements. This work will be based on the experience gained from the tests carried out and on feedback from doctors.

- Finally, the measuring device will be made compact and portable for greater ease of use and reduced cost (by avoiding the use of an expensive VNA). This part of the work will require the selection and programming of circuits, in particular with the use of a nano-VNA.

Year 1:

- Familiarization with the tools and the subject: use of existing probes, measurement with a VNA on samples of known permittivities, simulation of probes operating in reflection and transmission modes.

- Familiarization with biological phenomena of interest and reflection on the relevant quantities to be extracted.

- Implementation of a measurement protocol and testing of the same.

- Manufacture and characterization of phantom tissue samples with variable properties.

- Writing of a national and/or international conference paper.

Year 2:

- Optimization, manufacture, and characterization of one or more probes based on the results obtained in the first year.
- Reliability testing of probes and measurement protocol for different phantom tissues.
- Analysis of desired properties for the flexible interface layer between the probe and the skin, search for solutions, and evaluation of their performance.
- Reflection on the ergonomics of the probe and improvement thereof.
- Writing of a journal article and international conference paper.

Year 3:

- Manufacture of optimized probes. Measurements on phantom tissues and volunteers.
- Writing of a journal article.
- Writing of the thesis.

Desired profile

Ideally, the candidate will have completed a master's degree or engineering training in the field of electronics and radio frequencies. He or she will be proficient in using electromagnetic simulation software and performing measurements using a VNA. A strong interest in applications related to living organisms (biological environment) would be an advantage.

Contact

Thesis supervisor: Patrick Poulichet - Email: patrick.poulichet@esiee.fr

Co-supervisor: Elodie Richalot – Email: elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr

Bibliographic references:

[1] [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.

[2] [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.

[3] PICHEREAU, Josephine, FRITISS, Zied, TAKHEDMIT, Hakim, *et al.* Sensing biological materials with differential RF broadband and resonating microsensors. In : *2023 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)*. IEEE, 2023. p. 65-70.

- [4] J. Pichereau, H. Takhedmit, U. Kuhl, O. Legrand, J. Leszczynski, S. Protat, P. Poulichet, O. Francais, E. Richalot "Extraction and Analysis of the Resonance Properties of a Differential SRR-based RF Sensor," 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Stockholm, Sweden, 2025, pp. 1-5, doi : 10.23919/Eu-CAP63536.2025.10999217.
- [5] 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.
- [6] Mohamed Zied Fritiss, Patrick Poulichet, Hakim Takhedmit, Laurent Lanquetin, Stephane Protat, et al.. 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](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ace9f1). [hal-04427245](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04427245)
- [7] Joséphine Dupeyron Masini, Frédérique Deshours, Georges Alquie, Rania Shahbaz, Sylvain Feruglio, Olivier Meyer, Dimitri Galayko, Hamid Kokabi et Jean-Michel Davaine. « Complementary Split-Ring Resonator for Non-Invasive Diagnosis of Carotid Artery Atherosclerosis : Towards Future In-Vivo Measurements ». In : *Innovation and Research in BioMedical engineering* 46.2 (avr. 2025), p. 100883. doi : 10.1016/j.irbm.2025.100883. url : <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-05187385>.
- [8] R. Schiavoni, A. Cataldo, G. Maietta, E. Filieri, et al., "Microwave Reflectometry Sensing System for Low-Cost in-vivo Skin Cancer Diagnostics," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13918-13928, 2023. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3243843.
- [9] K. Chand, P. Mehta, D. G. Beetner, R. Zoughi et W. V. Stoecker, "Microwave Reflectometry as a Novel Diagnostic Method for Detection of Skin Cancers," in *Proc. 22nd IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)*, Ottawa, ON, Canada, May 2005, pp. 1425-1428. DOI:10.1109/IMTC.2005.1604385.
- [10] P. Mehta, K. Chand, D. Narayanswamy, D. G. Beetner, R. Zoughi et W. V. Stoecker, "Microwave Reflectometry as a Novel Diagnostic Tool for Detection of Skin Cancers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, pp. 1309-1316, Aug. 2006. DOI:10.1109/TIM.2006.876566.
- [11] F. Töpfer, S. Dudorov et J. Oberhammer, "Micromachined Millimeter-Wave Near-Field Probe for Skin Cancer Diagnosis," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 6, pp. 2050-2059, Jun. 2015.
- [12] L. Beilina, A. Eriksson, N. Neittaanmäki, "Frequency Inversion Method and Device for Malignant Melanoma Detection Using RF/Microwaves," *arXiv*, Oct. 2024.