

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN SCIENCES, TECHNOLOGIES ET
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOC-
TORALE EN PHYSIQUE ET APPLICATIONS

B.P 812 Yaoundé

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCES,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSGRADUATE TRAINING
UNIT FOR PHYSICS AND APPLICATIONS

P.O 812 Yaoundé

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
LABORATOIRE D'ENERGIE, SYSTEMES ELECTRIQUES ET
ELECTRONIQUES

SPECIALITE: ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE ET
AUTOMATIQUE

**CONCEPTION D'UN MULTI-CAPTEUR MICRO-
ONDE IMPRIME POUR LES APPLICATIONS DE**
L'INTERNET-DES-OBJETS

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du MASTER 2 par:

KAMDEM FOKO Brice Chaltain

Matricule: 16F2687

Licencié en physique

Sous la supervision de:

ESSIMBI ZOBO Bernard

Professeur, Université de Yaoundé I

2024-2025



DEDICACE :

Je dédie ce travail de mémoire:

À mon père

FOKO Dieudonné

Et ma mère

MAKOGUE Antoinette

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire d'Energie, Systèmes Electriques et Electroniques, département de Physique de l'Université de Yaoundé I.

Je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements :

- Au Dieu Tout Puissant qui m'a accordé jusqu'ici le souffle de vie et la force nécessaire pour franchir les obstacles.
- Au Pr. ESSIMBI ZOBO Bernard, chef du laboratoire d'Electronique, Electrotechnique et Automatique pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de diriger ce travail.
- Au Dr. AYISSI EYEBE Guy François pour la codirection de ce travail. Merci pour ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité, ses remarques constructives, Son expérience et sa rigueur scientifique qui ont été décisives pour mener à bien ce travail de mémoire. Qu'il trouve, en ces modestes mots, l'expression de ma gratitude infinie.
- Aux membres du jury, pour m'avoir honoré à travers leur présence et aussi pour avoir accepté d'évaluer ce travail.
- Au corps enseignant du Département de Physique de la Faculté de Sciences, plus particulièrement au Pr NDJAKA Jean-Marie, chef du Département de Physique à l'Université de Yaoundé I ainsi qu'aux autres enseignants du laboratoire des systèmes électriques et électroniques : le Pr. EYEBE FOUDA Jean-Sire, le Pr. BIYA MOTTO Frédéric, le Pr BODO Bertrand et le Pr. MBINACK Clément pour leurs disponibilités, leurs conseils et encouragements tout au long des années d'enseignements.
- Au laboratoire de l'Université Québec Trois-Rivières.
- A Tous mes aînés académiques particulièrement à FONGOU TAGNY DYLAN LANDRY, MVUH FRANCK LINO et TCHATCHOUANG NJINMO LOIC. Qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance pour leurs amitiés.
- A Tous mes camarades de promotion et autres, plus particulièrement à BAYAOLA HINTOIN, MBARGA OKPWE MARC YVES MOUROUSI et NZONANG DARLY DANIELLA pour la sincère collaboration, la solidarité, et l'esprit d'équipe.
- À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail.
- A mon oncle papa TOKO DONATIEN et ma tante maman TOKO MIREILLE pour leur amour, leur soutien inconditionnels tout au long de mon parcours académique, qu'ils trouvent en ces modestes mots toutes ma gratitude.
- A ma sœur Sorelle et à mes frères Rostand et Olivier pour leur encouragement. Trouvez, dans ce mémoire, un témoignage vivant des jours lumineux en tout temps

TABLES DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	xiii
0.1 Contexte et situation du problème	xiii
0.2 Problématique, enjeux et défis techniques.....	xiii
0.3 Contribution escomptée	xiv
0.4 Objectifs.....	xiv
0.5 Méthodologie et plan du mémoire	xv
Chapitre 1. LES CAPTEURS MICRO-ONDES IMPRIMÉS.....	1
1.1 Généralités sur les capteurs micro-ondes.....	1
1.1.1 Définitions sur les capteurs.....	1
a) Capteur	1
b) Capteurs actifs, passifs	1
c) Performances de capteurs	2
d) Multi-capteur	3
1.1.2 Principes de détection micro-ondes	3
a) Comparaison entre le principe de détection en fréquence et en puissance	3
b) Variation en fréquence : cas du substrat sensible ; variation en puissance : cas du conducteur sensible	5
c) Comparaison entre domaine temporel et domaine fréquentiel.....	5
1.1.3 Capteurs micro-ondes et Internet-des-Objets.....	6
1.2 État de l'art des capteurs micro-ondes	6
1.2.1 Capteurs micro-ondes à lignes de transmission.....	6
1.2.2 Matériaux sensibles	10
a) Substrats sensibles	11
b) Gel sensibles	12
c) Conducteurs sensibles	13
1.2.3 Intégration fonctionnelle des capteurs micro-ondes	14

a) RFID	14
b) Antenne pour application sans fil	15
1.3 Généralités sur la technologie CPW.....	16
1.3.1 Introduction.....	16
1.3.2 Technologies CPW et substrat sensible	18
Chapitre 2. MATÉRELS ET MÉTHODES	21
2.1 Résonateurs cpw sur substrats différents	21
2.2 Test RF par analyseur de réseaux scalaire.....	27
2.2.1 Présentation de l'analyseur de réseaux scalaire	27
a) Principe et bloc fonctionnel de l'analyseur de réseaux scalaire	28
b) Eléments constitutifs du SNA	29
2.2.2 Mesure des paramètres S.....	31
a) Mesure du signal incident en tension(V_1).....	31
b) Mesure du signal réfléchi en tension (V_2)	32
c) Paramètre S_{11} à partir des mesures	33
2.2.3 Validation et discussion.....	34
2.3 Test des capteurs fabriqués.....	36
2.3.1 Approche de mesure multi-capteur.....	36
2.3.2 Tests d'humidité	37
a) Méthode avec sels saturés	37
b) Utilisation du capteur.....	38
2.3.3 Tests de température	39
a) Résistance chauffante.....	39
b) Utilisation du thermocouple	40
2.4 Conception et réalisation des circuits.....	44
2.4.1 Outils de conception	44
a) Logiciel de simulation HFSS	44
b) Logiciel de simulation ADS.....	45
c) Paramètre S	46
2.4.2 Technologies de fabrication.....	48
a) Substrats.....	48
b) Machine d'impression	49
c) Connecteur SMA	50

Chapitre 3.	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	52
3.1	Capteur d'humidité en technologie CPW.....	52
3.2	Capteur de température en technologie CPW	54
3.3	Multi-capteur en technologie CPW.....	56
CONCLUSION GÉNÉRALE		59
REFERENCES :		60

LISTE DES FIGURES

figure 1–1 : variation de la fréquence de résonance en simulation [1]	4
Figure 1–2 : Phase simulée du paramètre S_{21} [1]	4
Figure 1–3 : substrat sensibles	5
Figure 1–4 : conducteur sensible.....	5
Figure 1–5 : Propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau diélectrique [3]	7
Figure 1–6 : résonateur CPW imprimée [1].....	7
Figure 1–7 : La structure générale d'un résonateur intégré au substrat.[2]	8
Figure 1–8 : Le capteur intégré au substrat à base d'un résonateur SIW [2].....	9
Figure 1–9 : Approches de fonctionnalisation avec le résonateur CPW	10
Figure 1–10 : Implémentation du principe de substrat sensible [1]	11
Figure 1–11 : Implémentation du principe de feuille sensible [1]	12
Figure 1–12 : Implémentation du principe de gel sensible [1]	13
Figure 1–13 : Implémentation du principe d'encre sensible	13
Figure 1–14 : Schéma de principe du résonateur [7].....	15
Figure 1–15 : Intégration fonctionnelle du multi-résonateur en (a) pour RFID en (b)	15
figure 1–16 : illustration des capteurs sans fil (a) par encre sensible; (b) par substrat	16
Figure 1–17 : Géométrie de la ligne CPW [1].....	17
Figure 1–18 : ligne CPW pris en sandwich [1]	18
Figure 1–19 : lignes CPWG	19
figure 2–1 : résonateur conçu sous hfss	21
Figure 2–2 : structure du résonateur cpw.....	21
Figure 2–3 : Layout du résonateurs cpw.....	22
Figure 2–4 : résonateurs CPW sur substrat Duroid 5880 (couleur noir).....	23
Figure 2–5 : résonateurs CPW sur substrat FR4 (couleur jaunâtre).....	23
Figure 2–6 : résonateurs cpw sur ROGERS4835(couleur blanche)	23
Figure 2–7 : circuit RF utilisé pour les mesures.....	24
Figure 2–8 : superposition paramètre S_{11} (mesure/ simulation) du résonateur sur Duroid5880	25
Figure 2–9 : superposition paramètre S_{11} (mesure/ simulation) du résonateur sur Fr4.....	26
Figure 2–10 : superposition paramètre S_{11} (mesure/simulation) du résonateur sur RO4835.....	26
Figure 2–11 : 6204B - SNA 10MHz à 40GHz	28
Figure 2–12 : Schéma de principe du SNA.....	28
Figure 2–13 : Schéma bloc fonctionnel du SNA.....	28
Figure 2–14 : Oscillateur commandé en tension [24].....	30

Figure 2–15 : Schéma bloc fonctionnel utilisé pour la mesure du signal incident (V_1)	32
Figure 2–16 : Schéma bloc utilisé pour la mesure du signal réfléchi (V_2)	33
Figure 2–17: paramètre s_{11}	35
Figure 2–18: multi-capteur avec fr4 et kapton	36
Figure 2–19 : utilisation du capteur pour les test d'humidité	38
Figure 2–20 : montage test d'humidité	38
Figure 2–21 : Elitech GSP-6	39
Figure 2–22 : interface du logiciel Elitechlog	39
Figure 2–23: résistance chauffante PTCA – 40 ohms	40
Figure 2–24 : thermocouple de type K	41
figure 2–25 : correspondance tension - température	41
Figure 2–26 : utilisation du thermocouple	42
Figure 2–27 : contact direct entre capteur et résistance chauffante	43
Figure 2–28 : feuilles de cuivre entre capteur et résistance chauffante	43
figure 2–29 : circuit de test avec thermocouple	43
figure 2–30 : visualisation de interface hfss	44
Figure 2–31 : Interface d'ouverture du logiciel ADS	45
figure 2–32 : interface de linecalc	46
Figure 2–33 : Quadripôle ; a. jonction 2 ports, b. jonction 4 ports [8]	47
Figure 2–34 : Plaque de substrat FR4	49
Figure 2–35 : exemple de gravure sur la couche de cuivre d'un substrat	50
Figure 2–36 : LPKF ProtoMat S103	50
Figure 2–37 : connecteur SMA	51
Figure 2–38 : resonateur CPW avec connecteur SMA	51
figure 3–1 : banc de test d'humidité	52
Figure 3–2 : Variation du paramètre s_{11} avec le taux d'humidité	53
Figure 3–3 : variation de la fréquence de résonance en fonction de l'humidité	54
Figure 3–4 : Variation de température au cour du temps	55
Figure 3–5 : montage du banc de test de température du capteur	55
Figure 3–6 : Variation du paramètre S_{11} en module avec la température mesurée	56
Figure 3–7 : fréquence de résonance fonction de la température	56
Figure 3–8 : Montage banc de test multi-capteur	57
Figure 3–9 : Variation du paramètre S_{11} en module avec la température mesurée	58
Figure 3–10 : Variation de la fréquence de résonance du multi-capteur	58

LISTE DES TABLEAUX

tableau 1-1 : revue de littérature des capteurs environnementaux de type ligne de transmission	10
Tableau 2-1 : dimension de la ligne cpw.....	22
Tableau 2-2 : tableau de comparaison en fréquence (mesure/ simulation)	27
Tableau 2-3 : tableau de comparaison en fréquence (mesure Canada/Cameroun).....	27
Tableau 2-4 : fichier de mesure du paramètre s11.....	34
Tableau 2-5: comparaison	35
Tableau 2-6 : sels saturés utilisés	37
Tableau 2-7: caractéristique du PTCA – 40 ohms.....	40
Tableau 2-8: Caractéristique du substrat Rogers 4835.....	48
tableau 2-9 : caractéristique du substrat duroid 5880.....	49
Tableau 2-10 : Caractéristique du substrat FR4.....	49

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADS:	Advanced Design System
CPW:	Coplanar Waveguide
RF:	RadioFréquence
RFID:	Radio Frequency Identification
IoT:	Internet of Things
PCB:	Printed Circuit Board
PC :	Personal Computer
SAW :	Surface Acoustic Wave
CPW :	Guide d'ondes coplanaires
CPWG :	Guide d'ondes coplanaires avec masse
SIW :	Guide d'onde intégré au substrat
SNA :	Analyseur de réseaux scalaire
SMA :	SubMiniature version A
H ou RH% :	Pourcentage d 'humidité relative
T :	Température
S :	Sensibilité

UNITES

°C :	Degré Celsius
° :	Degré
Hz :	Hertz
%RH :	Humidité relative
m :	Mètre
S:	KHz/%RH
f_r :	GHz

RÉSUMÉ

Malgré les avancées des techniques d'impression, la prolifération de matériaux sensibles et les avantages technologiques offerts par les technologies sans fil, peu d'études ont été consacrées à l'impression de capteurs micro-ondes, et encore moins aux multi-capteurs micro-ondes. Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective, en explorant leur développement pour des applications de l'internet des objets (Internet of Things (IoT) en anglais). Ce travail vise à relever plusieurs défis technologiques. Il s'agit d'intégrer plusieurs matériaux sensibles et de gérer la sensibilité croisée liée à l'interdépendance des grandeurs électriques du capteur. Un autre enjeu concerne le traitement algorithmique permettant d'isoler chaque dynamique de détection dans le processus de mesure. Pour y répondre, nous avons adopté une approche basée sur les théories des lignes de transmission. Plus précisément, nous avons utilisé la technologie des guides d'ondes coplanaires (coplanar waveguide (CPW) technology en anglais) et les discontinuités. Cette méthode a permis de concevoir un circuit innovant exploitant des composants conducteurs et diélectriques pour assurer une multi-détection efficace. Pour cela, le logiciel de conception hyperfréquences HFSS a été utilisé. Dans un premier temps, un capteur radiofréquence, basé sur un résonateur à ligne de transmission coplanaire, a été modélisé. Cette modélisation repose sur la théorie des micro-ondes, les notions de capteurs et la maîtrise du logiciel. Ensuite, le capteur a été fabriqué par impression par gravure mécanique. Enfin, il a été soumis à des tests d'humidité et de température pour valider le concept. Pour cette dernière étape, des sels saturés et une résistance chauffante ont été utilisés.

Mots clés : Capteur micro-onde, internet des objets, multi-détection, technologie sans fil, multi-capteur, résonateur sensible

ABSTRACT

Despite advancements in printing techniques, the proliferation of sensitive materials, and the technological advantages offered by wireless technologies, few studies have focused on the printing of microwave sensors, and even fewer on multi-microwave sensors. This thesis is positioned within this perspective, exploring their development for Internet of Things (IoT) applications. The work aims to address several technological challenges, including the integration of multiple sensitive materials and managing cross-sensitivity related to the interdependence of the sensor's electrical parameters. Another challenge concerns the algorithmic processing required to isolate each detection dynamic in the measurement process. To address this, we adopted an approach based on transmission line theories. More specifically, we used coplanar waveguide (CPW) technology and discontinuities. This method allowed us to design an innovative circuit that utilizes conductive and dielectric components to ensure efficient multi-detection. For this purpose, the HFSS microwave design software was used. Initially, a radiofrequency sensor based on a coplanar transmission line resonator was modeled. This modeling is based on microwave theory, sensor concepts, and proficiency in the software. Then, the sensor was manufactured using mechanical engraving printing. Finally, it was subjected to humidity and temperature tests to validate the concept. For this final step, saturated salts and a heating resistor were used.

Key words: Microwave sensor, Internet of Things (IoT), Multi-detection, Wireless technology, multi-sensor, sensitive resonator

INTRODUCTION GENERALE

0.1 Contexte et situation du problème

De nos jours, grâce à un prototypage rapide, un potentiel de production de masse et une efficacité démontrés à la valorisation de divers matériaux pour la détection, les technologies d'impressions représentent une solution attractive et peu coûteuse, pour l'implémentation des fonctions de détection environnementale et de communication sans fil faisant ainsi évoluer par conséquent des plateformes technologiques tels que l'internet des objets et les télécommunications tel que les capteurs.

Ils existent de nombreux domaines dont leur évolution dépend de l'information sur un paramètre environnemental, pour cela plusieurs technologies de capteur ont été développées. Cependant la plupart de ces technologies permettent juste de capter un seul paramètre environnemental, or le contrôle simultané de plusieurs paramètres environnementaux contribue encore plus à l'évolution de ces applications de l'internet des objets. Concevoir un capteur capable de réaliser une multi-détection est une tâche qui s'avère difficile pour les laboratoires et universités des pays en développement notamment au Cameroun à Yaoundé 1 ont un accès limité aux outils et aux ressources nécessaires pour pouvoir passer d'un capteur à un multi-capteur imprimé en utilisant une des techniques d'impressions.

0.2 Problématique, enjeux et défis techniques

Quoique de nombreuses travaux quant aux techniques d'impression, aux principes de détection et aux matériaux de fonctionnalisation aient été présentés, les capteurs micro-ondes imprimés et passifs en particulier, n'ont pas encore été abordés, en occurrence la conception de multi-capteur micro-ondes imprimé pour être déployés dans de nombreux applications de l'internet des objets. Ainsi, les défis se situent au niveau de :

- **L'intégration technologique** permettant d'intégrer plusieurs matériaux sensibles.
- **La sensibilité croisée** étant donné l'interdépendance des grandeurs électriques liées au fonctionnement du capteur.
- **Les approches de traitement algorithmique** isolant chacune des dynamiques de détection dans le processus de mesure.

- **Coût de production** : La production doit être peu coûteuse pour être largement déployée, ceci en sélectionnant des composants électroniques abordables et fiables, tout en minimisant le coût d'assemblage et de maintenance.

0.3 Contribution escomptée

La contribution escomptée des travaux dans le cadre de ce mémoire est la réalisation au sein du laboratoire d'énergie et systèmes électriques et électroniques de l'université de Yaoundé I, d'un multi-capteur micro-onde imprimé pour les applications de l'internet des objets. Il sera question de s'appuyer sur les théories des lignes de transmission en technologie des guides d'ondes coplanaire (CPW) et des discontinuités pour proposer un circuit innovant mettant à contribution les composants conductrices et substrat diélectrique pour réaliser la multi-détection ensuite d'utiliser comme technique d'impression pour la réalisation du prototype, la gravure mécanique, étant donné que l'université a en sa disposition une machine rendant possible cette impression en son sein.

0.4 Objectifs

Ce mémoire poursuit quatre (4) objectifs principaux développés ci-dessous :

- **Maitrise des connaissances théoriques relative au mémoire**

Afin de pouvoir rédiger ce mémoire, acquérir des connaissances théoriques sur les micro-ondes, aux notions de capteurs, ainsi qu'aux techniques d'impression s'avère nécessaire.

- **Maitrise des compétences numériques sur les logiciels de modélisation**

La prise en main du logiciel HFSS permettant par la suite une modélisation numérique de la structure du capteur imprimé du point de vue fonctionnel et l'émulation de la variation des paramètres ambiants. Elle inclut l'étude des configurations de capteurs, l'optimisation des paramètres pour la fabrication, et la conception d'un algorithme de détection avec différenciation des grandeurs mesurées par chaque composante du multi-capteur.

- **Conception du capteur CPW Conformément à la contribution envisagée**

Elle consiste à proposer une structure du capteur dont la fréquence de résonance varie en fonction du substrat à l'aide du logiciel de simulation numérique HFSS.

➤ **Validation du capteur CPW**

Il s'agit de fabriquer le multi-capteur et faire un montage du banc de test ensuite de placer le multi-capteur sous tests, en faisant varier minimalement l'humidité et la température pour la preuve de concept. Ici, il s'agit de voir si son paramètre S varie en fonction de l'humidité et température.

0.5 Méthodologie et plan du mémoire

Comme méthodologie, pour mener à bien ce travail, il y a des étapes à suivre tel que :

➤ **S'imprégner des concepts théoriques relative au mémoire**

Tel que théories électromagnétiques, techniques d'impression, logiciels et outils informatique, capteurs imprimé en technologie CPW

➤ **Modéliser et simuler le capteur dans HFSS**

Elle consiste à proposer une structure du capteur dont la fréquence de résonance varie en fonction du substrat diélectrique ou de la permittivité effective à l'aide du logiciel de simulation numérique HFSS. Elle permet l'étude des configurations de capteurs, l'optimisation des paramètres pour la fabrication, et la conception d'un algorithme de détection avec différenciation des grandeurs mesurées par chaque composante du multi-capteur.

➤ **Imprimer par gravure mécanique**

Il s'agit de fabriquer le capteur enlevant du cuivre sur un substrat diélectrique par gravure mécanique.

➤ **Test du multi-capteur à l'aide du banc de test réalisé**

Il s'agit de placer le multi-capteur sous test en humidité et température variable et mesurer le paramètre S pour conclure qu'il y a détection et sensibilité croisée.

Comme Plan du mémoire, le présent travail est organisé comme suit :

- Le chapitre (1) présente les Généralités sur les capteurs micro-ondes suivie de leur état de l'art, et

enfin les généralités sur la technologie guide d'onde coplanaire (CPW).

- Le chapitre (2) présente la méthode et le matériel utilisés dans le cadre des travaux de recherche.
- Le chapitre (3) présente les résultats des simulations numériques et des tests expérimentaux, suivie d'une discussion.

Le mémoire se termine par une conclusion, la quelle résume la contribution principale et présente une discussion sur les travaux futurs à mener afin d'améliorer les résultats obtenus.

Chapitre 1. LES CAPTEURS MICRO-ONDES IMPRIMÉS

1.1 Généralités sur les capteurs micro-ondes

1.1.1 Définitions sur les capteurs

a) Capteur

Le capteur est le premier élément d'une chaîne de mesure. Sa fonction principale est de convertir une grandeur physique, objet de la mesure que l'on nomme le mesurande (m), en une autre grandeur, généralement électrique (S). La grandeur ainsi transformée, doit être utilisable directement par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié. Le capteur est donc le dispositif physique qui, soumis à l'action du mesurande, non électrique, produit la fonction F électrique tel que : $S = F(m)$. [7]

b) Capteurs actifs, passifs

➤ Les capteurs actifs

Généralement, un capteur actif est un système de mesure qui nécessite une source d'énergie embarquée, la plupart du temps assurée par une batterie, et ce pour la réalisation de la phase de traitement au cours de laquelle le signal est filtré (nettoyé), amplifié et converti dans un format compatible et exploitable. Le capteur actif doit non seulement mesurer des propriétés physiques mais doit également effectuer des tâches additionnelles au travers des circuits de traitement et de communication intégrés. Ce type de capteur est surtout utilisé pour assurer des mesures continues en temps réel.

➤ Les capteurs passifs

Ce sont des dispositifs qui ne possèdent pas de source d'énergie embarquée et présentent l'avantage d'être facilement intégrables. Ils sont constitués d'un élément sensible couplé à une antenne imprimée. Ce type de capteur est utilisé dans des applications spécifiques (surveillance environnementale, des instruments de suivis spatial et aéronautique, des applications liées à la santé) qui nécessitent des unités de mesure miniatures, Adaptation d'impédance d'une antenne et d'un transducteur en technologie coplanaire imprimés sur des substrats de permittivités différentes pour la conception des capteurs micro-ondes passifs, passives et de grande précision. Ils sont notamment très indiqués pour la mesure à distance des grandeurs physiques dans les milieux hostiles ou contraignants. Deux technologies peuvent être utilisées pour la transmission de données pour les

capteurs passifs : la transmission inductive et la transmission radio basée sur la réflexion (transpondeur passif).

c) Performances de capteurs

Un bon capteur doit englober plusieurs critères et caractéristiques comme la sensibilité, sélectivité, linéarité, la plage dynamique, temps de réponse et temps de récupération, la répétabilité.

➤ Sensibilité

La sensibilité d'un capteur est caractérisée par sa capacité à détecter la plus petite variation de la grandeur mesurée. La sensibilité du capteur est donnée par l'équation suivante :

$$S = \frac{R_s - R_{air}}{R_{air}} * 100$$

Où S représente la sensibilité du capteur, et R_s , et R_{air} représente la résistance en ohms (Ω) du capteur exposé à l'humidité et à l'air sec respectivement.

On estime qu'un capteur est sensible à une grandeur physique si une petite variation de cette grandeur enchaîne une considérable variation du signal de sortie.

➤ Sélectivité

On dit qu'un capteur est sélectif si ce dernier est capable de détecter une seule espèce en présence de plusieurs d'autres éléments, mais ce but est généralement difficile à atteindre. La sélectivité reste le facteur le plus dur à obtenir dans les capteurs, c'est pour cette raison qu'un capteur est sélectif s'il est capable de répondre de façon plus distincte et privilégiée à une espèce parmi d'autres et si sa sélectivité n'est pas affectée par ces derniers. [7]

➤ Plage dynamique

La plage dynamique est l'intervalle de stimulus sur lequel un capteur est capable de mesurer les variations du paramètre environnemental ciblé. Sa mesure est limitée par l'environnement (milieux humides ou milieux secs), les contraintes de test (capacité des bancs de test à générer des taux d'humidité de 0 %RH à 100 %RH par exemple), ou les limitations inhérentes aux matériaux utilisés. Les matériaux à semi-conducteurs auront par exemple une plage dynamique de température limitée à 125 °C dans le cas du silicium ou 250 °C dans le cas du carbure de silicium [76]. Plus la plage dynamique est grande, plus le capteur pourra couvrir une large gamme d'applications. [1]

➤ Linéarité

On parle de linéarité si la courbe d'étalonnage est assez proche d'une ligne droite qu'on désigne souvent comme étant la meilleure droite. Cette dernière est caractérisée par un coefficient de corrélation R qui doit être égal ou proche de 1 ($R=1$). L'étalonnage effectué doit pouvoir contenir les mesures les plus basses et les plus élevées. Pour pouvoir constituer une relation entre la grandeur mesurée et la grandeur physique de chaque constituant et capteur, il doit y avoir un nombre de points suffisant - de six points au minimum - pour établir une réponse continue et reproductible et donc si la sensibilité est la même sur toute la plage d'utilisation du capteur on dit que le capteur est linéaire.

➤ Temps de réponse et temps de récupération

Le temps de réponse est la durée que met le capteur à détecter l'échantillon mesuré. Lors de son premier contact avec l'échantillon, le système du capteur est perturbé ce qui conduit à une variation du signal et le temps de réponse correspond alors au temps de stabilisation du capteur et du système de mesures. Cette variation suit généralement une loi plus ou moins exponentielle avec le temps. C'est pour cette raison que le temps de réponse est généralement pris entre 10 et 90 % de la valeur stabilisée. Quant au temps de récupération celui-ci est caractérisé comme étant le temps mis par le capteur pour revenir à l'état initial une fois l'échantillon disparu, celui-ci est quantifié à 90 % de désorption. [7]

d) Multi-capteur

Puisque ce travail concerne les capteurs micro-ondes dans le domaine de la détection environnementale, un multi-capteur peut être défini comme un dispositif capable de soit :

Détecter simultanément plusieurs paramètres environnementaux tel que la température et l'humidité ce qui montre principalement une bonne sélectivité en combinant un ou plusieurs circuits diélectriques.

Détecter un paramètre environnemental avec une très grande précision en utilisant deux ou plusieurs substrats diélectrique sensibles à ce paramètre.

1.1.2 Principes de détection micro-ondes

Le principal défi ici c'est de trouver un mécanisme assurant la transduction des paramètres électriques aux paramètres micro-ondes

a) Comparaison entre le principe de détection en fréquence et en puissance

Les paramètres environnementaux sont détectés par des capteurs micro-ondes soit :

- Par la variation de la fréquence de résonances du capteur micro-onde, en raison de sa sensibilité à la variation d'un ou plusieurs paramètres environnants comme illustré à la figure 1-1.

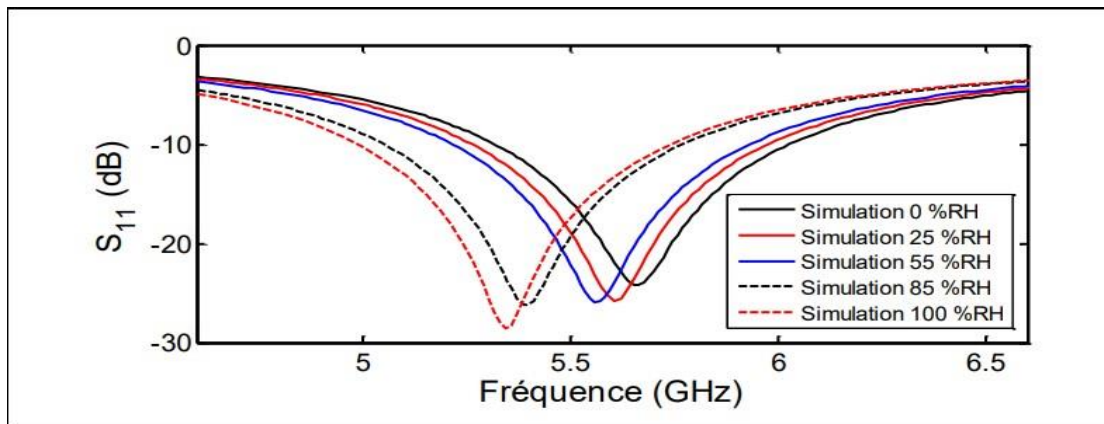


FIGURE 1-1 : VARIATION DE LA FRÉQUENCE DE RÉSONANCE EN SIMULATION [1]

- Par la variation de la Phase du paramètre S_{11} en puissance du capteur micro-onde, en raison de sa sensibilité à la variation d'un ou plusieurs paramètres environnants comme illustré à la Figure 1-2.

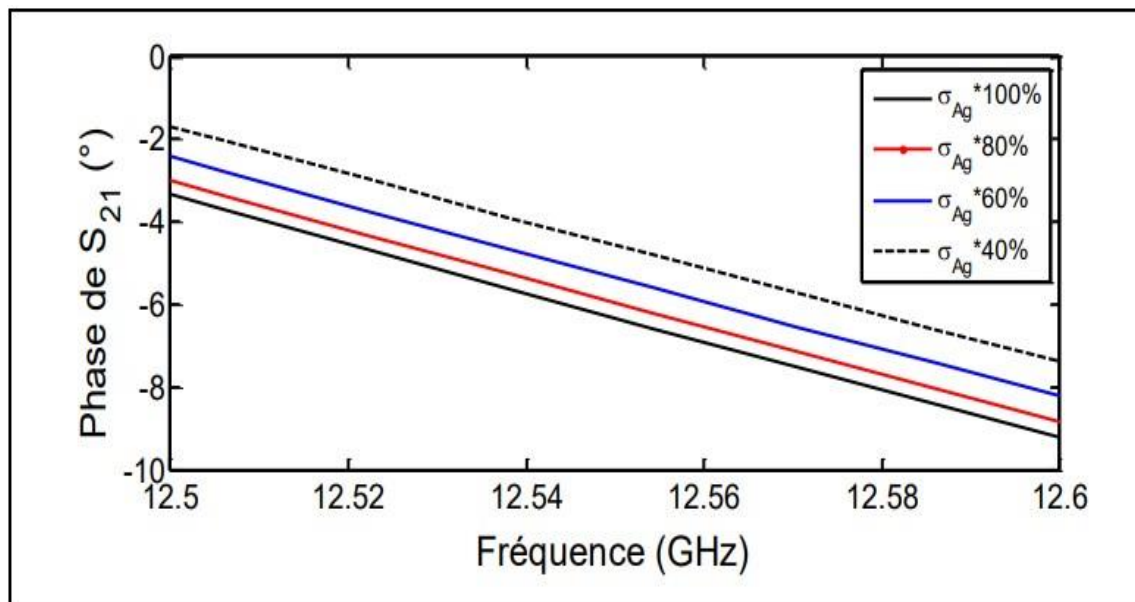


Figure 1-2 : Phase simulée du paramètre S_{21} [1]

b) Variation en fréquence : cas du substrat sensible ; variation en puissance : cas du conducteur sensible

L'utilisation d'un substrat sensible à un paramètre environnementale pour la détection micro-onde comme illustré à la Figure 1-3 permet une variation en fréquence ce qui se traduit par un décalage des fréquences coupe-bande au niveau du paramètre S_{11} ou S_{21} (coefficient de transmission) de la ligne de transmission utilisé comme illustré à la figure 1-1.

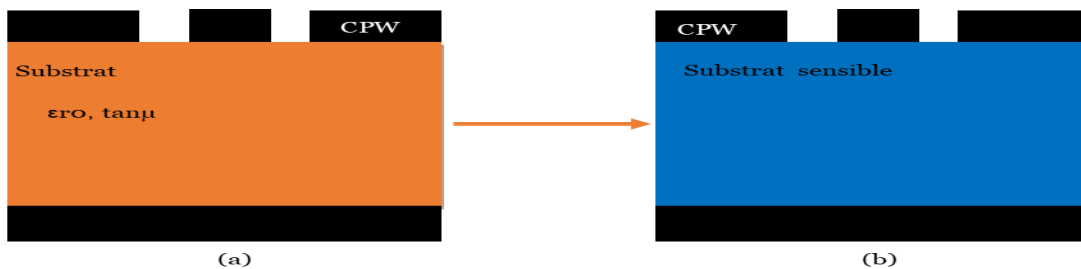


Figure 1-3 : substrat sensibles

L'utilisation d'un encre conducteur sensible à un paramètre environnementale pour la détection micro-onde comme illustré à la Figure 1-4 permet une variation de la puissance ce qui se traduit par la variation de phase du paramètre S_{11} (coefficient de transmission) de la ligne de transmission utilisé comme illustré à la Figure 1-2 qui montre l'encre conducteur de couleur rouge sur la figure 1-4-b.

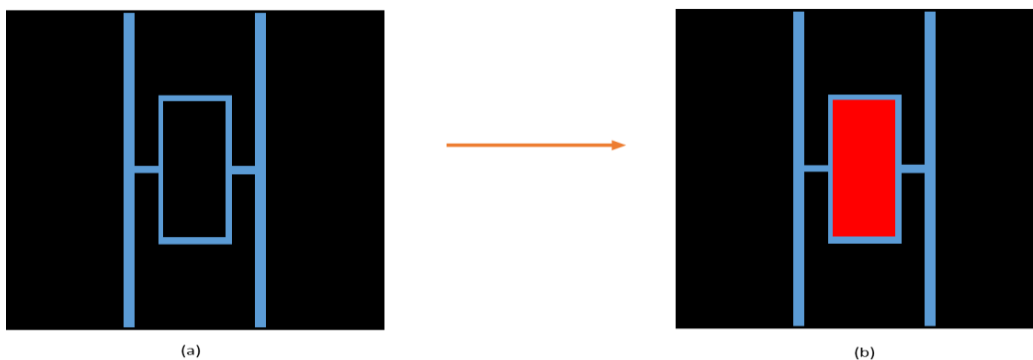


Figure 1-4 : conducteur sensible

c) Comparaison entre domaine temporel et domaine fréquentiel

Le principe de détection micro-onde dans le domaine temporel repose sur l'analyse de la forme d'onde du signal réfléchi par l'objet ou le milieu étudié. En effet l'analyse porte d'abord la mesure du temps que met le signal pour parcourir la distance entre le capteur et l'objet et revenir. Cela permet de déterminer la distance. Ensuite sur la forme sur signal réfléchi, les changements de forme, de durée ou d'amplitude peuvent révéler des informations sur les propriétés du milieu traversé. [5]

1.1.3 Capteurs micro-ondes et Internet-des-Objets

L'Internet des objets (IoT) fait référence à un réseau où divers appareils, et les machines sont interconnectées et capables de communiquer et d'échanger des données. Les capteurs jouent un rôle essentiel en tant que composants essentiels dans les systèmes électroniques qui s'engagent et interagissent avec le monde physique. Ils convertissent les phénomènes du monde réel en signaux électriques mesurables, ce qui les rend indispensables pour une large gamme d'applications. [5]

❖ Capteurs IoT : détecteur sans fil.

Un capteur IoT est un appareil conçu pour identifier ou quantifier des propriétés physiques, y compris la température, pression, lumière, sonner, ou mouvement. Pour ce faire, il transforme ces quantités physiques en signaux électriques ou autres qui peuvent être interprétés et traités par des systèmes informatiques ou d'autres appareils électroniques. Les capteurs trouvent des applications dans de nombreux domaines, tels que les systèmes de contrôle industriels, recherche scientifique, électronique grand public, et dispositifs médicaux. Il existe de nombreux types de capteurs à micro-onde tel que :

Capteurs de température : ce capteur sert à mesurer les variations de température dans une pièce ou un environnements en utilisant des matériaux diélectriques sensibles à ce paramètre.

Capteurs d'humidité: ce capteur sert à mesurer les variations du taux d'humidité, ou les niveaux d'humidité présents dans l'air ambiant à partir des matériaux diélectriques sensibles à ce paramètre.

Capteurs de gaz : ils sont conçus pour détecter et quantifier la présence et la concentration de gaz spécifiques dans le milieu environnant. En utilisant le même principe que les capteurs ci-dessus.

1.2 État de l'art des capteurs micro-ondes

1.2.1 Capteurs micro-ondes à lignes de transmission

Depuis peu, l'intégration des technologies à micro-ondes dans la réalisation de capteurs a connu une ascension fulgurante dans de nombreux domaines d'activités économiques particulièrement celui de l'environnement. Ainsi, dans l'optique de bien situer nos travaux de réalisation de capteurs micro-ondes environnementaux, il est important d'avoir au préalable une vue d'ensemble de ce qui se fait en matière de détecteurs micro-ondes dans ce domaine. Ainsi, cette section dresse un état de l'art des réalisations des différentes technologies de capteurs environnementaux micro-ondes lors de cette dernière décennie en se focalisant principalement sur les capteurs micro-ondes à lignes de

transmission [1].

❖ Capteur CPW, SIW, SAW

Une ligne de transmission est une structure permettant de confiner et contrôler la propagation d'un signal ou une onde électromagnétique au sein d'un canal de propagation. Le canal de propagation est pour la plupart du temps, un milieu physique dépourvu de charges électriques (le diélectrique) et favorisant la transmission du signal électromagnétique d'un point X_1 à un point X_2 [3]. La Figure 1–5 illustre la propagation d'une onde électromagnétique dans une structure diélectrique.

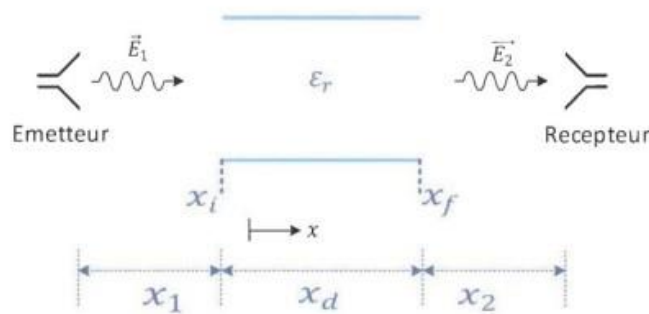


Figure 1–5 : Propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau diélectrique [3]

Comme capteur micro-ondes à lignes de transmission, il existe :

➤ Capteur CPW

Il est conçu à partir d'un résonateur CPW imprimé sur un substrat diélectrique en ajoutant des fentes sur la trace centrale d'une ligne de transmission coplanaire comme illustré à la Figure 1–6.

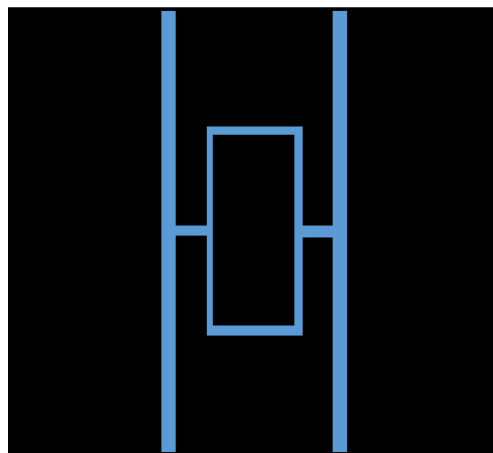


Figure 1–6 : résonateur CPW imprimée [1]

Pour être utilisé comme capteur ce résonateur doit être fonctionnalisé de manière à lui permettre de changer son comportement (fréquence de résonance) en présence d'une grandeur physique à détecter. Pour ce faire, il doit être imprimé sur un matériaux ou substrat diélectrique sensible à la présence d'un ou plusieurs paramètres environnementaux tel que la température et l'humidité, le Kapton et le FR4 sont des exemples de substrats sensibles à l'humidité et à la température.

➤ Capteur SIW

Il est conçu à partir d'un résonateur intégré au substrat construit à partir d'un guide d'ondes rectangulaire présenté à la Figure 1-7 en fixant des conditions limites favorisant la résonance.

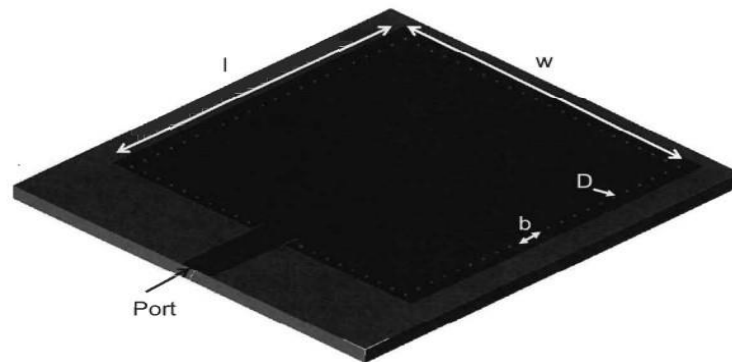


Figure 1-7 : La structure générale d'un résonateur intégré au substrat.[2]

Pour faire de ce dispositif un capteur, il doit également être fonctionnalisé de manière à lui permettre de changer son comportement (fréquence de résonance) en présence d'une grandeur physique à détecter. Pour ce faire, des régions vides sont introduites à l'intérieur de la cavité résonante SIW. Ces régions sont ensuite remplies d'un matériau diélectrique sensible à la présence d'un paramètre environnemental [2]. Ceci est illustré à la figure

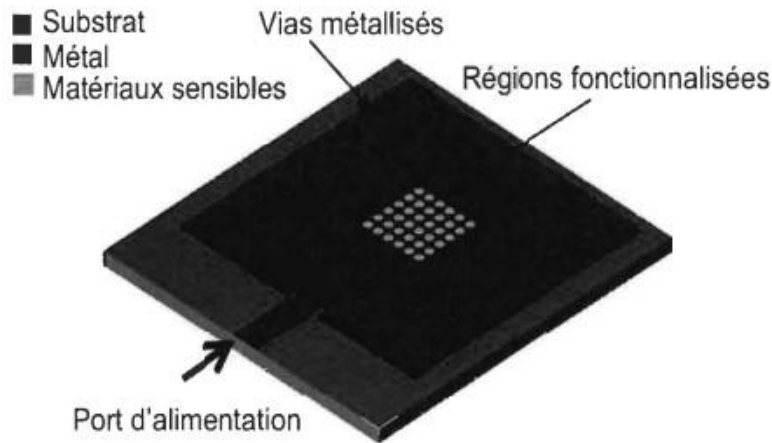


Figure 1–8 : Le capteur intégré au substrat à base d'un résonateur SIW [2]

➤ Les capteurs SAW

Au début des années 1980, de nouveaux types de capteurs passifs ont été étudiés en utilisant des composants à ondes acoustiques de surface (SAW). Le principe de fonctionnement est le suivant : une onde électromagnétique (signal provenant d'un lecteur RF), transmise par l'antenne d'un système d'émission-réception, est reçue par l'antenne du transducteur SAW passif. Ensuite, cette onde est transformée en une onde acoustique de surface via un transducteur interdigité (IDT) placé sur un substrat piézo-électrique connecté à l'antenne. La propagation de cette onde acoustique peut être modifiée par les conditions environnementales (température, contrainte, gaz, ...) ou en chargeant la ligne SAW avec un capteur utilisé comme une impédance variable. Les ondes acoustiques générées subissent une réflexion au sein du composant avant d'être reconverties en ondes électromagnétiques et retransmises à l'unité d'émission-réception. En effet, vu qu'on a un phénomène linéaire, les ondes acoustiques génèrent une distribution de charge électrique au sein de l'IDT et on obtient un signal RF en sortie. L'analyse de l'onde électromagnétique réfléchie par le capteur permet d'obtenir une information sur la grandeur qui a modifié la propagation de l'onde acoustique. La fréquence (électromagnétique et acoustique) de fonctionnement du capteur est fixée¹ par le pas des électrodes inter-digitées. Typiquement un pas de $5\mu\text{m}$ ($0,5\mu\text{m}$) permet d'obtenir une fréquence de l'ordre de 300MHz (3GHz). La distance d'interrogation pour ce genre de dispositif est de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Bien d'autre capteur micro-ondes à ligne de transmission déjà conçu sont présenté dans le tableau

ci-dessous :

TABEAU 1-1 : REVUE DE LITTÉRATURE DES CAPTEURS ENVIRONNEMENTAUX DE TYPE LIGNE DE TRANSMISSION

Année	Auteurs	Structure	Technique de fabrication	Paramètre environnemental
2007	M. Dragoman et al	Guide d'ondes coplanaire CPW	Micro-Fabrication	Gaz
2009	R Rimeika et al	Ligne à délai SAW	Micro-Fabrication	Humidité
2011	G. Barochi et al	Transducteur micro-ondes	Printed Circuit Board (PCB)	Gaz
2012	R. Nair et al	Ligne microruban	Printed Circuit Board (PCB)	Humidité
2014	S Balashov et al	Ligne à délai SAW	Micro-Fabrication	Humidité
2014	Y J, Lee et al	Ligne microruban	Printed Circuit Board (PCB)	Gaz
2014	K. Stroganov et al	Ligne à délai SAW	Micro-Fabrication	Température
2015	N. Meyne Née Haase et al	Guide d'ondes coplanaire CPW	Micro-Fabrication	Humidité
2015	F. J. Herraiz-Martinez et al	Ligne à délai MIW	Printed Circuit Board (PCB)	Température
2016	M. D'Asaroei al	Ligne à diélectrique déformable	Printed molding techniques	Pression
2016	J. Yao et al	Ligne microruban	Printed Circuit Board (PCB)	Température
2016	S. Manatrinnon et al	Ligne coaxiale	Micro-Fabrication	Humidité
2016	S. Sikarwar et al	Transmission laser optique	Micro-Fabrication	Humidité
2016	S. Subbaraj et al	EBG ligne microruban	Printed Circuit Board (PCB)	Humidité
2017	H. Sun et al	Ligne à Fibre optique	Micro-Fabrication	Température

1.2.2 Matériaux sensibles

Ce mémoire porte sur la réalisation d'un capteur micro-onde et ce à partir d'un résonateur CPW. Cette section présente les matériaux pouvant être utilisés pour y arriver.

La Figure 1–9 schématise l'implémentation des différents matériaux utilisés pour la détection environnementale.

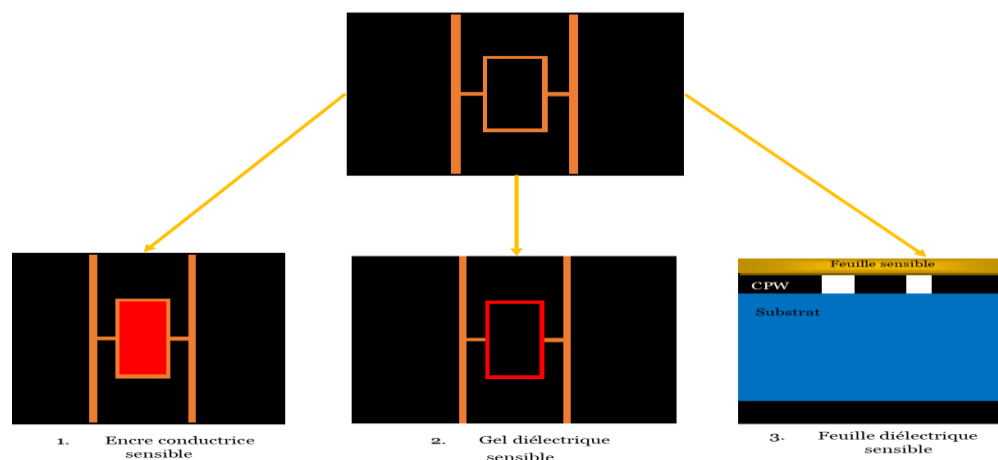


Figure 1–9 : Approches de fonctionnalisation avec le résonateur CPW

En se basant sur la Figure 1–9, les principes de détection s'appuient sur l'interaction de feuilles diélectriques sensibles, de conducteurs sensibles ou de gels diélectriques sensibles. Adaptés à la géométrie singulière du résonateur, ils favorisent l'utilisation de matériaux aux propriétés diverses [1].

La détection par feuille diélectrique sensible s'appuie sur la variation de ses propriétés diélectriques avec le paramètre environnemental ciblé. Deux approches d'implémentation sont envisageables : l'utilisation d'un substrat sensible ou le dépôt d'une feuille diélectrique sur le résonateur CPW.

a) Substrats sensibles

L'approche d'implémentation par substrat sensible est illustrée par l'image à la Figure 1–10. La nature du substrat sensible détermine la fonction de détection réalisée. L'utilisation d'un substrat hydrophile, par exemple, transformerait le résonateur en capteur d'humidité, tandis qu'un substrat thermoplastique le transformerait en capteur de température. Cette sensibilité permet les variations de permittivité du substrat dues à l'interaction avec le paramètre environnemental, et d'autre part le changement de dimensions qui l'accompagne soit par le gonflement des matériaux hydrophiles, ou par l'expansion thermique des substrats thermosensibles. L'équation (1.3) reprise ici traduit ce principe de façon claire :

$$\varepsilon_{eff1} = 1 + q_1(\varepsilon_{r1} - 1) \quad 1-1$$

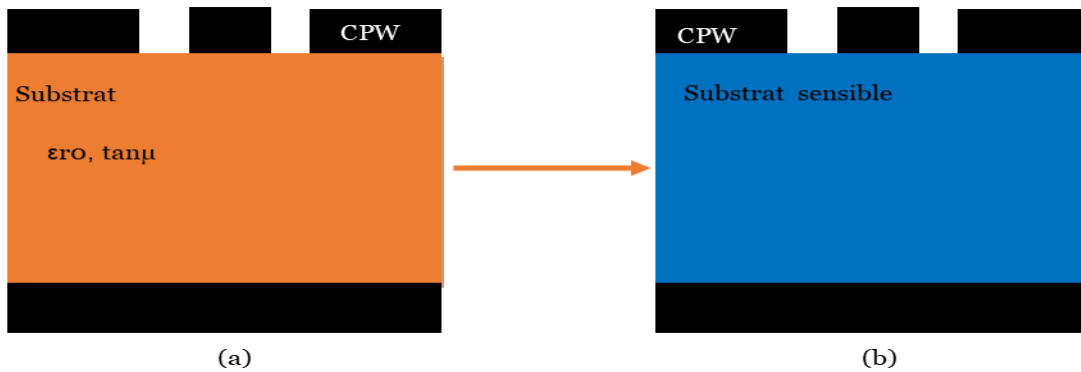


Figure 1–10 : Implémentation du principe de substrat sensible [1]

La permittivité et les dimensions du substrat influencent la permittivité effective de la ligne respectivement par les paramètres ε_{r1} et q_1 . À travers l'équation (1.4), cette variation est reportée sur

l'impédance caractéristique. Le comportement des ondes EM est ainsi affecté par le changement environnemental et mesurable par les paramètres S .

$$Z_{01} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff1}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad 1-2$$

L'approche d'implémentation par feuille diélectrique sensible est illustrée par l'image à la Figure 1–11

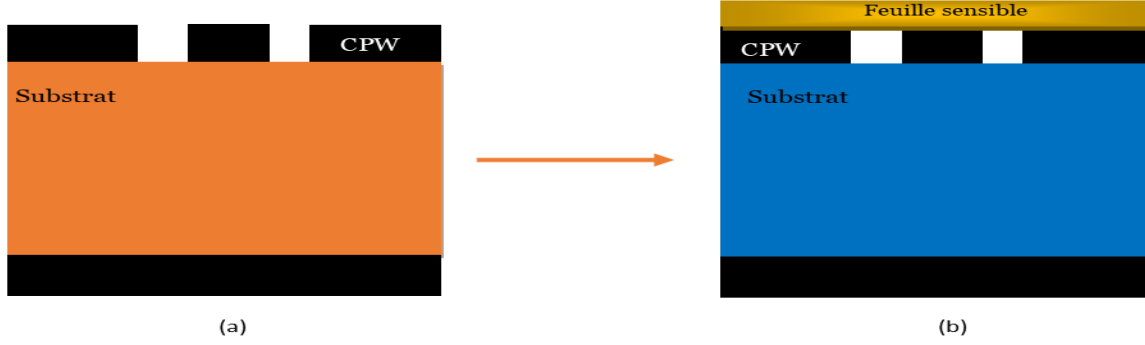


Figure 1–11 : Implémentation du principe de feuille sensible [1]

L'équation (1.3) reprise ci-dessous illustre l'influence de la feuille diélectrique sur les paramètres diélectriques.

$$\epsilon_{eff1} = 1 + q_1(\epsilon_{r1} - 1) + q_2(\epsilon_{r2} - 1) \quad 1-3$$

La variation des paramètres diélectriques et/ou des dimensions du substrat induit une variation de la permittivité effective (à travers ϵ_{r2} et q_2) et par suite, une variation de l'impédance caractéristique avec le paramètre environnemental. De même que pour le substrat sensible, les variations environnementales sont converties en variations des paramètres S .

b) Gel sensibles

La fonctionnalisation par gel sensible est illustrée par l'image à la Figure 1–12. L'approche de fonctionnalisation par gel diélectrique s'appuie sur le principe selon lequel la permittivité relative du gap entre la ligne CPW et le rectangle central influence la fréquence de résonance de la structure de la Figure 1–12. L'intégration d'un gel sensible dans les fentes vient modifier l'état diélectrique de la structure en fonction de la permittivité du gel. Cette variation est transposée aux paramètres micro-ondes par l'interTapez une équation ici.relation entre les capacités (C_{1a} , C_{1b}) modélisant cette région et l'impédance caractéristique (Z_0), donnée par l'équation (1.4) [1].

$$X_1 = \frac{1}{wC_{1a,b} * Z_0} \quad 1-4$$

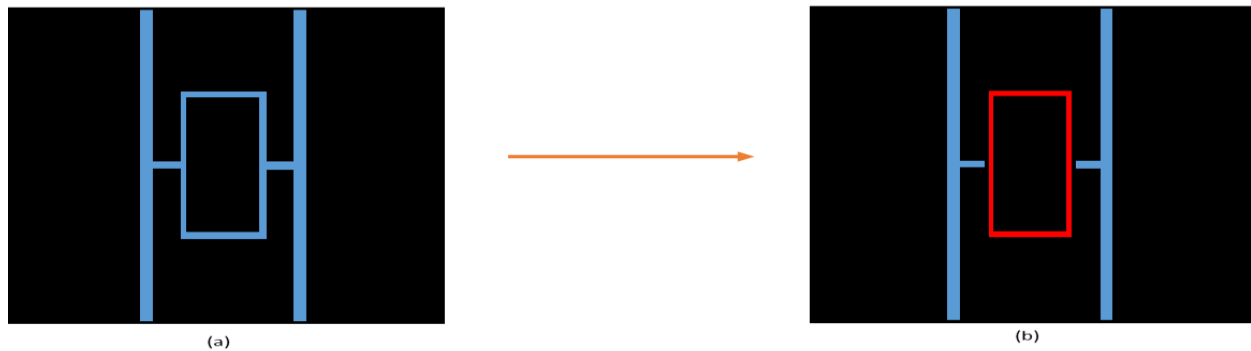


Figure 1-12 : Implémentation du principe de gel sensible [1]

La nature du gel détermine alors la typologie du capteur. Le dépôt d'un gel hydrophile par exemple viendra modifier la fréquence de résonance en fonction de l'humidité et en fera un capteur d'humidité. Cette approche est adaptée aux techniques d'impression où le dépôt de diélectriques à travers plusieurs techniques est totalement maîtrisé. De plus, la minceur des couches conductrices et des diélectriques contribuera à renforcer l'effet capacitif à l'origine du principe de fonctionnalisation.

c) Conducteurs sensibles

L'approche d'implémentation par encre conductrice sensible est illustrée par l'image à la Figure 1-13

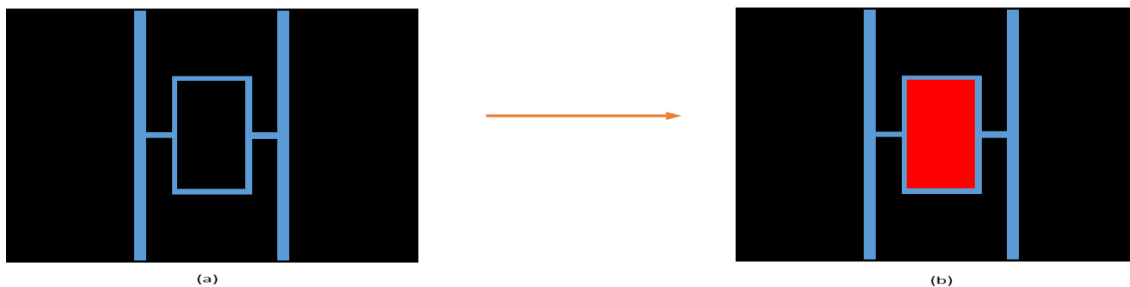


Figure 1-13 : Implémentation du principe d'encre sensible

La fonctionnalisation par encre sensible est réalisée selon le principe par lequel l'onde EM parcourant le circuit sera ralentie ou accélérée par la conductivité électrique du rectangle central. La vitesse de phase est donnée par (1-5) où f est la fréquence de l'onde et γ est sa longueur d'onde.

$$V_p = f * \gamma \quad 1-5$$

À fréquence constante, le ralentissement ou l'accélération de l'onde EM crée une modification de la période spatiale γ mesurable par la phase des paramètres S . Elle s'accompagne également d'un changement d'impédance. En effet, la valeur de la résistance de la trace R_1 est donnée à l'équation (1-

6), où σ est la conductivité et μ_0 , la perméabilité magnétique du vide [72] :

$$R_1 = \sqrt{\pi f \mu_0} \quad 1-6$$

La variation de conductivité induit une variation de la résistance électrique, qui modifie à son tour l'impédance vue à l'entrée du résonateur. Par ce principe, la variation d'impédance permet également de mesurer les variations environnementales à l'origine du changement de conductivité. Cette approche est adaptée aux technologies d'impression où l'épaisseur et la conductivité des couches déposées a une grande influence sur le fonctionnement et les performances des composants [1].

En conclusion l'un de ces 3 matériaux diélectriques peut être utilisé pour la réalisation du capteur micro-ondes. Soit en imprimant un résonateurs CPW sur le matériau diélectrique, soit en déposant un matériau sur une ligne CPW.

Pour ce travail un substrat diélectrique sensible à été utilisé pour réaliser le capteur.

1.2.3 Intégration fonctionnelle des capteurs micro-ondes

L'intégration fonctionnelle consiste à rassembler plusieurs fonctions à l'intérieur d'un même circuit. De manière générale, l'intégration fonctionnelle demeure l'un des axes de recherche les plus intensément développés. Plusieurs approches telles que l'empilement multicouche, la double polarisation EM ou la fonctionnalisation de circuits SIW à couplage contrôlé ont été proposées [78, 98].

a) RFID

cette section présente l'une des méthodes utilisées pour la réalisation d'un capteur identifiable (capteur RFID), il s'agit d'une structure multi-résonante formée par la cascade de deux résonateurs CPW [7] comme présenté à la Figure 1–14. Pour cela le choix de deux fréquences suffisamment éloignées en modifiant les tags du résonateur est la première étape, par la suite l'une est dédiée à la détection et l'autre à l'identification. La fonction de détection est intégrée au moyen d'une feuille diélectrique sensible, dont la nature détermine l'application réalisée: une feuille thermosensible pour la détection de température ; une feuille hydrophile pour la détection d'humidité ceci est illustré à la Figure 1–15. En raison de leur cascade dans une structure en lignes de transmission (fonctionnement en série), il y a une influence mutuelle des résonateurs l'un sur l'autre, en raison de la valeur de leurs impédances [3]. L'un des enjeux de la conception est de la minimiser, en optimisant la distance entre

des résonateurs.

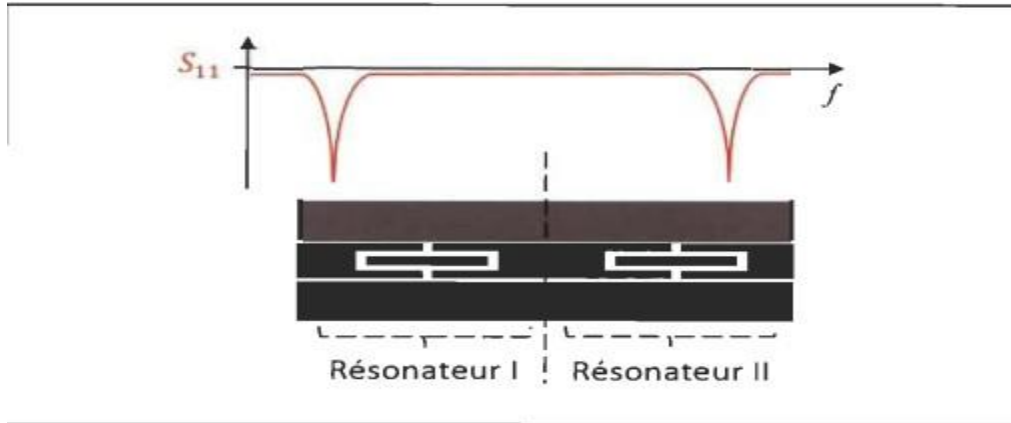


Figure 1-14 : Schéma de principe du résonateur [7]

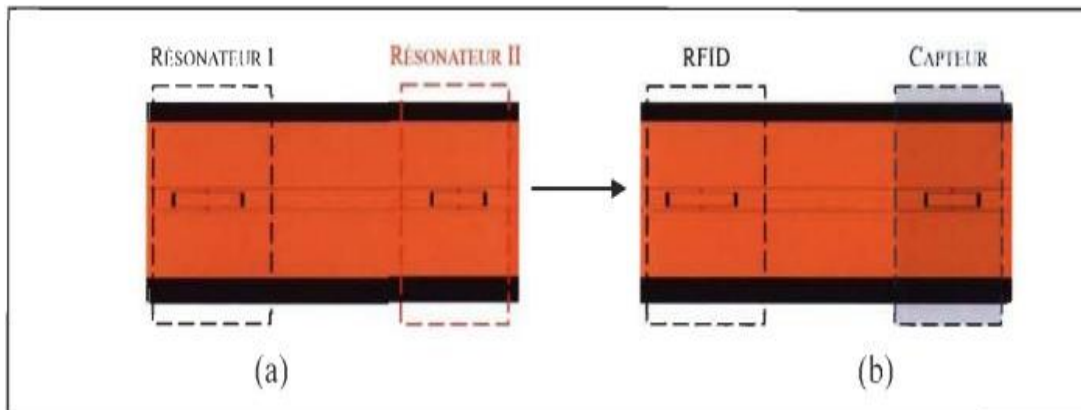


Figure 1-15 : Intégration fonctionnelle du multi-résonateur en (a) pour RFID en (b)

b) Antenne pour application sans fil

Dans cette section l'une des solutions utilisées pour la conception d'un capteur sans fil en utilisant une antenne y est présentée. En effet il s'agit de l'utilisation pratique des résonateurs CPW raccorder à une antenne. Ce raccordement comporte un enjeu technique: le maintien de la performance du capteur sur toute la plage dynamique de détection [1]. En effet, l'impédance des résonateurs change au long de la plage dynamique de détection [7], et le facteur de mérite tend à diminuer considérablement. Dans le cas du raccordement avec une antenne, cette double tendance a un impact sur le matching d'impédance, tant au niveau de la fréquence d'opération (facteur de qualité) que de la puissance [1]. Comme le montre la figure 1-16, deux cas applicables sont envisageables: le raccordement d'une antenne avec un résonateur à impédance variable, et l'impression de l'ensemble résonateur plus antenne sur substrat sensible.

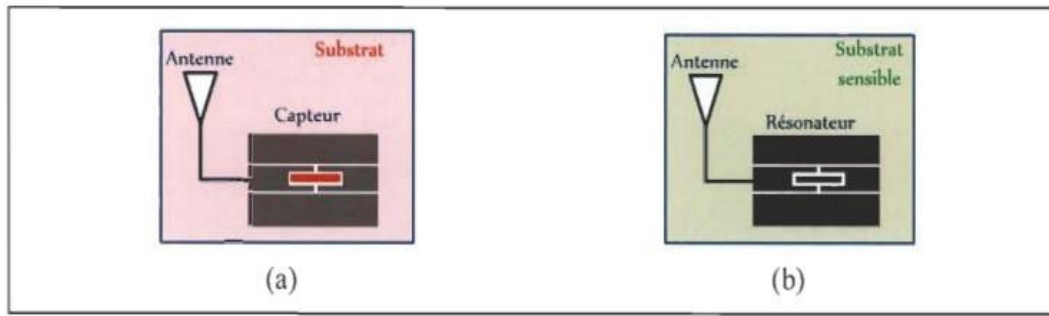


FIGURE 1–16 : ILLUSTRATION DES CAPTEURS SANS FIL (A) PAR ENCRE SENSIBLE; (B) PAR SUBSTRAT SENSIBLE [1]

Dans le premier cas à la Figure 1-16 a), la détection induit soit une variation fréquentielle mesurable à travers le paramètre S_{11} , soit une variation d'impédance mesurable à travers la puissance [51]. Dans le deuxième cas à la Figure 1-16 b), la détection induit une variation de la fréquence de résonance de l'ensemble antenne + résonateur. La qualité du matching entre les deux éléments dépend de l'évolution de chacune d'entre elles prise séparément. Dans les deux cas, les grandeurs les plus impactées sont la plage dynamique et la distance de lecture, qui se définissent ainsi comme les paramètres d'évaluation de la performance [1].

1.3 Généralités sur la technologie CPW

1.3.1 Introduction

La réalisation de capteurs environnementaux répondant aux standards industriels requiert une approche rigoureuse et intégrée. Dans cette démarche, l'arrimage des systèmes de détection aux performances visées et tenant compte des techniques de fabrication accessibles est garanti par des choix technologiques adaptés. Les technologies à lignes de transmission possèdent un énorme potentiel pour la réalisation de capteurs environnementaux à travers les technologies d'impression. En particulier, la technologie CPW permet l'étude de mécanismes de fonctionnalisation applicables aux ondes EM, tout en offrant une planéité singulièrement adaptée au marché des substrats imprimables sur une face. L'historique de cette conception à travers cette technologie a mis en évidence une grande flexibilité dans la réalisation des composants micro-ondes et l'implémentation de concepts de fonctionnalisation variés, s'appuyant sur des matériaux aux propriétés différentes [1].

Cette section traite la technologie CPW et les substrats sensibles en passant par la géométrie, l'impédance caractéristique, la permittivité effective des lignes de transmission en technologie CPW.

❖ Géométrie et description

Partant de la stratification classique d'un substrat PCB commercial faite d'une couche diélectrique d'épaisseur (h) surmontée d'une couche conductrice d'épaisseur (t), une ligne CPW est construite en creusant dans le conducteur deux fentes parallèles de largeur (s) et espacées d'une distance (W). La structure coplanaire finale est ainsi formée de trois traces : une trace centrale de largeur (W) et deux (2) traces latérales de largeur (G) à une distance (s) de part et d'autre de la trace centrale (Figure 1–17). La propagation des ondes EM à travers les lignes CPW est assurée par la polarisation de la trace centrale relativement aux traces latérales portées à la masse. Ces lignes peuvent potentiellement propager des modes propres aux lignes micro-ruban ou aux lignes à fentes. Pour restreindre la propagation au mode TEM quasi-statique propre aux lignes CPW, la largeur du plan de masse (G) doit être d'au moins 2.5 à 3 fois plus grande que celle de la ligne centrale, et le substrat doit être suffisamment épais par rapport au gap ($h \gg s$) [1].

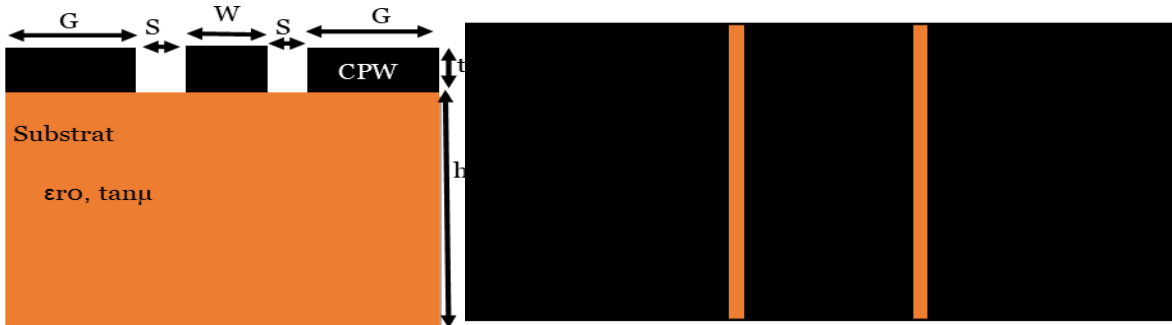


Figure 1–17 : Géométrie de la ligne CPW [1]

Plusieurs approches de modélisation EM ont été proposées pour l'analyse des circuits en technologie en CPW. La théorie de la cartographie conforme procède par subdivision de l'espace en régions diélectriques. Dans cette approche, toute région diélectrique parcourue par le champ EM est associée à une capacité. La capacité équivalente totale est formée de la superposition des différentes capacités individuelles, pondérées d'un facteur de remplissage partiel traduisant l'influence de la géométrie de ligne. Les paramètres diélectriques de la ligne CPW tels que sa permittivité effective ou son impédance caractéristique sont déterminés par la capacité équivalente totale. Le formalisme ainsi construit est simple et accessible, mettant en relief la contribution de chaque matériau diélectrique. Dans la Figure 1–17, la ligne CPW est située entre une région d'air de permittivité (1) et de hauteur infinie, et un substrat de permittivité (ϵ_r) et de hauteur (h). La permittivité effective de la ligne (ϵ_{eff}) est donnée à l'équation (1.7), où (q_1) est le facteur de remplissage partiel

$$\epsilon_{eff} = 1 + q_1(\epsilon_r - 1)$$

1-7

L'impédance caractéristique de la ligne CPW (Z_0) est calculée en fonction de ε_{eff} selon la formule (1.8). Le terme $K(k'_0)/K(k_0)$ est l'intégrale elliptique calculée selon la référence [6].

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad 1-8$$

Avec :

$$k_0 = \frac{W}{W + 2S} \quad 1-9$$

$$k'_0 = \sqrt{1 - k_0^2} \quad 1-10$$

1.3.2 Technologies CPW et substrat sensible

❖ Substrats sensibles au-dessus, en dessous

➤ Ligne CPW en sandwich entre deux diélectriques

En pratique, certaines applications requièrent l'utilisation de lignes CPW intercalées entre deux régions diélectriques. Cette approche est aisément transposable à la réalisation des fonctions de détection. À des fins d'analyse, une ligne CPW entourée d'un substrat en-dessous et d'une feuille diélectrique au-dessus est présentée à la Figure 1–18.

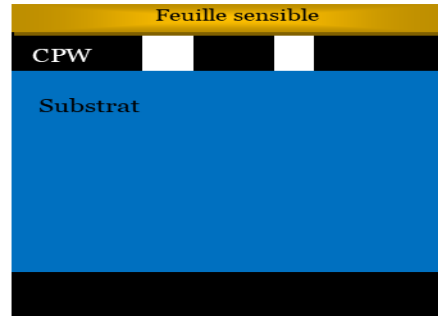


Figure 1–18 : ligne CPW pris en sandwich [1]

En pratique, certaines applications requièrent l'utilisation de lignes CPW intercalées entre deux régions diélectriques. Cette approche est aisément transposable à la réalisation des fonctions de détection.

$$\varepsilon_{eff1} = 1 + q_1(\varepsilon_{r1} - 1) + q_2(\varepsilon_{r2} - 1) \quad 1-11$$

De manière analogue à l'équation (1-8), l'impédance caractéristique pour cette structure est donnée

en (3.6). Elle est calculée en fonction de ϵ_{eff1} intégrant l'influence de tous les matériaux diélectriques sur le comportement de la ligne. Le terme $K(k'_0)/K(k_0)$ est l'intégrale elliptique calculée de la même manière d'après la référence [6].

$$Z_{01} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff1}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad 1-12$$

➤ Variante CPWG et paramètres diélectriques associés

La configuration CPWG de l'anglais *Coplanar Waveguide Grounded* est une variante de ligne CPW très répandue. Elle est illustrée à la Figure 1–19 partant du circuit de la Figure 1–17, avec un plan de masse.

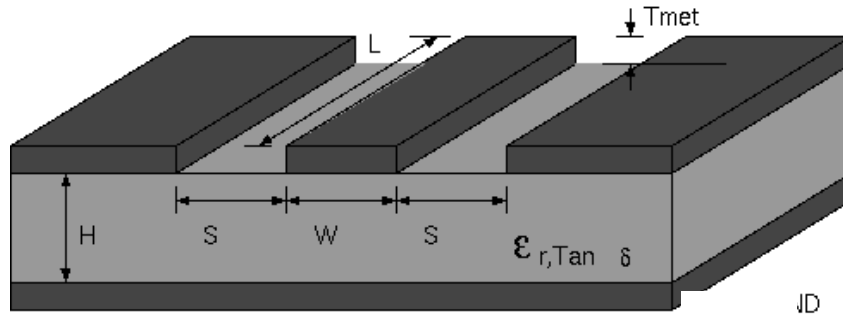


Figure 1–19 : lignes CPWG

Le plan de masse est connecté aux lignes latérales de la ligne CPW. Il constitue une barrière métallique qui aide à confiner le champ EM à l'intérieur du substrat et à limiter la dispersion. Ce plan de masse sert également à isoler la ligne de l'influence des diélectriques en-dessous. Dans la pratique, des vias sont nécessaires entre les traces latérales de la ligne et le plan métallique pour uniformiser la masse. La permittivité effective de ligne de la Figure 1–19, ϵ_{eff3} est donnée à l'équation (1.15), avec q_3 comme facteur de remplissage partiel et ϵ_{r3} comme permittivité du substrat. L'impédance caractéristique (Z_{03}) est donnée à l'équation (1.16), avec $K(k'_0)/K(k_0)$ et $K(k'_3)/K(k_3)$ les intégrales elliptiques calculées à partir de k_0 et k'_0 , respectivement donnés aux équations (1.11) et (1.12), k_3 et k'_3 respectivement donnés aux équations (1.17) et (1.18).

$$\epsilon_{eff3} = \frac{1 + 2 * q_3 * \epsilon_{r3}}{1 + 2 * q_3} \quad 1-13$$

$$Z_{03} = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff3}}} \frac{1}{\frac{K(k'_0)}{K(k_0)} + \frac{K(k_3)}{K(k'_3)}} \quad 1-14$$

$$k_3 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi W}{4h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(W+2s)}{4h}\right)} \quad 1-15$$

$$k'_3 = \sqrt{1 - k_3^2} \quad 1-16$$

Chapitre 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Résonateurs cpw sur substrats différents

Le résonateur utilisé pour obtenir un capteur micro-onde a été conçu grâce au logiciel HFSS. Le substrat Rogers 4835 selon les détails présentés plus bas a été choisi. Les dimensions de la ligne CPWG pour $Z_0 = 50 \Omega$ ont par la suite été évaluées avec l'outil LineCalc. En fixant le gap à $s = 1 \text{ mm}$, la largeur de la trace centrale doit être $W = 2.98 \text{ mm}$. La largeur des plans de masse coplanaires est: $G = 3 \times (W) = 8.94 \text{ mm}$. Les dimensions du dispositif final sont $33,15 \times 22,86 \times 1,52 \text{ (mm)}$.

➤ Conception du résonateur CPW sous HFSS

La **figure 2-1** montre la structure du résonateur CPW modélisé dans le logiciel HFSS.

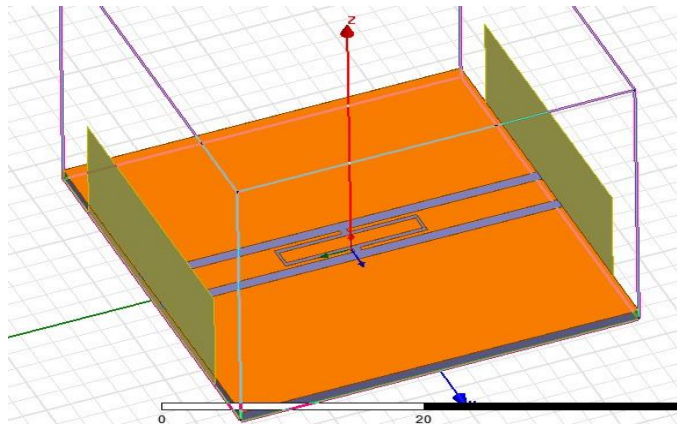


FIGURE 2-1 : RÉSONATEUR CONÇU SOUS HFSS

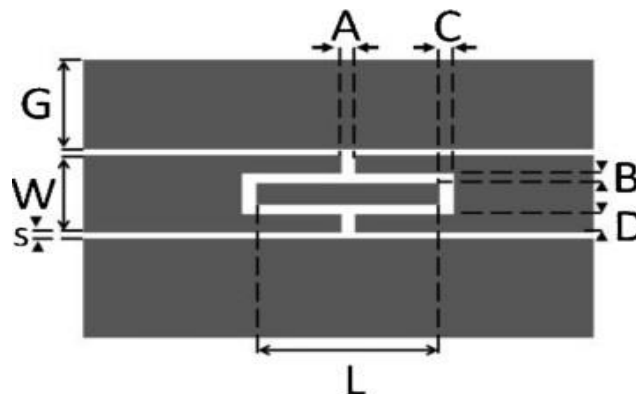


FIGURE 2-2 : STRUCTURE DU RÉSONATEUR CPW

Les dimensions de la structure proposée sont détaillées dans le Tableau 2-1 .

Tableau 2-1 : dimension de la ligne cpw

Paramètres	L	S	W	G	A	C	B	D
Valeurs (mm)	11.5	1	2.98	8.94	0,6	1,78	1,81	0,39

Le fichier masque de production utilisé pour programmer la machine d'impression LPKF ProtoMat S103 présenté à la Figure 2–36 à imprimer le résonateur CPW sur les substrats est présenté à la Figure 2–3 :

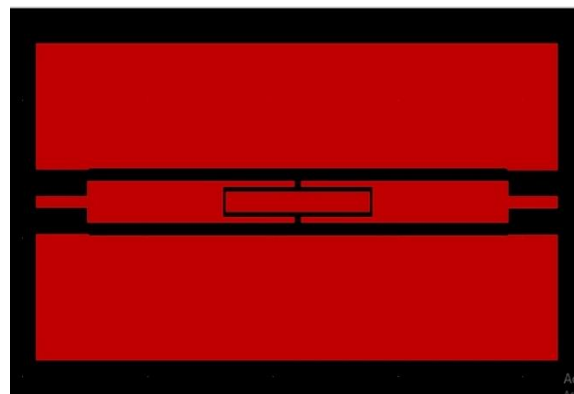


Figure 2–3 : Layout du résonateurs cpw

Les Figure 2–4 , Figure 2–5 et Figure 2–6 montrent la structure fabriquée à partir des substrats diélectriques ROGER4835 , Duroid 5880 et FR4. Le capteur a été réalisé à l'aide d'une technique de fabrication de PCB standard par gravure mécanique et de la technologie CPW.

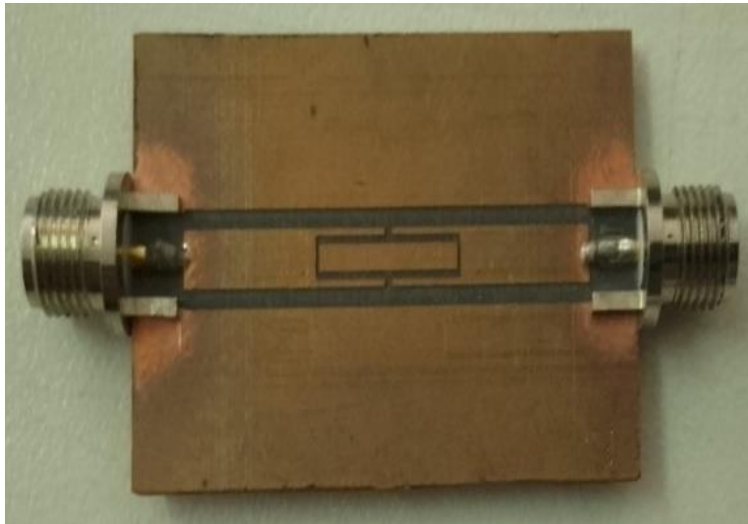


Figure 2-4 : résonateurs CPW sur substrat Duroid 5880 (couleur noir)



Figure 2-5 : résonateurs CPW sur substrat FR4 (couleur jaunâtre)

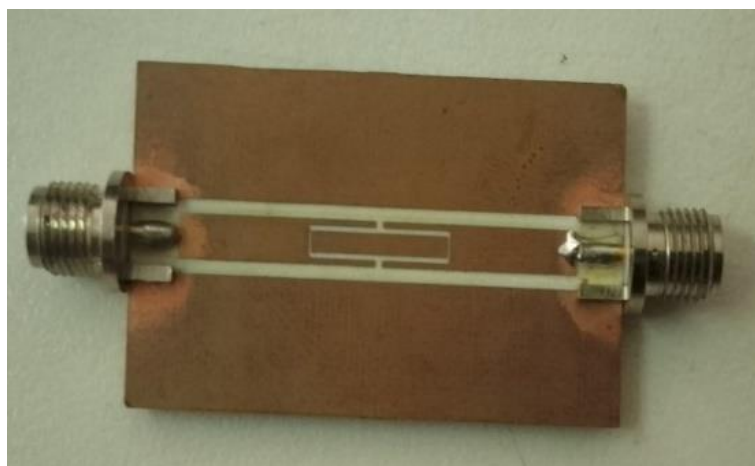


Figure 2-6 : résonateurs cpw sur ROGERS4835(couleur blanche)

Le paramètre S_{11} de chaque résonateur cpw présenté ci-haut obtenu lors des simulations sous HFSS

et ceux de ces mêmes circuits obtenus lors des mesures au Canada et au Cameroun sont superposés à partir du logiciel Matlab tel que présenté ci-dessous :

❖ **Paramètre S_{11} : superposition simulation HFSS, mesure Canada et mesure Cameroun pour 3 substrats**

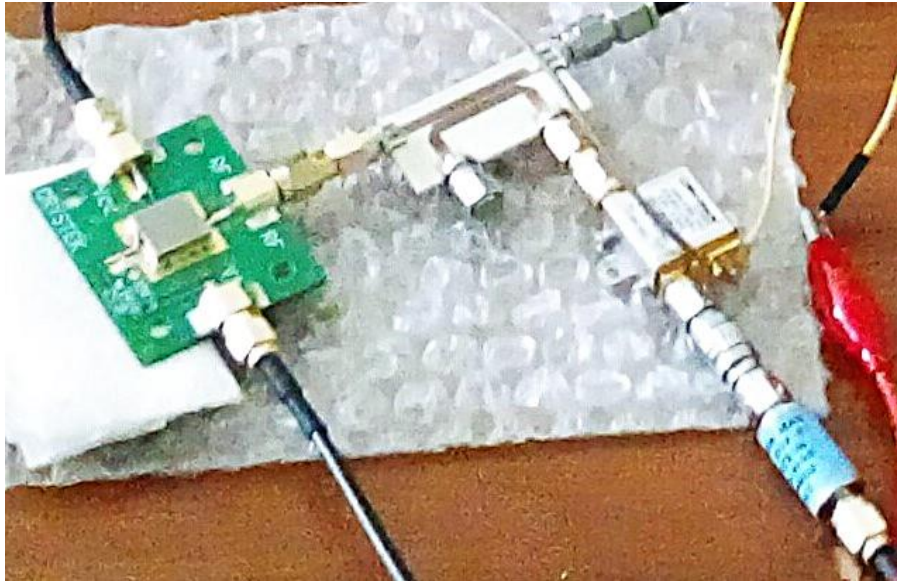


FIGURE 2–7 : CIRCUIT RF UTILISÉ POUR LES MESURES

Le circuit RF présenté à la Figure 2–7 est celui utilisé pour effectuer les mesures des paramètres S du résonateur CPW à l'Université de Yaoundé 1 . Son schéma bloc est présenté plus bas à la Figure 2–15.

Une comparaison entre le paramètre S_{11} simulé et mesuré du capteur CPW est représentée sur la Figure

2–8

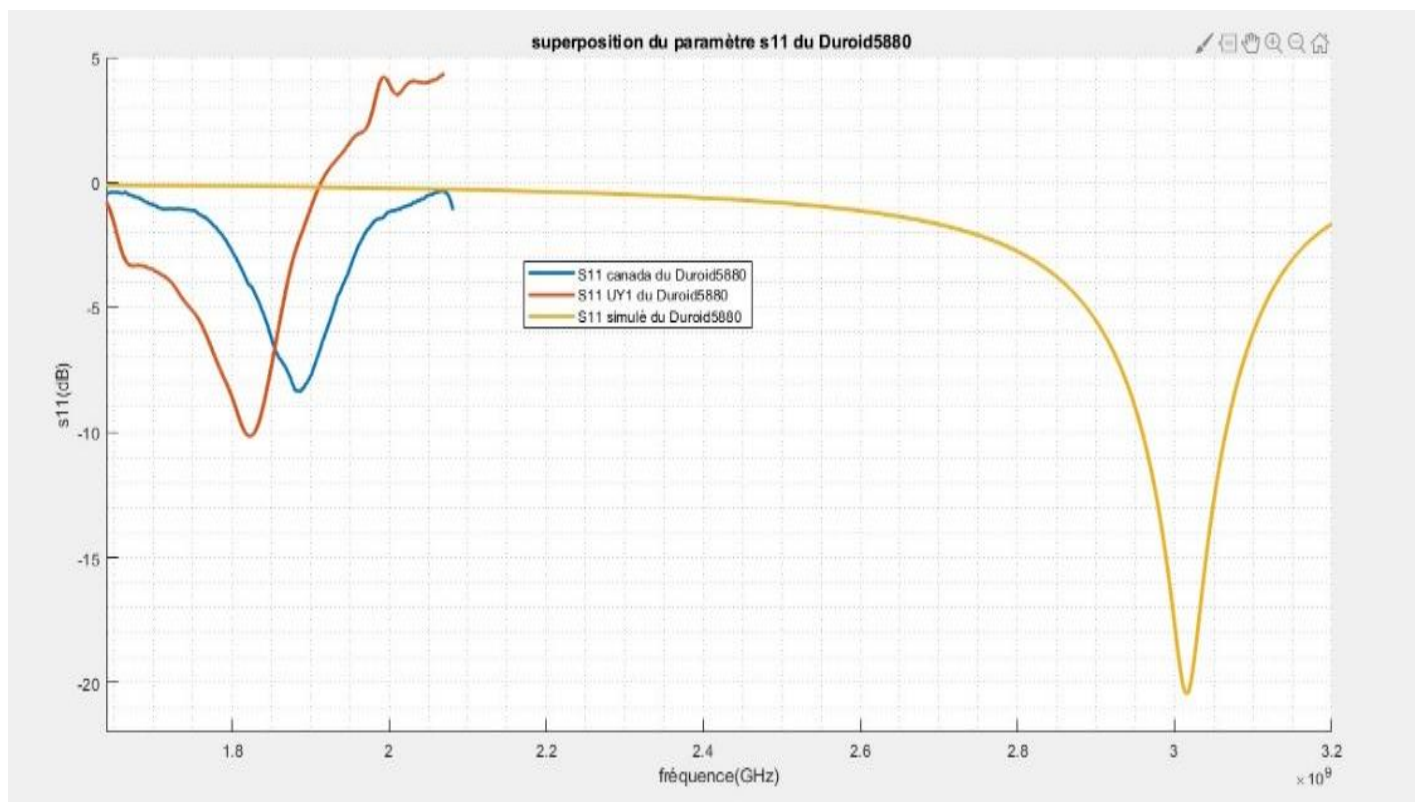


Figure 2–8 : superposition paramètre S_{11} (mesure/ simulation) du résonateur sur Duroid5880

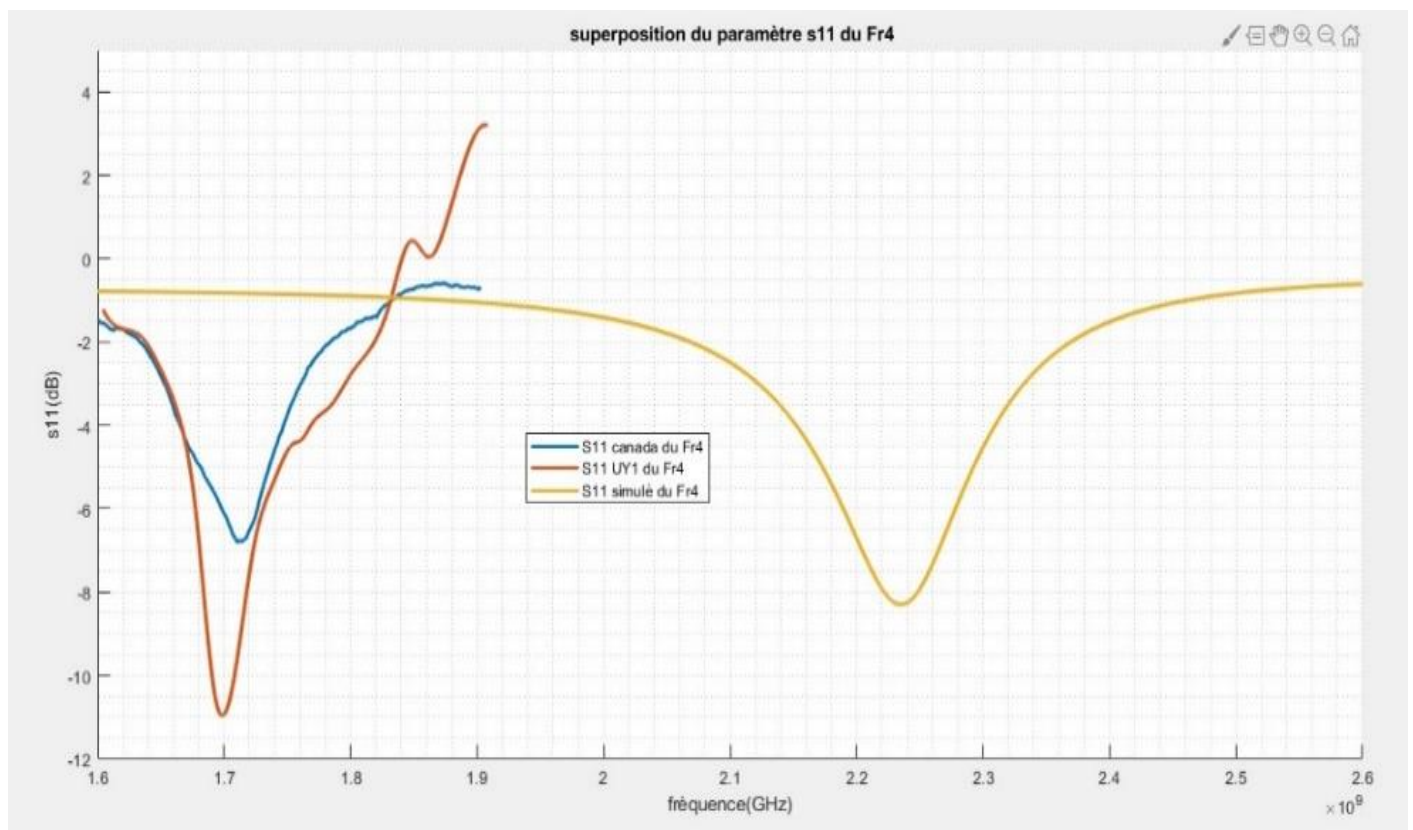


Figure 2–9 : superposition paramètre S11 (mesure/ simulation) du résonateur sur Fr4

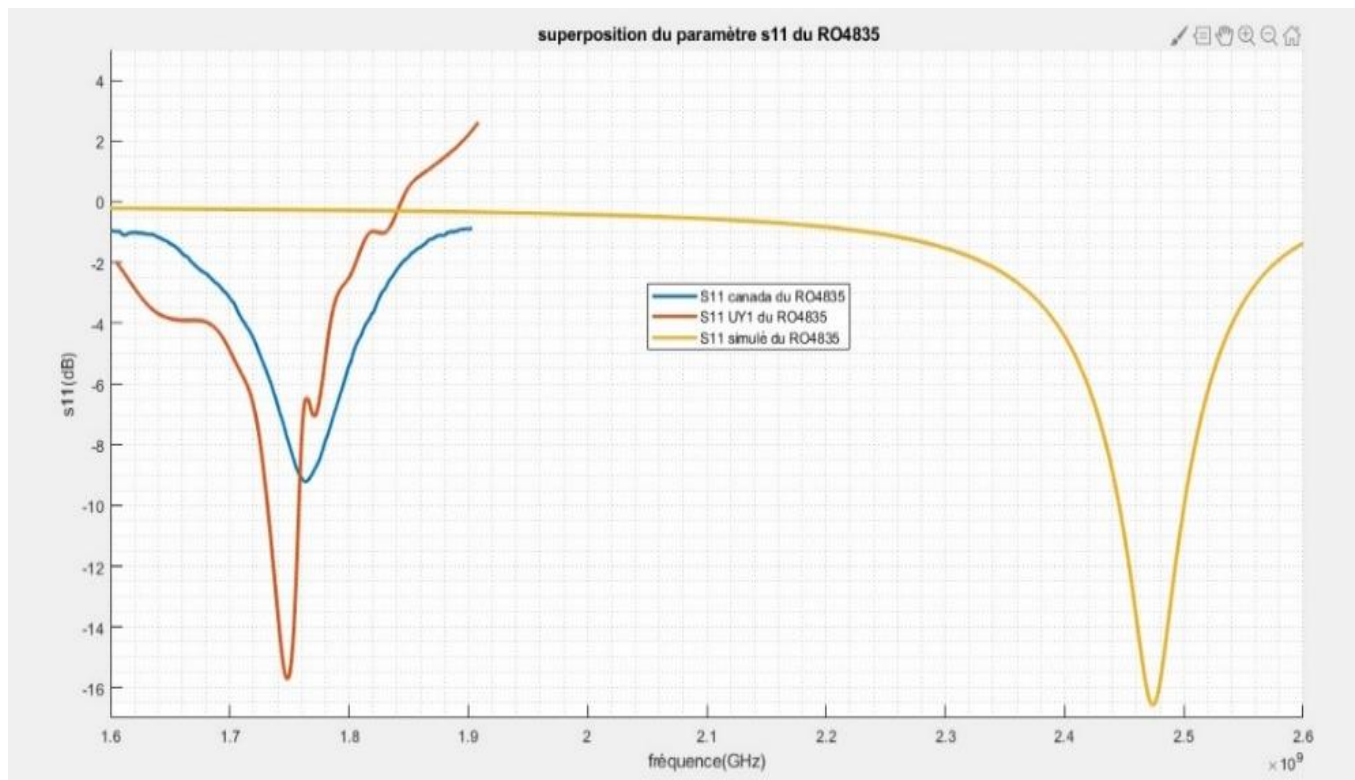


Figure 2–10 : superposition paramètre S11 (mesure/simulation) du résonateur sur RO4835

Les Figure 2–8 à 2-10, montrent l'évolution du paramètre S11 du capteur imprimé sur 3 substrats différents obtenu en simulation et en pratique.

Les Tableau 2-2 et Tableau 2-3 présentent une comparaison entre les fréquences de résonance prédites par la simulation du paramètre S11 du résonateur sur les substrats présentés plus haut sous HFSS et celle obtenues par les mesures faite au Canada et au Cameroun à l'UY1. Ainsi une bonne concordance est observée entre la mesure au Canada et à l'UY1 malgré une légère différence entre leur fréquence de résonance qui peut s'expliquer du fait des équipements de mesures et des conditions ambiantes qui ne sont pas les mêmes dans les deux environnements.

Une différence est également observée entre les fréquences de résonances prédites par la simulation et celles mesurées. Cette différence peut s'expliquer du fait des défauts de précision de l'appareil d'impression ou du fait de l'insertion du connecteur SMA qui créer une sorte de désadaptation ou encore du logiciel.

Cependant chaque résonateur présente une fréquence de résonance différente ce qui est due au fait que la permittivité et les dimensions du substrat influencent la permittivité effective de la ligne

respectivement par les paramètres ε_{r1} et q_1 . À travers l'équation (2.1), cette variation est reportée sur l'impédance caractéristique. Le comportement des ondes EM est ainsi affecté par le changement environnemental et mesurable par les paramètres S . Cela permet de conclure que leur conception est une réussite.

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \frac{K(k_3)}{K(k'_3)}} \quad (2.1) \quad 2-1[4]$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1 + 2q_1 * \varepsilon_{r1}}{1 + 2 * q_1} \quad (3.2) \quad 2-2[4]$$

Tableau 2-2 : tableau de comparaison en fréquence (mesure/ simulation)

	Fréquence de résonance mesuré au Canada (GHz)	Fréquence de résonance Simulée (GHz)	Écart (GHz)
ROGERS 4835	1.765	2.475	0.71
Duroid 5880	1.88	3.01	1.13
Fr4	1.71	2.24	0.53

Tableau 2-3 : tableau de comparaison en fréquence (mesure Canada/Cameroun)

	Fréquence de résonance Mesuré au Canada (GHz)	Fréquence de résonance Mesuré au Cameroun (GHz)	Écart (GHz)
ROGERS 4835	1.765	1.749	0.016
Duroid 5880	1.88	1.825	0.055
Fr4	1.71	1.70	0.01

2.2 Test RF par analyseur de réseaux scalaire

2.2.1 Présentation de l'analyseur de réseaux scalaire

L'analyseur scalaire est le point d'entrée pour la mesure de réseaux. Il utilise des détecteurs simples qui ne donnent que des informations d'amplitude, pour caractériser les paramètres mesurables d'un circuit sous test (Device Under Test (DUT)) tel que les paramètres S .



Figure 2–11 : 6204B - SNA 10MHz à 40GHz

a) Principe et bloc fonctionnel de l'analyseur de réseaux scalaire

La figure 2.12 ci-dessous donne le schéma de principe du SNA

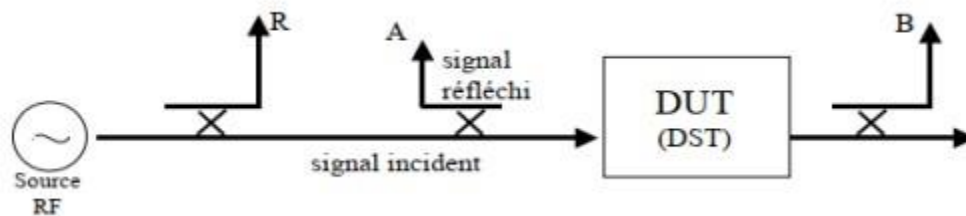


Figure 2–12 : Schéma de principe du SNA

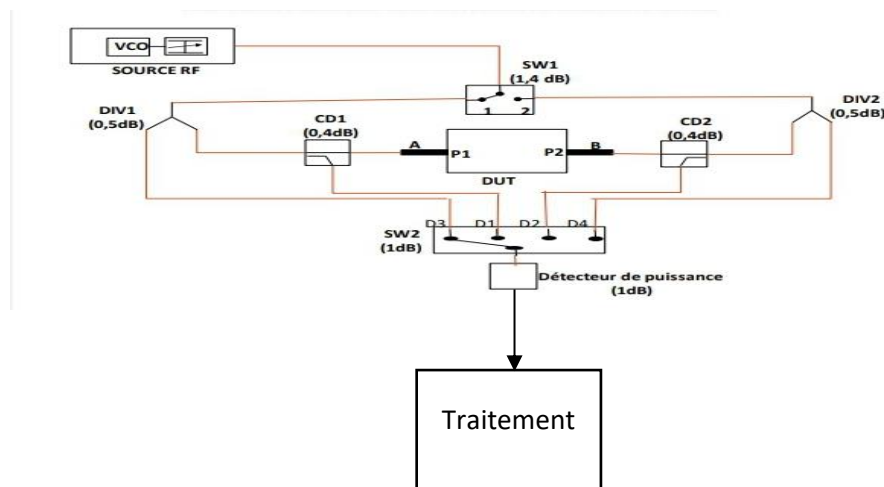


Figure 2–13 : Schéma bloc fonctionnel du SNA

Le schéma bloc fonctionnel du SNA est donné à la Figure 2–13 et le fonctionnement est le suivant : La source RF (Générateur BF+VCO) émet un signal qui est atténué à l'aide d'un atténuateur (pour ne pas détruire le DUT). Considérons le switch en position 1 le signal émit est divisé en deux au

niveau du diviseur 1 une partie de ce signal est prise comme référence (R) et est détectée à l'aide du détecteur 3 (D3) et l'autre partie de ce signal arrive au port P1 (A) du DUT, une partie du signal est réfléchi au port P1 et sera couplée à travers le coupleur CD1 et détectée à partir du détecteur 1 (D1) et l'autre partie de ce signal est transmise au port P2 (B) et sera couplée au coupleur CD2 détectée à partir du détecteur 2 (D2). Les signaux détectés aux niveaux des détecteurs 1,2 et 3 sont ensuite traités au niveau du bloc de traitement pour avoir S_{11} et S_{21} .

Dans le cadre de ce mémoire, deux chaînes RF sont à considérer séparément, dans un premier temps une chaîne RF sans le capteur sous test pour mesurer le signal incident en tension V_1 comme le montre la Figure 2–15 ensuite une autre chaîne RF avec Capteur sous test pour mesurer le signal réfléchi en tension V_2 et le signal transmis en tension V_3 comme le montre la Figure 2–16 afin d'avoir les paramètres suivants :

$$S_{11} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) ; S_{21} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_3}{V_1} \right) \quad (2.5)$$

b) Éléments constitutifs du SNA

Le SNA est constitué d'éléments suivants :

➤ VCO

Les oscillateurs commandés en tension (VCO pour voltage controlled oscillator) sont des dispositifs électroniques conçus pour commander la fréquence d'oscillation en faisant varier la tension d'entrée. En effet le signal de la tension continue est utilisé comme entrée de commande pour faire varier la fréquence de sortie Figure 2–14. Suivant le type de signal généré en sortie, les oscillateurs commandés en tension sont classés en deux groupes tel que :

Les VCO harmonique dont le signal généré à sa sortie est un signal de forme sinusoïdale exemple les oscillateurs à quartz et les oscillateurs LC.

Les VCO à relaxation dont le signal généré à sa sortie est un signal de forme triangulaire, en dents de scie, ou de forme carrée exemple les oscillateurs à trigger de schmitt et VCO à multivibrateur astable.

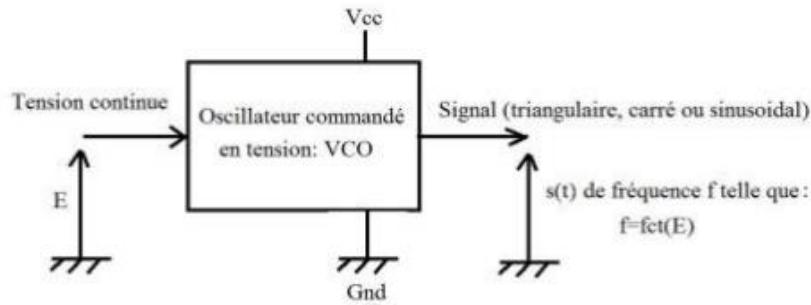


Figure 2–14 : Oscillateur commandé en tension [24]

➤ Atténuateur

Les atténuateurs sont des dispositifs qui réduisent la puissance d'un signal sans fausser sensiblement sa forme d'onde. Cela protège le circuit contre la réception d'un signal puissant. Les atténuateurs peuvent être considérés comme le contraire des amplificateurs de signal. Un amplificateur augmente la puissance du signal (ou l'amplitude) tandis qu'un atténuateur la diminue. Les atténuateurs RF sont proposés en trois types : Les atténuateurs RF fixes qui, fournissent une valeur immuable lorsque des niveaux d'atténuation spécifiques sont nécessaires; Les atténuateurs RF à commutation qui sont composés de commutateurs qui permettent de varier les niveaux d'atténuation; Les atténuateurs RF variables qui sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de changer le niveau d'un signal en permanence.

➤ Switch

Un commutateur RF est un dispositif permettant d'acheminer des signaux haute fréquence à travers des voies de transmission. Les commutateurs RF sont largement utilisés dans les systèmes de test micro - ondes pour le routage du signal entre les instruments et les dispositifs sous test.

➤ Diviseur de puissance

Les diviseurs/combineurs de puissance sont des composants d'hyperfréquence passifs utilisés pour la division ou la combinaison de puissance. Dans le cas de la division de puissance, un signal d'entrée peut être divisé en deux ou plusieurs signaux de sortie de plus faibles puissances, alors qu'en combineur de puissance, plusieurs signaux d'entrées peuvent être combiner en un seul signal de sortie. Ces diviseurs sont utilisés dans de nombreux circuits tels que les mélangeurs, les amplificateurs équilibrés, les antennes, les systèmes radars et autres.

➤ **Coupleurs directionnel**

C'est un composant micro-onde passif permettant de répartir la puissance transmise dans un système. C'est un dispositif à quatre accès comprenant un port d'entrée, un port de sortie, un port couplé et un port isolé. Il est constitué de deux lignes de transmissions et un mécanisme de couplage entre elles. Il est caractérisé par le coefficient ou facteur de couplage, la directivité, l'isolation et les pertes par insertion. Son facteur de couplage est généralement compris entre 10 dB et 30 dB.

➤ **Détecteur de radiofréquence**

Un détecteur de radiofréquence est un appareil utilisé pour détecter la présence d'ondes radioélectriques sur un support de transmission physique sans fil. Il est aussi appelé détecteur de puissance RF et est disponible comme appareil ou module. Il peut également faire référence à un produit des tests professionnels destinés à contrôler des signaux ou bruits sur un support physique. Dans les circuits RF, il sert à la détection du niveau de puissance transmise du signal RF et la convertie en une tension DC.

2.2.2 Mesure des paramètres S

Dans le cadre de ce mémoire la mesure du paramètre S_{11} du capteur fabriqué est une étape cruciale. Pour y arriver, le signal incident en tension (V_1) a d'abord été mesuré, ensuite le signal réfléchi en tension (V_2) a été mesuré.

a) Mesure du signal incident en tension(V_1)

Pour la mesure du signal incident en tension, la Figure 2–15 représente le schéma bloc fonctionnel du circuit RF utilisé.

➤ Schéma bloc du circuit utilisé pour la mesure

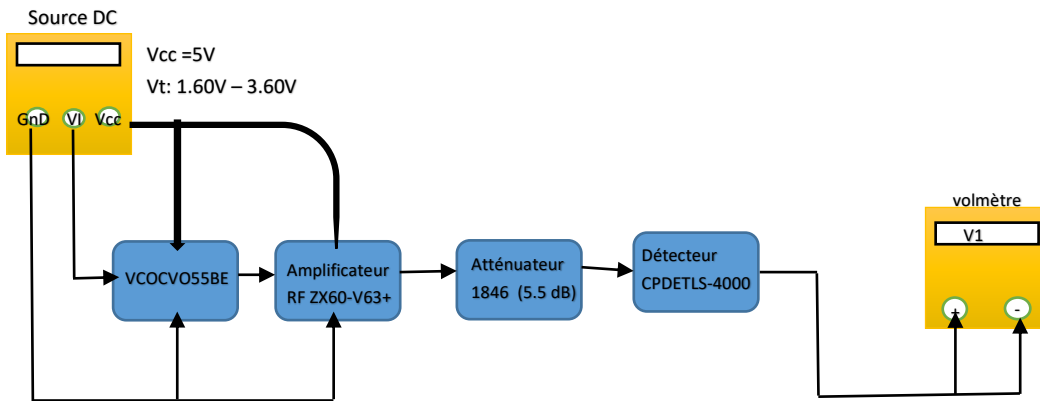


Figure 2–15 : Schéma bloc fonctionnel utilisé pour la mesure du signal incident (V1)

Son fonctionnement est le suivant : en effet à chaque tension de commande du VCO fixé manuellement à l'aide d'un potentiomètre, un signal de fréquence correspondant est émis du VCO ce signal passe par L'amplificateur RF et l'atténuateur pour pouvoir être détecté par le détecteur CPDETL5-4000 et à l'aide d'un voltmètre la tension de sortie de ce dernier est lue et noté dans un fichier Excel. Une fois la plage des tensions de commande prévu qui est de [1.60 ; 3.60] mV est atteint, la mesure du signal est achevée. Cette tension lue à l'aide du voltmètre est celle due au signal incident émit par le VCO.

b) Mesure du signal réfléchi en tension (V2)

Pour la mesure du signal réfléchi en tension, la Figure 2–16 représente le schéma bloc fonctionnel du circuit RF utilisé.

➤ Schéma bloc du circuit utilisé

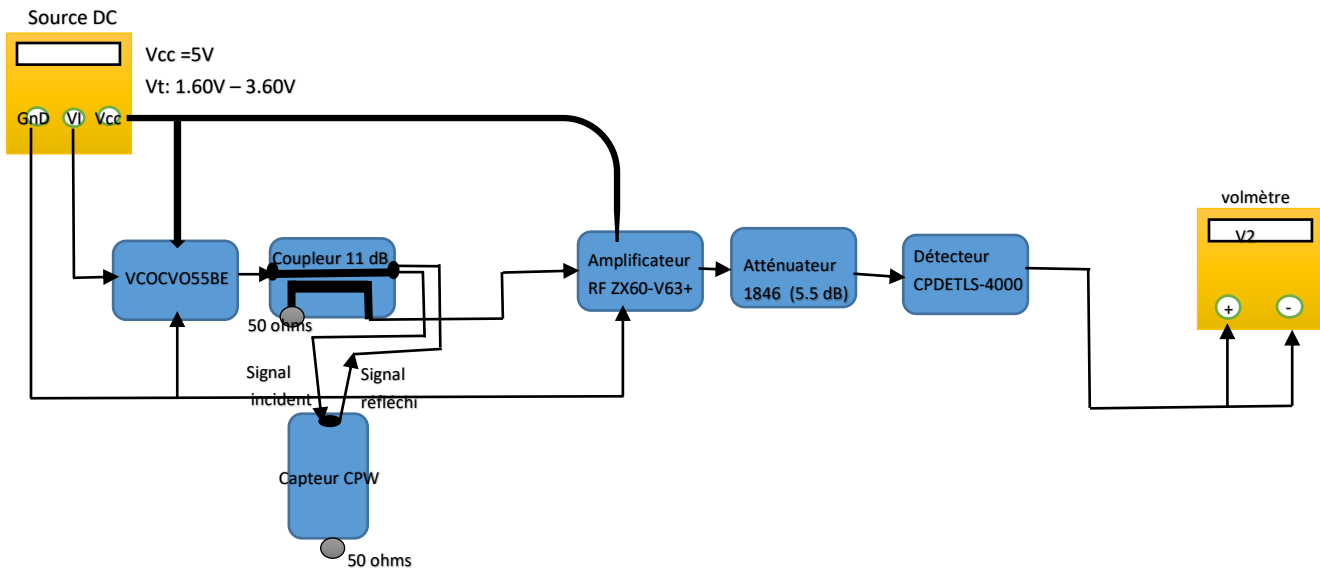


Figure 2–16 : Schéma bloc utilisé pour la mesure du signal réfléchi (V2)

A partir de cette chaîne RF, chaque tension de commande du VCO fixé manuellement à son entrée à l'aide d'un potentiomètre, permet l'émission d'un signal de fréquence correspondant du VCO, comme le montre la Figure 2–16 ce signal arrive premièrement au niveau du coupleur 11 dB, il est transmis du port d'entrée (port1) au port de sortie (port2), ensuite le signal transmis arrive directement au port d'entrée (port 1) du capteur CPW sous test car il est directement connecté au coupleur ; pour empêcher ce signal d'être à nouveau transmis à travers le capteur un connecteur 50 ohms est placé à son port de sortie (port 2), c'est ainsi que le signal arrivé à l'entrée du capteur est réfléchi et c'est ce signal réfléchi qui est lu en tension (V2) par le voltmètre en passant par le port 2 du coupleur qui est cette fois-ci considéré comme le port d'entrée, ensuite son port couplé (port 3), pour arriver au niveau de l'amplificateur RF ZX60-V63+, ensuite l'atténuateur 1846 (5.5 dB) pour être détecté par le détecteur CPDETL5-4000. C'est ainsi qu'est mesuré le signal réfléchi en tension V2. Effectivement la mesure est achevée lorsque la plage des tensions de commande du VCO qui est [1.60 ; 3.60] V par pas de 0.1 V est atteint.

c) Paramètre S₁₁ à partir des mesures

A partir de ces deux mesures présentées plus haut, le calcul des paramètres S₁₁ se fait en utilisant la formule :

$$S_{11} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.6)$$

Le Tableau 2-4 montre le fichier de mesure du paramètre S11 établi à partir du logiciel Excel :

Tableau 2-4 : fichier de mesure du paramètre s11

V1	V2	S11

2.2.3 Validation et discussion

❖ Comparaison du S11 mesuré au Cameroun à celui fait au Canada

Pour s'assurer et valider le fonctionnement de ce circuit RF, le paramètre S11 du résonateur CPW sur substrat RO4835 obtenu lors des mesures au Canada est pris comme référence car ces mesures ont été faites à partir d'un analyseur de réseau scalaire.

En effet, le paramètre S11 du résonateur CPW sur substrat RO4835 a été mesuré à l'UY1 d'après la procédure présentée plus haut en utilisant les circuits RF de la **Erreur ! Source du r envoi introuvable.** et Figure 2-16, ensuite ce paramètre a été comparé à celui obtenue au Canada. La condition de validation de ce circuit est que la différence entre la fréquence de résonance du S11 obtenue au Canada et celle du S11 obtenue à l'UY1 soit inférieure ou égale à 0.03 GHz, elle est traduite par la formule suivante :

$$f_{\text{résonance}_{\text{Canada}}} - f_{\text{résonance}_{\text{UY1}}} \leq 0.03 \text{ GHz}$$

La figure ci-dessous illustre la comparaison faite entre les deux paramètres au niveau de leur fréquence de résonance:

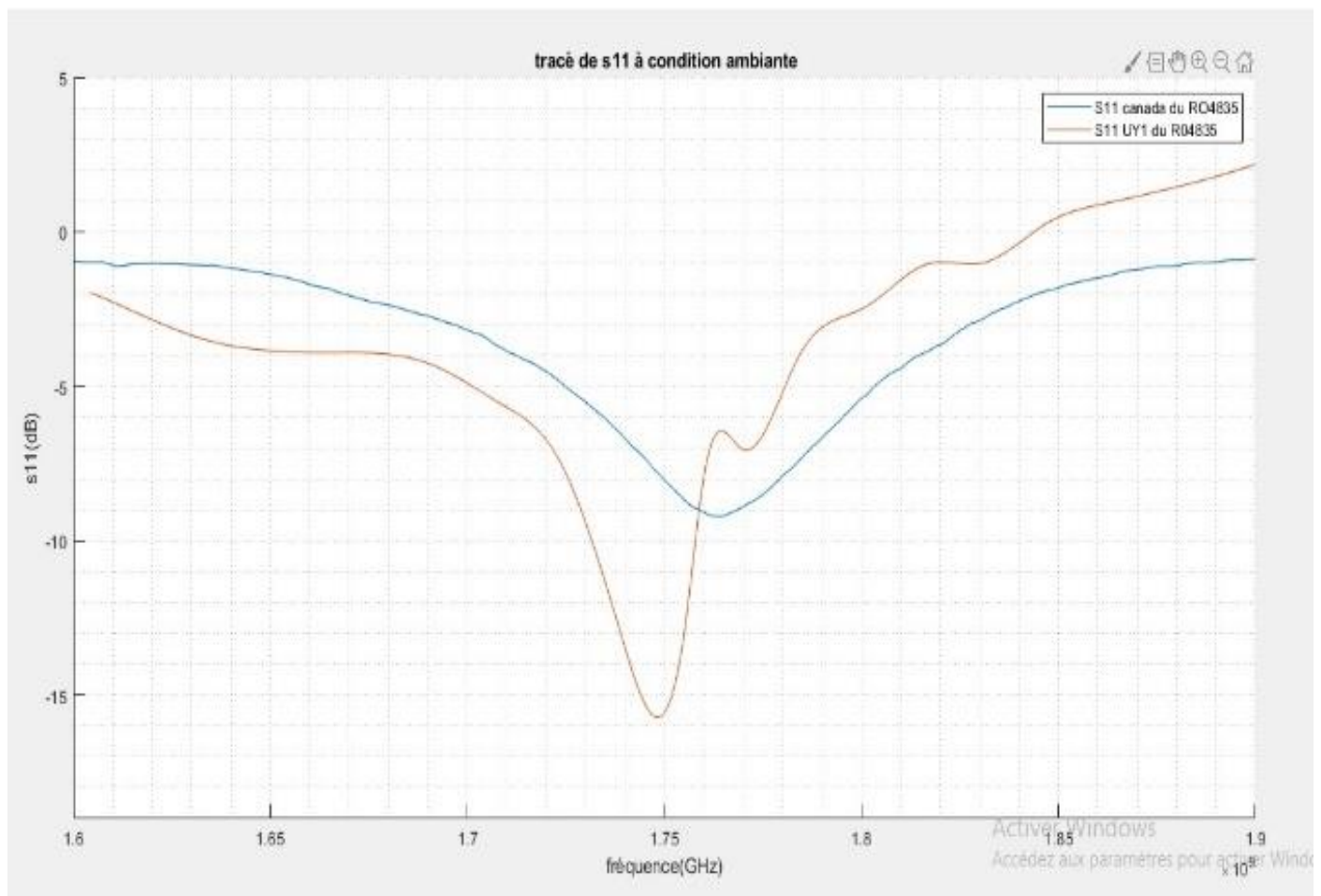


Figure 2–17: paramètre s11

Tableau 2-5: comparaison

Fréquence de résonance	1.76 GHz
Au Canada	
Fréquence de résonance	1.75 GHz
Au Canada	
Ecart	0.01 GHz

La table ci-dessus montre l'écart entre ces fréquences qui est de 0.01 GHz, ce qui prouve le bon fonctionnement et la fiabilité du circuit RF utilisé pour les mesures. La variation des deux paramètres s11 en fonction de la fréquence étant approximativement similaire, ceci permet également de valider le circuit ou dispositif utilisé.

2.3 Test des capteurs fabriqués

2.3.1 Approche de mesure multi-capteur

❖ Utilisation du FR4 en-dessous et Kapton au-dessus pour faire multi-capteur



FIGURE 2-18: MULTI-CAPTEUR AVEC FR4 ET KAPTON

Tel que présenté ci-haut, les substrat FR4 et le Kapton sont utilisés pour leur sensibilité à l'humidité et la température ; en effet puisque la permittivité du Kapton varie en fonction des paramètres environnementaux la permittivité effective du multi-capteur varie également d'après la relation ci-dessous :

$$\varepsilon_{eff} = 1 + q_1(\varepsilon_{r1} - 1) + q_2(\varepsilon_r - 1) \quad 2-3 [4]$$

Avec :

$$q_1 = \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \left[\frac{K(k_3)}{K(k'_3)} + \frac{K(k_4)}{K(k'_4)} \right], \quad 2-4 [4]$$

$$q_1 = \frac{K(k_2)}{K(k'_2)} \left[\frac{K(k_3)}{K(k'_3)} + \frac{K(k_4)}{K(k'_4)} \right] \quad 2-5 [4]$$

Ainsi la variation de la fréquence de résonance est obtenue par la relation :

$$Fr = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \text{ avec } C \text{ un réel non nul}$$

Donc indirectement lié à la grandeur physique à détecter , pour ce test il s'agit de la température et l'humidité.

En effet Lors des mesures, pour placer le multi-capteur sous test , le résonateur CPW imprimé sur le substrat FR4 est connecté sur la chaîne RF comme présentée à la (Figure 2-16) ensuite une feuille de Kapton est placée au dessus du résonateur CPW, enfin ce multi-capteur est placé soit sous humidité variable, soit sous température variable, pour ainsi effectuer les mesures.

Pour valider le fonctionnement des capteurs fabriqués il est question de les soumettre à des tests

d'humidité et de température ce qui est l'un des objectifs principaux de ce mémoire.

2.3.2 Tests d'humidité

a) Méthode avec sels saturés

Le test d'humidité des capteurs consiste ici à placer le capteur dans un environnement où le taux d'humidité est variable, les capteurs étant connectés à la chaîne RF pour effectuer les mesures. Bien qu'il existe plusieurs méthodes pour faire varier le taux d'humidité, dans le cadre de ce mémoire ce sont les sels saturés qui ont été utilisés particulièrement cinq sels présentés dans le Tableau 2-6.

Tableau 2-6 : sels saturés utilisés

N°	Solutions salines saturées		Humidité relative en (%) à T=30°C
	En Français	En Anglais	
1	Hydroxide de Sodium	Sodium Hydroxide	7.58 ± 1.70
2	Iodure de Sodium	Sodium Iodide	36.15 ± 0.43
3	Iodure de Potassium	Potassium Iodide	67.89 ± 0.23
4	Chlorure de Sodium	Sodium Chloride	75.09 ± 0.11
5	Chlorure de Potassium	Potassium Chloride	83.62 ± 0.25

Le principe d'opération est : chaque sel a des propriétés physiques définies tel que le taux d'humidité. Le but ici est d'utiliser chaque sel pour fixer un taux d'humidité différent dans un endroit fermé avec le capteur. Pour y arriver, il s'agit de faire une solution aqueuse où le solvant c'est l'eau et le soluté est un sel utilisé parmi les cinq jusqu'à saturation du sel dans un bocal en verre (un sel à la fois) ; ensuite laisser pendant une ou deux heures pour que le taux d'humidité dans le milieu où il est fermé se stabilise ; afin de placer le capteur sans kapton sous test pour mesurer le paramètre S11 ensuite faire de même pour le multi-capteur. Donc cinq solutions aqueuses ont été fabriquées pour avoir cinq taux d'humidité différents afin de mesurer le paramètre S11 du capteur et multi-capteur soumis à ces différents taux d'humidité.

b) Utilisation du capteur



Figure 2-19 : utilisation du capteur pour les test d'humidité

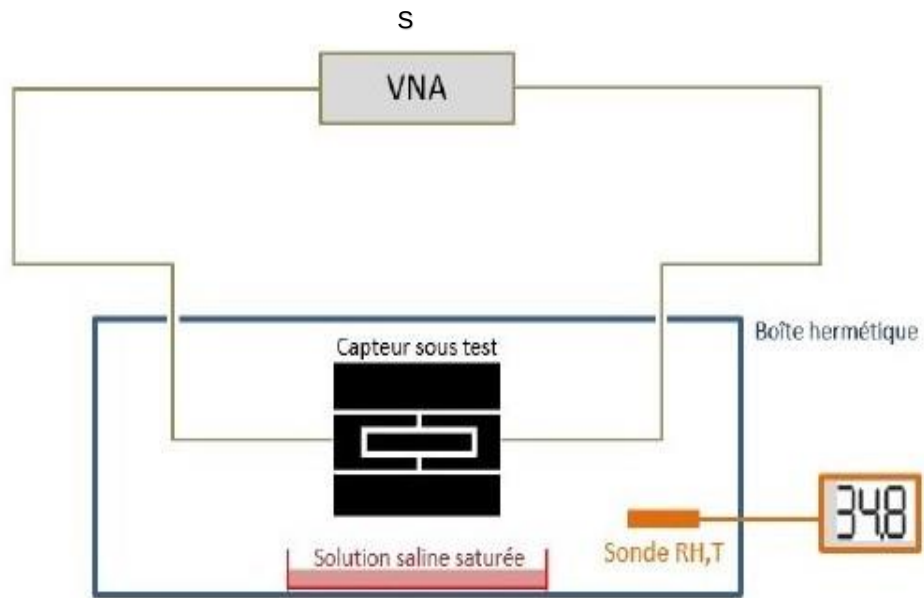


Figure 2-20 : montage test d'humidité

La Figure 2-19 présente comment le capteur est utilisé pour être testé ; lorsque la solution est saturée, le bocal dans lequel la solution acqueuse se trouve est déjà posé dans une boîte hermétique renfermant également le capteur à tester , deux petites ouvertures sont faites sur la boîte pour connecter le capteur au circuit RF utilisé pour la mesure des paramètre S et une autre est faites pour introduire une sonde afin de se renseigner sur le taux d'humidité et d'être sûr de son uniformité dans la boîte.

La sonde Elitech GSP-6 est utilisé ici comme un enregistreur de données de température et

d'humidité pouvant enregistré jusqu'à 16000 points. Il peut être également vu comme un multi-capteur de température et d'humidité. Il est utilisé en le connectant à un ordinateur portable dans lequel est installé le logiciel Elitechlog par un câble USB . L'interface du logiciel permet de visualiser l'évolution du taux d'humidité et de température au cour du temps comme le montre la Figure 2–21 et ainsi se rassurer de la stabilité du taux d'humidité dans la boite lorsque la courbe d'humidité de couleur verte devient constante. Il est également présenté à la Figure 2–22.



Figure 2–21 : Elitech GSP-6

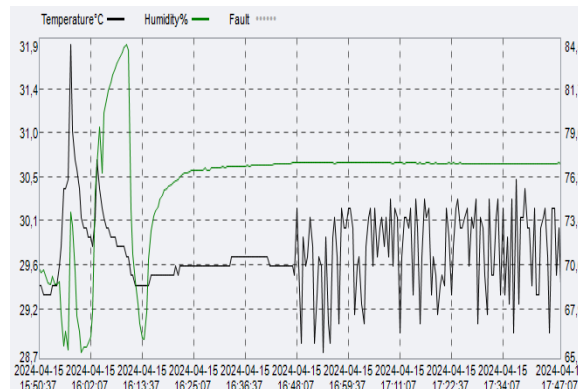


Figure 2–22 : interface du logiciel Elitechlog

2.3.3 Tests de température

Pour le test de température , une résistance chauffante et un thermocouple sont nécessaire pour sa reussite.

a) Résistance chauffante

La résistance chauffante utilisé est le PTCA - 40 ohms. Son role est de faire varier la température du capteur sous test par contact thermique entre eux , en le posant sur la résistance chauffante. Elle est illustrée à la Figure 2–23. En effet pour ce test, il est crucial d'implanter un environnement où la température varie au cour du temps et d'y placer le capteur sous test afin que par transfert thermique

sa température varie aussi, en d'autres termes, il faut tester le capteur lorsqu'il est à des températures différentes fixes donc lui imposer des valeurs auxquelles il faut effectuer les mesures du paramètre S_{11} ; d'où l'usage de la plaque chauffante pour arriver à le faire.

En effet le capteur est placé au dessus de la resistance chauffante PTCA-40 ohms qui est alimenté sous une tension de 12 V par une source DC d'après sa fiche technique ; lorsqu'elle est alimenté, sa température commence à augmenter , ainsi par transfert thermique la température du capteur augmente également c'est ainsi que la première étape pour controler la température du capteur CPW lors du test est atteinte.



Figure 2–23: résistance chauffante PTCA – 40 ohms

Tableau 2-7: caractéristique du PTCA – 40 ohms

Résistance(ohms)	40
Tensions d'opération (volt)	12
Température maximale	110
Puissance max (watt)	10

La deuxième étape consiste à visualiser comment la température du capteur évolue au cour du temps. Pour s'assurer que cette évolution permet la réussite du test, il est essentiel qu'elle soit aussi lente que possible afin d'en garantir le contrôle. Ainsi, certaines valeurs de température pourront être définies pour effectuer les mesures du paramètre S_{11} tout au long du test et s'assurer qu'elles sont bien respectées au fil du temps. Pour cela, l'utilisation d'un thermocouple est idéale.

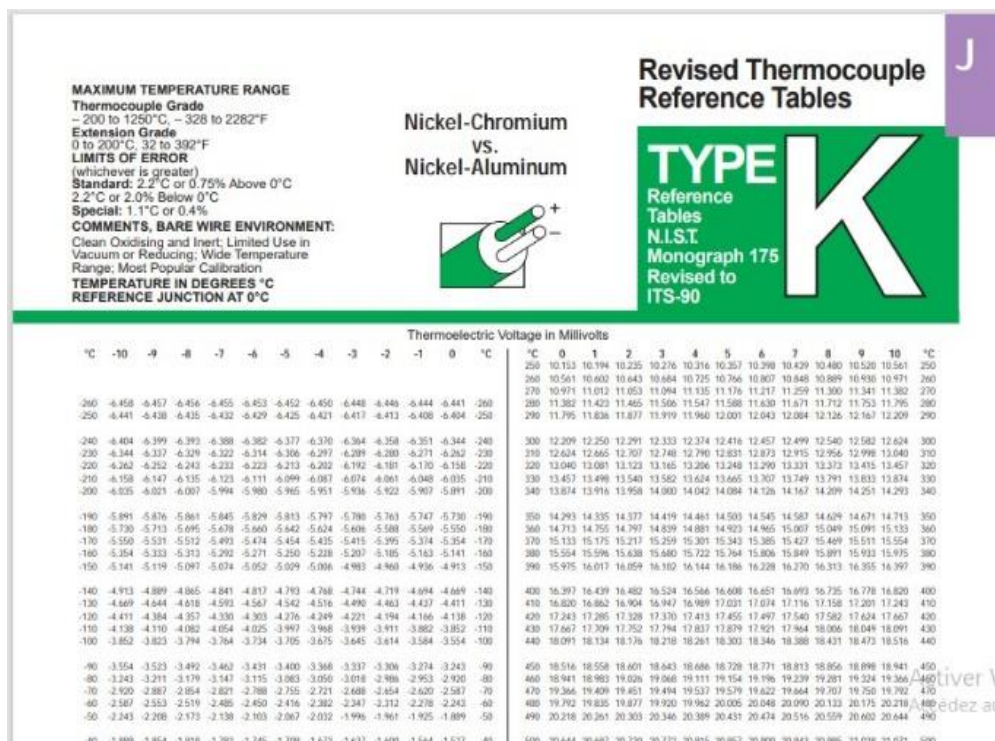
b) Utilisation du thermocouple

Le thermocouple utilisé ici est de type K, il est présenté à la Figure 2–24 :



Figure 2–24 : thermocouple de type K

Il fonctionne comme un détecteur de température, en effet il est utilisé ici pour convertir la température qu'il détecte en tension qui est lue par un voltmètre et à partir d'un tableau de correspondance tension – température illustré à la figure 2–25, l'évolution de la température du capteur au cours du temps est connue.



Dans un premier temps le capteur était en contact direct avec la résistance chauffante, la Figure 2–26 illustre cela :

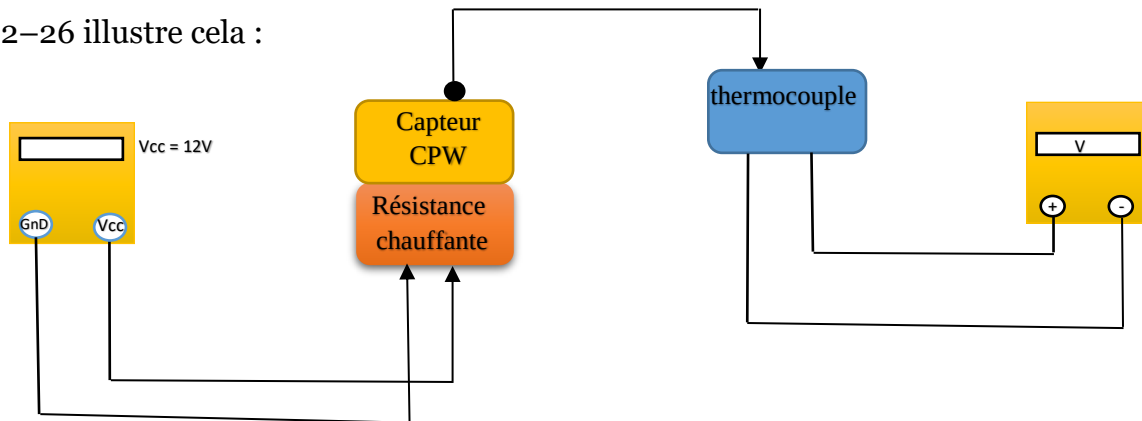


Figure 2–26 : utilisation du thermocouple

le montage de test est présenté à la figure 2–29.

À partir du thermocouple, le taux de variation de la température du capteur a été évalué en notant d'abord dans un fichier Excel les valeurs de tension lue sur un voltmètre connecté au thermocouple tous les une minute sur une plage d'environ une heure ensuite en faisant la correspondance tension-température et enfin en utilisant la formule suivante :

$$\tau = \frac{\theta_f - \theta_i}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Avec :

θ_f : température maximale du capteur (°C)

θ_i : température initiale du capteur (°C)

Δt : la durée de la variation (min)

Le taux de variation obtenue était de $T = 4^\circ\text{C}/\text{min}$, ce qui montre une variation assez rapide de la température du capteur ne permettant pas de faire les mesures du paramètre S_{11} à une valeur précise et fixe ou faiblement varié de la température du capteur pendant au moins 5 minutes. Ainsi il fallait trouver un moyen de ralentir cette variation de température, pour y arrivé, un paquet de feuilles conductrices de cuivre a été ajouté entre la résistance chauffante et le capteur pour assurer toujours le transfert thermique tout en ralentissant la variation et ainsi obtenir un taux de variation faible soit au trop $T = 1^\circ\text{C}/\text{min}$ ce qui permet de fixer certaines valeurs de température du capteur pour lancer le test et faire les mesures à ces valeurs. Figure 2–27 montre le montage fait avant de mettre les feuilles de cuivre entre la résistance chauffante et le capteur et la Figure 2–28 illustre le montage fait avec les

feuilles de cuivre entre eux.



Figure 2-27 : contact direct entre capteur et résistance chauffante

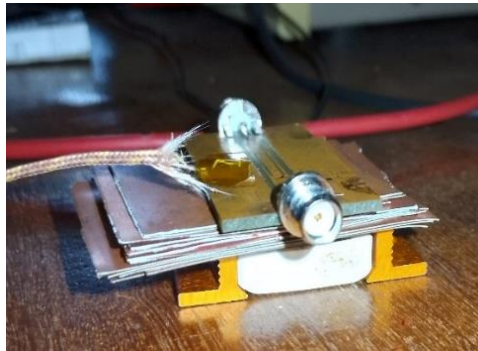


Figure 2-28 : feuilles de cuivre entre capteur et résistance chauffante

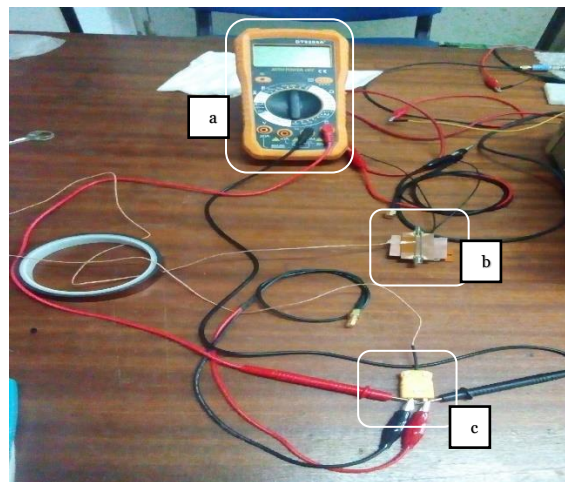


FIGURE 2-29 : CIRCUIT DE TEST AVEC THERMOCOUPLE

Voici le montage de test à la figure 2-29

- Le bloc a montre un multimètre utilisé pour visualiser les tensions converties par le thermocouple.

- Le bloc b montre les feuilles conductrices placées entre le résonateur CPW et la résistance chauffante
- Le bloc c montre le thermocouple dont l'autre extrémité est placé sur le résonateur pour détecter sa température.

2.4 Conception et réalisation des circuits

2.4.1 Outils de conception

Pour la conception et la simulation de circuits hyperfréquences, principalement deux logiciels tel que: Ansys HFSS et ADS (Advanced Design System) dans le cadre de ce mémoire, permettent d'y arriver.

a) Logiciel de simulation HFSS

Le logiciel "TtextitANSYS HFSS" est la référence de l'industrie pour la simulation de champs électromagnétique en haute fréquence. Grâce à son très haut niveau de précision, à ses solveurs avancés et ses technologies de calcul parallèle haute performance, il est un outil indispensable pour les tâche de conception précises et rapides d'appareils électroniques haute fréquence, ultra haut-débit et leur intégration sur plateforme. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé la version 2015.

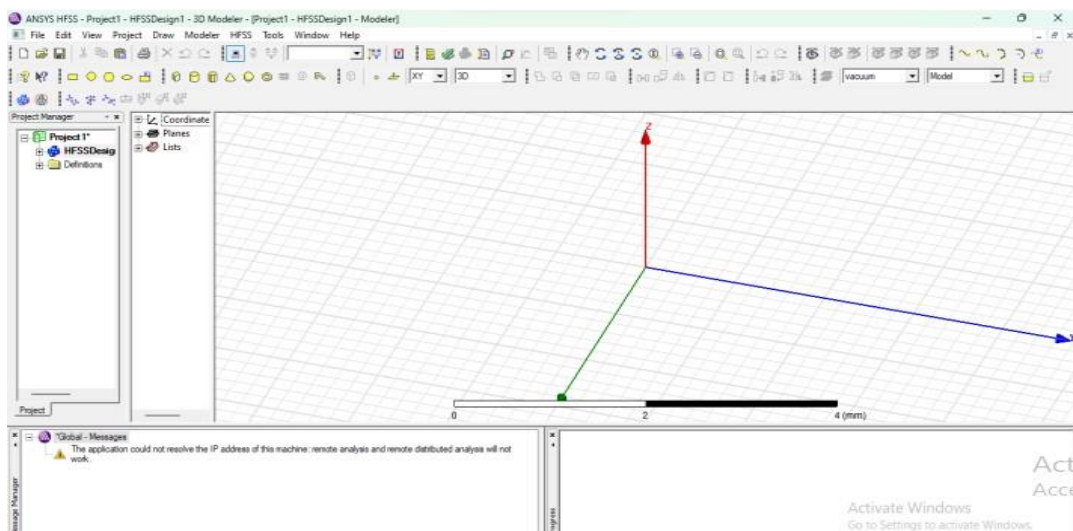


FIGURE 2–30 : VISUALIZATION DE INTERFACE HFSS

b) Logiciel de simulation ADS

ADS (Advanced Design System) : est un logiciel de simulation et de conception électronique qui intègre divers outils pour la conception de circuits et de systèmes RF. Pour ce mémoire, ADS est utilisé pour créer les fichiers de production afin de passer à la fabrication en important le circuit simulé du logiciel HFSS et en le convertissant en fichier gerber. Son interface graphique est présentée par la Figure 2–31 où (1) représente les onglets constitués de plusieurs boutons; (2) représente les raccourcis de création ou d'ouverture d'un nouveau work- space, d'un Layout, d'une bibliothèque ou d'un schématique et (3) représente l'interface de base du logiciel où se trouve le nouveau projet créé.

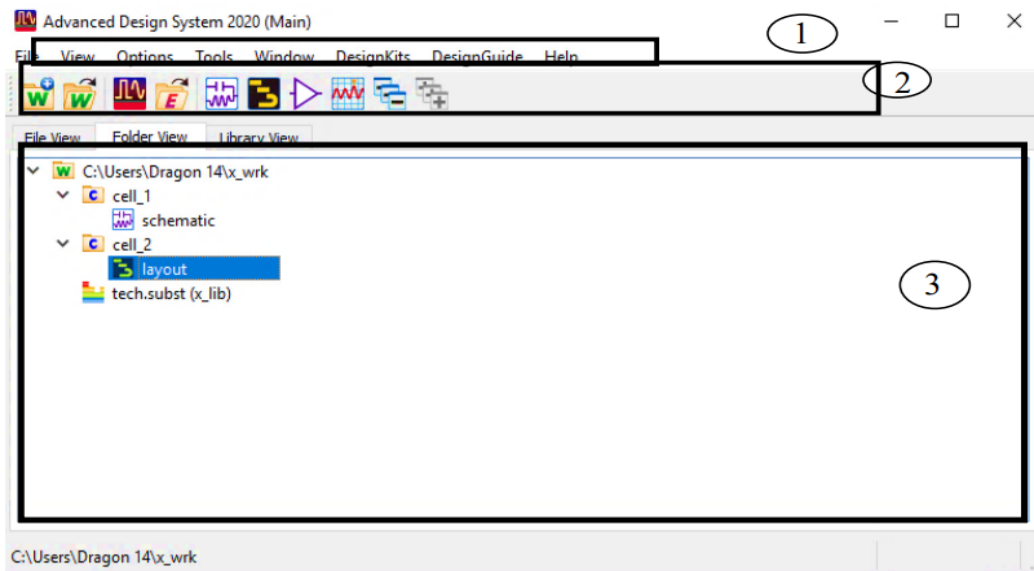


Figure 2–31 : Interface d'ouverture du logiciel ADS

La version utilisée pour nos simulations est la version 2020 d'ADS car elle est plus robuste que les versions antérieures. Dans ce logiciel linecalc a été utilisé particulièrement pour calculer les dimensions du conducteur central et des lignes du résonateur CPW.

➤ LineCalc

Est une calculatrice intégrée du logiciel ADS qui permet de calculer les dimensions d'une ligne (ligne micro-ruban, ligne triplaque, câble coaxial ...) et les impédances en fonction des paramètres du substrat. La figure 2–32 présente l'interface de calcul de **LineCalc** où (1) représente les boutons où

l'on choisit le type de ligne à concevoir. (2) représente les paramètres du substrat; (3) représente la fréquence de fonctionnement et (4) représente les paramètres calculés de la ligne.

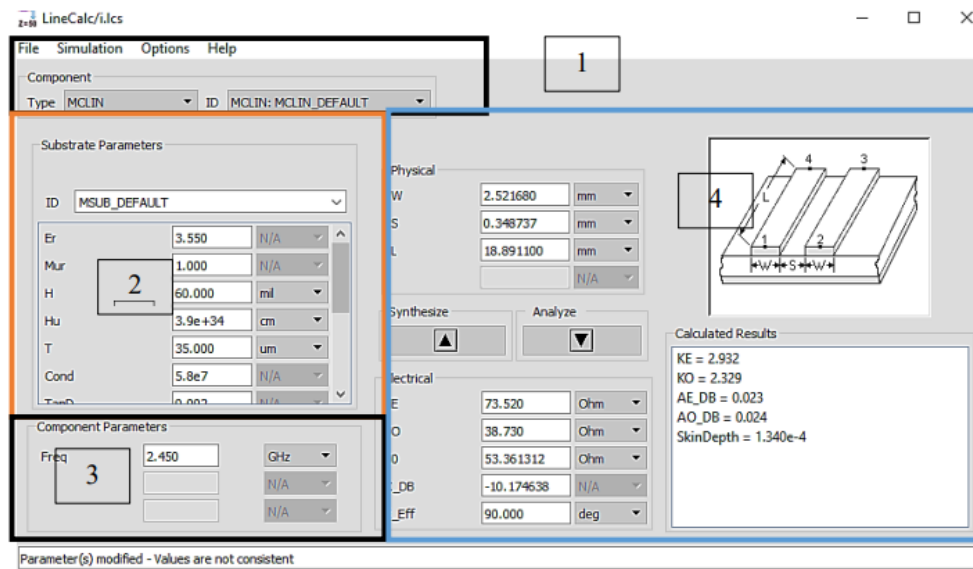


FIGURE 2–32 : INTERFACE DE LINECALC

Ces outils de conception ont permis de réaliser des simulations précises et de valider les designs théoriques avant de passer à la phase de fabrication.

c) Paramètre S

On ne peut pas analyser tous les réseaux à l'aide des paramètres Z ou Y. Ils sont seulement bons pour des fréquences basses; il est difficile de mesurer ces paramètres directement en hautes fréquences. Tout dispositif micro-onde linéaire peut être caractérisé par une matrice particulière appelée matrice de répartition ou matrice diffusion ou encore matrice S. Cette matrice constitue l'outil de base pour l'étude des transferts de puissance entre les entrées et les sorties, des réflexions sur les entrées et les sorties des multi-pôles linéaires. Elle s'obtient en décomposant la tension et le courant aux ports d'accès d'une jonction en onde incidente et réfléchi comme le montre la Figure 2–33. chaque accès i délimité par un plan de référence Γ_i , est parcouru par une onde entrante a_i se propageant vers la jonction et une onde sortante b_i se propageant dans le sens inverse, comme le montre la Figure 2–33-b.

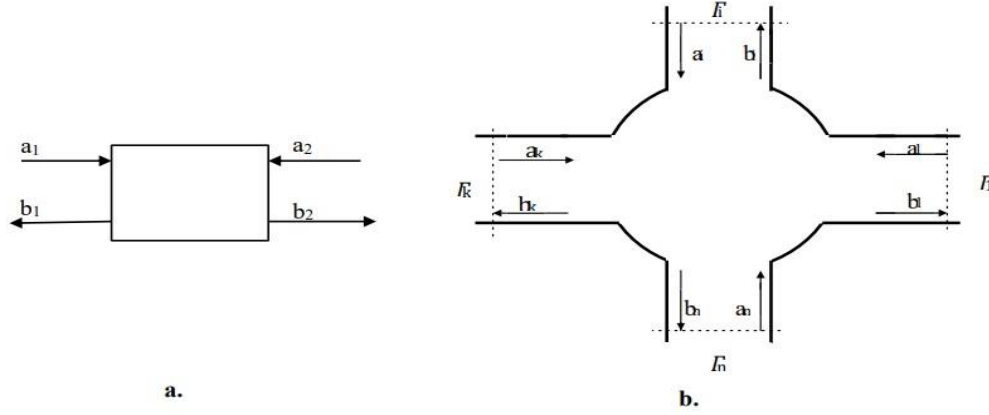


Figure 2-33 : Quadripôle ; a. jonction 2 ports, b. jonction 4 ports [8]

Dans le cas d'une jonction à deux ports, la matrice S est une matrice carrée d'ordre 2 données par:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Ainsi, le paramètre S_{ij} signifie que l'on se place au port j et on observe la puissance qui vient du port i . En logarithme, S_{ii} représente le coefficient de réflexion du port i et S_{ij} représente le coefficient de transmission du port i au port j .

Dans le cas de la jonction 4 ports, la matrice S est une matrice carrée d'ordre 4 donnée par:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{41} & \cdots & S_{44} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

De même que le cas d'une jonction à deux ports, le paramètre S_{ij} signifie que l'on se place au port j et on observe la puissance qui vient du port i . Donc, chaque terme S_{ij} de la matrice S représente une fonction de transfert entre l'entrée a_i et la sortie b_i ($i \neq j$).

En faisant usage des propriétés physiques du composant micro-onde telles que l'adaptation, la symétrie et la conservation d'énergie, la matrice S est décrite à :

Un composant est adapté à son accès i si aucun signal n'est réfléchi par celui-ci et défini par:

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \text{ avec } a_i \neq 0 \quad (2.3)$$

Un composant est adapté à tous ces accès lorsque tous les termes diagonaux de sa matrice S sont

nuls.

La symétrie est une propriété mathématique que l'on peut appliquer aux champs électromagnétiques dans un circuit. Un circuit est symétrique si ses propriétés et sa matrice S sont invariantes par symétrie. Cette condition impose que la géométrie du circuit présente une symétrie, mais elle n'est pas suffisante. Pour être symétrique, un circuit doit être composé de matériaux dont les propriétés sont réciproques. On a :

$$S_{ii} = S_{jj} \quad \text{si } i \neq j \quad (2.4)$$

Ainsi, pour un circuit quatre ports idéal, c'est-à-dire sans perte, réciproque et homogène, sa matrice de diffusion est donnée par:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \alpha & \beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & \beta \\ \beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & \beta & \alpha & 0 \end{pmatrix} \quad \text{avec } \alpha = s_{12} \text{ et } \beta = s_{13} \quad (2.4)$$

2.4.2 Technologies de fabrication

a) Substrats

Pour la fabrication du résonateur CPW dans le cadre de ce mémoire, il faut imprimer ce circuit sur un substrat diélectrique. Pour des raisons de disponibilité, les substrats ayant été utilisé sont le Roger4835, Duroid 5880, FR4 leurs caractéristiques sont données dans les tableaux ci-dessous :

TABLEAU 2-8: CARACTÉRISTIQUE DU SUBSTRAT ROGERS 4835

	Caractéristiques	valeurs
1	Permittivité relative ϵ_r	3.48
2	Pertes tangentielles $\tan \delta$	0.0037
3	Epaisseur du substrat h	1.27mm
4	Epaisseur du cuivre t	35 μ m

TABEAU 2-9 : CARACTÉRISTIQUE DU SUBSTRAT DUROID 5880

	Caractéristiques	valeurs
1	Permittivité relative ϵ_r	2.20
2	Pertes tangentielles $\tan \delta$	0.0009
3	Epaisseur du substrat h	1.57mm
4	Epaisseur du cuivre t	35 μ m

Tableau 2-10 : Caractéristique du substrat FR4

	Caractéristiques	valeurs
1	Permittivité relative ϵ_r	4.4
2	Pertes tangentielles $\tan \delta$	0.0009
3	Epaisseur du substrat h	1.57mm
4	Epaisseur du cuivre t	35 μ m



Figure 2-34 : Plaque de substrat FR4

b) Machine d'impression

Parmi les 4 types de procédé d'impression existant (gravure chimique, gravure par rayons ultraviolets, gravure mécanique et gravure au laser), celui ayant été utilisé pour la fabrication du circuit en question est la gravure mécanique. Ce procédé consiste à retirer des parties spécifiques de la

couche de cuivre présente sur un substrat afin de dessiner des géométries particulières Figure 2–35.



Figure 2–35 : exemple de gravure sur la couche de cuivre d'un substrat

Dans le cadre de la fabrication de nos circuits, la machine d'impression a été le LPKF ProtoMat S103 illustrée à la Figure 2–36, présent au laboratoire CPU de l'université de Yaoundé I. Il est recommandé pour les matériaux RF et hyperfréquences plus souple à base de PTFE ; aussi il est capable de traiter facilement des applications de PCB de pointe du fait de ses fonctionnalités notamment la reconnaissance optique fiduciaire et la résolution de fraisage de 0,002 mil.



Figure 2–36 : LPKF ProtoMat S103

c) **Connecteur SMA**

Une fois les cartes imprimées, il est important d'y ajouter un contact par lequel la puissance pourra transiter. A cet effet des connecteurs SMA de numéro BU-1420711821 ont été utilisés (Figure 2–37). La Figure 2–38 montre comment ces connecteurs ont été utilisés pour la conception du résonateur.



Figure 2-37 : connecteur SMA

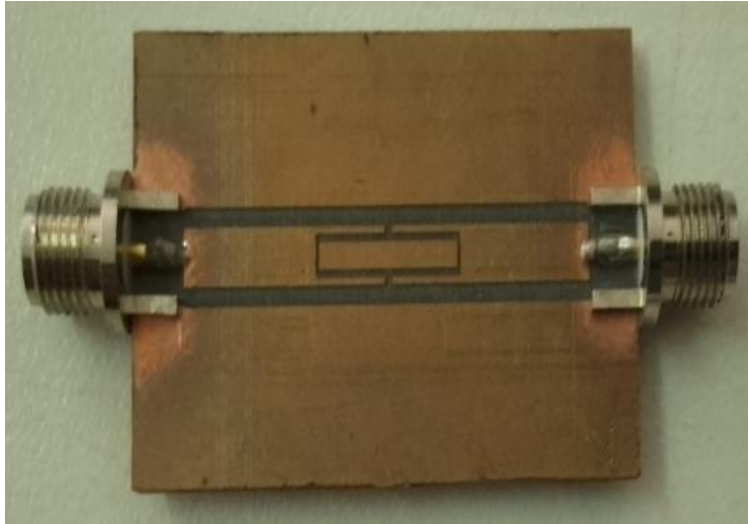


Figure 2-38 : résonateur CPW avec connecteur SMA

Chapitre 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Capteur d'humidité en technologie CPW

Dans cette section, la structure résonante formée par le résonateur CPW présenté plus haut est utilisée pour la réalisation du capteur CPW, avec une preuve de concept pour la détection de d'humidité. Le principe de cette détection est basé sur la sensibilité diélectrique du substrat FR4 sur lequel est imprimé le résonateur CPW à l'humidité. Un prototype a été réalisé et des résultats démontrant une variation de fréquences de résonances ont été obtenus. La réalisation du prototype, le protocole de test, l'analyse des résultats obtenus y sont présentés.

Le montage du banc de test utilisé pour tester le capteur aux différentes conditions d'humidité est donné à la

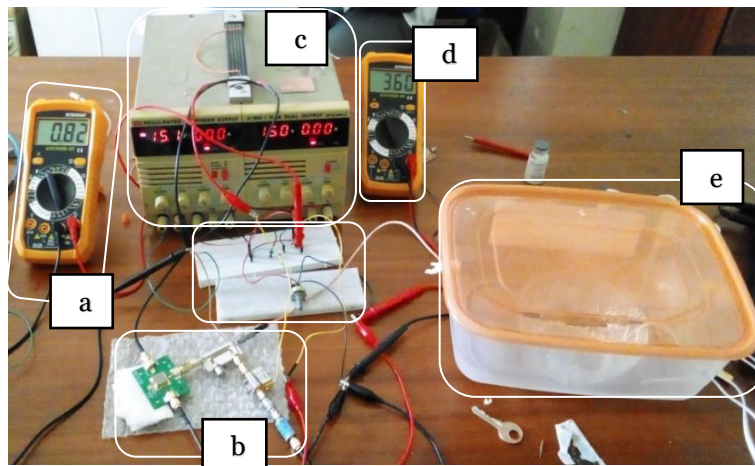


FIGURE 3–1 : BANC DE TEST D'HUMIDITÉ

- Le bloc a montre un multimètre utilisé pour visualiser les tensions de sorties du dispositif de test.
- Le bloc b montre le circuit RF utilisé pour les mesures du paramètre S_{11} du résonateur CPW.
- Le bloc c montre la source d'alimentation.
- Le bloc d montre un multimètre utilisé pour visualiser les tensions d'entrée du dispositif de test.
- Le bloc e montre le circuit sous test.

L'atténuation du coefficient de réflexion du résonateur ; le signal S_{11} a été mesuré avec la chaîne RF présentée à la Figure 2–7 et Figure 2–15. L'impact de la variation du taux d'humidité sur le

capteur d'humidité a été déterminé via l'évaluation du décalage de fréquence de la fréquence de résonance. Pour les différentes concentrations d'humidité ont pu être obtenu grâce aux solutions salées suivantes : Chlorure de Potassium (KCl), l'Iodure de potassium (KI), Chlorure de sodium (NaCl), Iodure de sodium (NaI), Hydroxyde de sodium (NaOH). Grâce à la préparation dans des boîtes hermétiquement fermées, la plage d'humidité de 24,4 RH% à 78,3 RH% a pu être couverte pour les tests d'humidité sur le résonateurs CPW. La réponse du capteur plongé dans un environnement d'humidité contrôlé est illustrée à la Figure 3-2 .

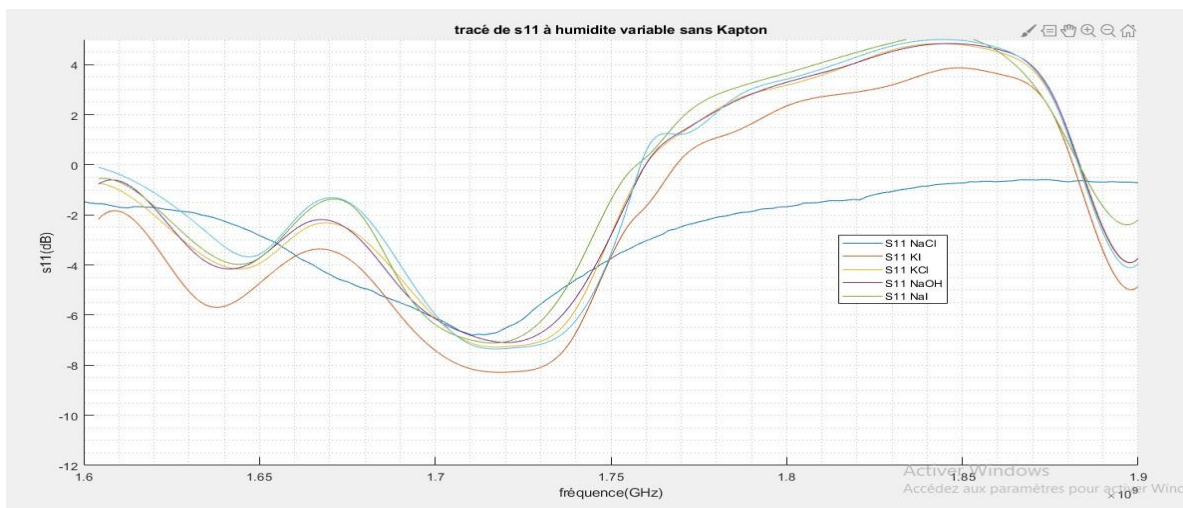


Figure 3-2 : Variation du paramètre s11 avec le taux d'humidité

Pour chaque mesure, le dispositif de détection a été connecté au circuit RF présenté à la Figure 2-16 et maintenu à l'intérieur de la boîte où la solution de sel saturé a été placée. Le relevé des mesures est effectué après une attente de 1 heure, la stabilisation complète du système avant chaque acquisition de données. D'excellentes performances de répétabilité et stabilité sont soulignées de ces tests. Le temps de réponse et le temps de récupération du capteur sont relativement rapides, et sont respectivement inférieurs à 2 s et environ 4 s.

❖ Fréquence de résonance en fonction de l'humidité

La réponse du capteur proposé lors de l'exposition à l'humidité est décrite à la Figure 3-3. En présence d'humidité le résonateur présente un décalage de fréquence de résonance de 10 MHz, pour une plage de variation de taux d'humidité de 24,4 RH% à 78,3 RH%.

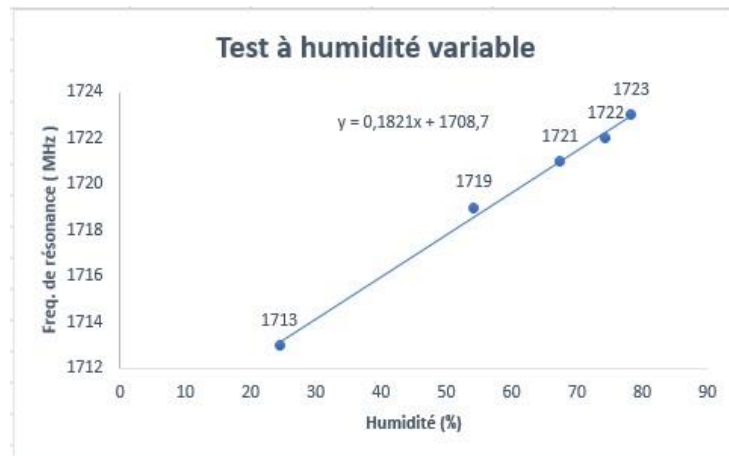


Figure 3–3 : variation de la fréquence de résonance en fonction de l'humidité

Ainsi, une variation du taux d'humidité environnant entraîne un décalage exclusif de la fréquence de résonance du dispositif. Ce décalage de 10 MHz de la fréquence de résonance traduit le principe de détection d'humidité du capteur CPW et correspond à une sensibilité de 182.1 kHz / RH%.

3.2 Capteur de température en technologie CPW

Dans cette section, une structure résonante formée par le résonateur CPW est également utilisée pour la réalisation du capteur CPW RFD, ici avec une preuve de concept pour la détection de température. Le principe de cette détection est basé sur la sensibilité diélectrique du substrat FR4 sur lequel est imprimé le résonateur CPW, qui est à la base un substrat thermosensible. Un prototype a été réalisé et des résultats démontrant une variation de résonateur CPW RFD ont été mesurés. La réalisation du prototype, le protocole de test, l'analyse des résultats obtenus y sont présentés.

Le montage du banc de test utilisé pour tester le capteur aux différentes conditions de température est donné à la Figure 3–5.

En utilisant le thermocouple, le constat est que la température augmente de manière graduelle avec le temps, avec une moyenne de 1°C/min, partant de 4°C aux conditions ambiantes. En faisant les mesures tous les 7 min, la Figure 3–4 montre l'évolution de la température avec le temps lors de ce test. Les points de mesure sont : 4 °C, 10 °C, 16 °C, 22 °C, 28 °C, 34 °C et 40 °C.

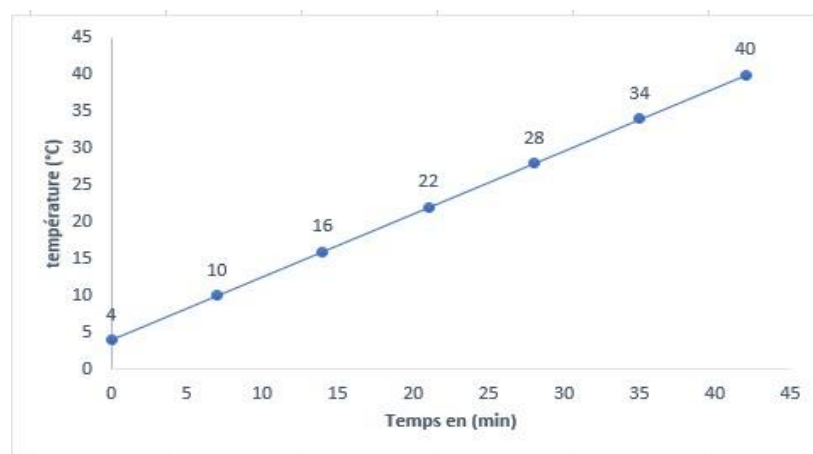


Figure 3-4 : Variation de température au cours du temps

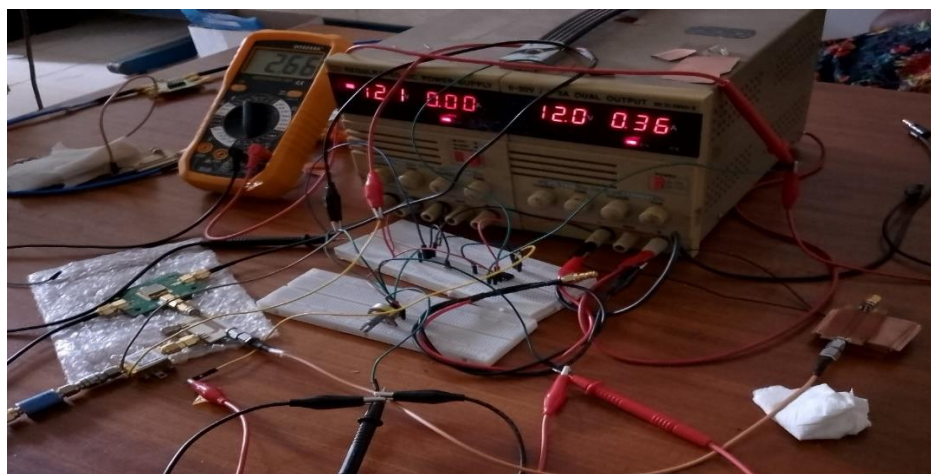


Figure 3-5 : montage du banc de test de température du capteur

Le module du coefficient de réflexion du résonateur ; le paramètre S_{11} a été mesuré avec la chaîne RF présentée à la Figure 3-5. L'impact de la variation de la température sur le capteur de température a été déterminé via l'évaluation du décalage de la fréquence de résonance.

Grâce à la résistance chauffante, la plage de température de 4 °C à 40 °C a pu être couverte pour les tests de température sur le résonateurs CPW. La réponse du capteur dans un environnement de température contrôlé est illustrée à la Figure 3-6.

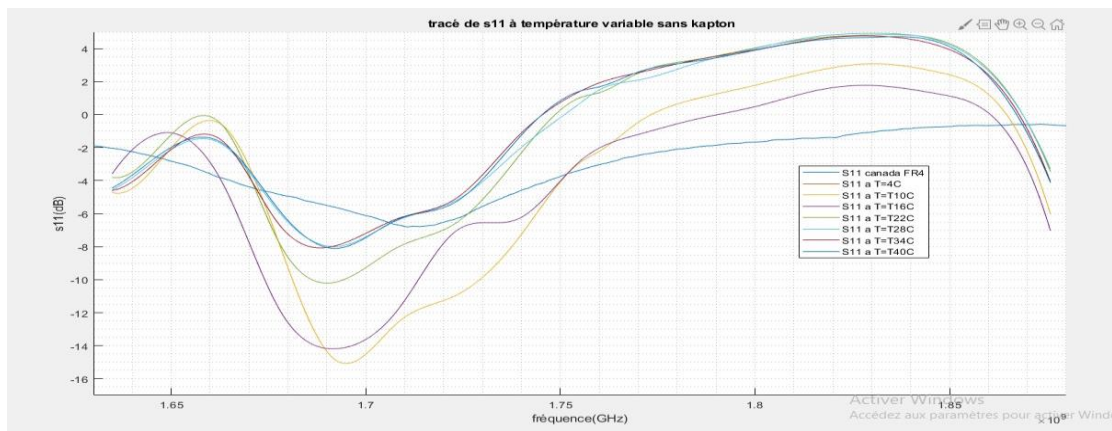


Figure 3-6 : Variation du paramètre S11 en module avec la température mesurée

❖ Fréquence de résonance en fonction de la température

La réponse du capteur CPW lors de l'exposition à la température est décrite à la Figure 3-7. En présence de la température le résonateur présente un décalage de fréquence de résonance de 6 MHz, pour une plage de variation de température de 4 °C à 40 °C.

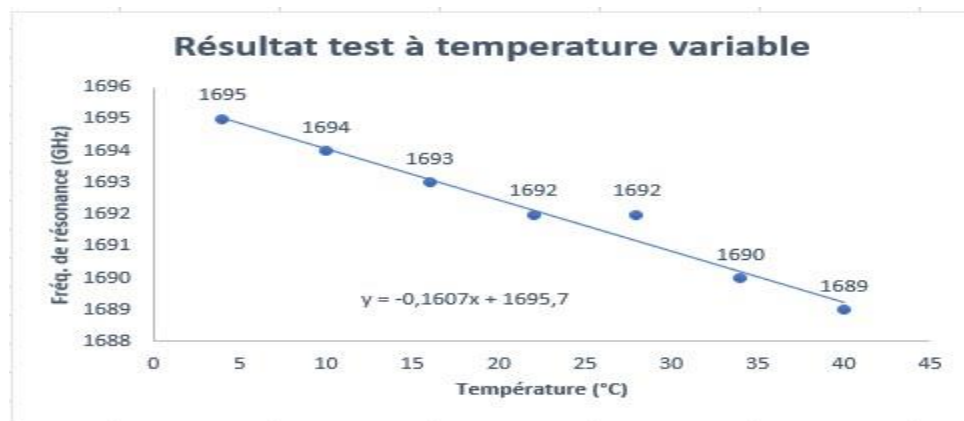


Figure 3-7 : fréquence de résonance fonction de la température

Ainsi, une variation de la température environnant entraîne un décalage exclusif de la fréquence de résonance du dispositif. Ce décalage de 6 MHz de la fréquence de résonance traduit donc le principe de détection d'humidité du capteur CPW et correspond à une sensibilité de 160.7 kHz / °C.

3.3 Multi-capteur en technologie CPW

Les performances de sensibilité croisée du Multi-capteur en technologie CPW ont également été évaluées dans la situation où une feuille de Kapton a été déposé au-dessus du résonateur CPW

imprimé sur le FR4 comme présenté dans les sections précédentes ensuite placé sous test dans un environnement contrôlé avec une variation de la température ou du taux d'humidité.

Le montage du banc de test utilisé pour tester le multi-capteur aux différentes conditions de température est donné à la Figure 3–8.

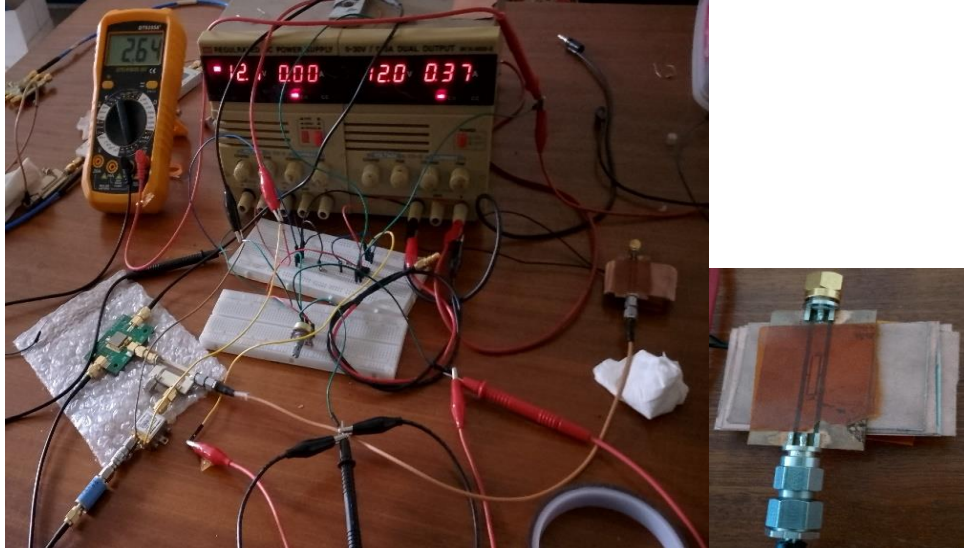


Figure 3–8 : Montage banc de test multi-capteur

Le module du coefficient de réflexion de ce multi-capteur ; le paramètre S_{11} a été mesuré avec la chaîne RF présentée à la Figure 3–8 . L'impact de la variation de la température sur ce multi-capteur a été déterminé via l'évaluation du décalage de la fréquence de résonance.

Grâce à la résistance chauffante, la plage de température de 4 °C à 40 °C a pu être couverte pour les tests de température de ce multi-capteur. Ainsi sa réponse dans cet environnement de température contrôlé est illustrée à la Figure 3–9 .

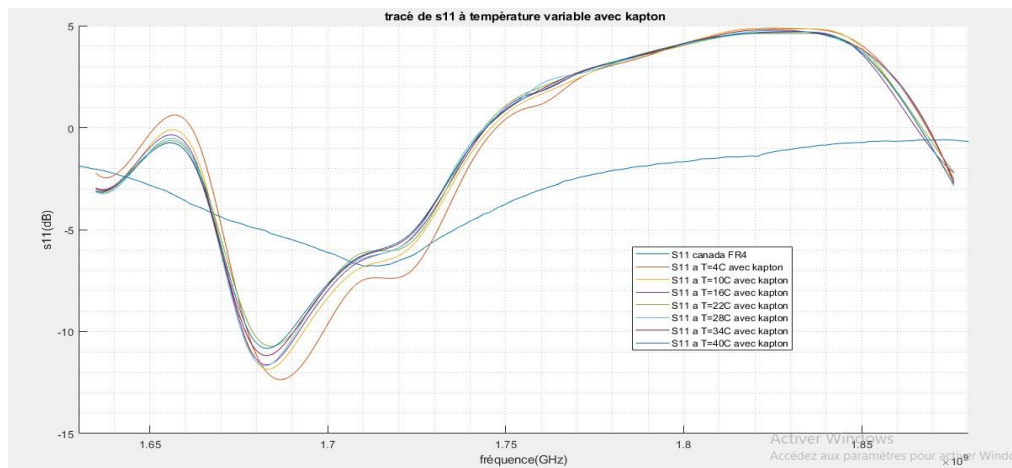


Figure 3–9 : Variation du paramètre S11 en module avec la température mesurée

❖ Sensibilité croisée

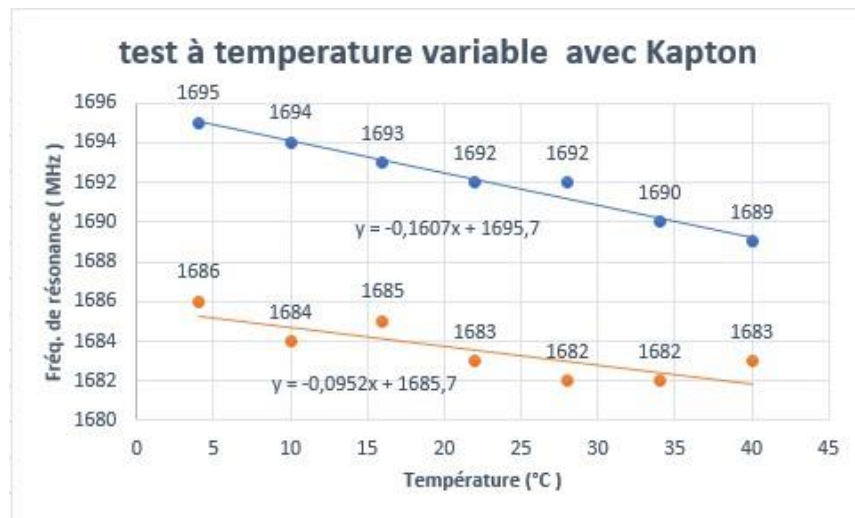


Figure 3–10 : Variation de la fréquence de résonance du multi-capteur

Ainsi, la courbe en rouge à la Figure 3–10 montre la variation de la température environnant entraînant un décalage exclusif de la fréquence de résonance du multi-capteur. Ce décalage de 4 MHz de la fréquence de résonance traduit donc le principe de détection de température du multi-capteur CPW et correspond à une sensibilité de 95.2 kHz / °C. Or la courbe en bleu avec une sensibilité de 160,7 kHz / °C traduit donc le principe de détection de température du capteur CPW sans Kapton comme présenté plus haut. La différence entre ces deux sensibilités est de 65,5 kHz/°C, cette différence peut s'expliquer du fait que la sensibilité du Kapton à la température s'est ajouté à celle du FR4 à ce même paramètre, ce qui prouve le concept de sensibilité croisée du multi-capteur CPW.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail était de concevoir un multi-capteur micro-onde imprimé pour les applications de l'internet. Pour ce faire, le travail effectué a été subdivisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, les généralités sur les capteurs micro-ondes imprimés ont été présentées dans un premier temps, ensuite l'état de l'art sur les capteurs micro-onde à lignes de transmission a également été présenté. Au chapitre deux, les méthodes et matériels nécessaires à la conception à la réalisation et aux test des capteurs ont été présentés : Et enfin le troisième et dernier chapitre est consacré aux résultats accompagnés de discussions. Il en ressort que l'ajout des discontinuités sur une ligne de transmissions à guide d'onde coplanaire permet d'obtenir un résonateur CPW et en utilisant un substrat sensible à l'humidité et à la température pour le faire confère à ce résonateur les propriétés de capteurs micro-ondes à guide d'onde coplanaire. Les simulations effectuées sur le résonateur CPW ont permis d'observer que, la modification de la permittivité relative du substrat modifie la fréquence de résonance. Lors des tests, ce résonateur à guide d'onde coplanaire imprimé sur le substrat FR4 présenté ici comme dispositif de détection d'humidité et température est testé premièrement dans un environnement contrôlé avec une humidité variant de 24,4% à 78,5%, où il présente une sensibilité de 182.1 kHz/RH%, ensuite dans un environnement contrôlé avec une température variant de 4°C à 40°C où Elle présente également une sensibilité de 160.7 kHz/°C. Ensuite une feuille de Kapton a été ajouté au-dessus du résonateur CPW et cette nouvelle structure a également été placer sous test dans un environnement contrôlé avec température et une sensibilité de 65,5 kHz/°C a pu être observée prouvant ainsi la fonction de sensibilité croisée donc la preuve de la conception d'un multi-capteur micro-onde. Cette solution environnementale présente l'avantage d'être simple, peu énergivore, à très faible coût et capable d'applications multi détectrices.

L'Ensemble des études menées et des résultats obtenus, permet d'affirmer sans ambiguïté que l'objectif principal de ce mémoire a été atteint. Cependant un certain nombre de perspectives sont à envisager. Pour de futurs travaux, les principaux axes de recherche suivants sont recommandés :

- La conception et la réalisation de capteurs passifs de paramètres environnementaux (humidité, température, fumée, pluie, etc.) sur substrats biodégradables sensibles, ces derniers étant très nombreux dans la nature, ceci dans le triple objectif de valoriser les matériaux biodégradables, de préserver l'environnement et de faire chuter drastiquement le coût de fabrication des capteurs ;
- La conception et la réalisation de capteurs passifs sur substrats flexibles pour l'acquisition des données sur des objets mobiles pour l'internet des objets ;
- Le développement de réseaux de capteurs passifs micro-ondes intégrant identification et détection.

REFERENCES :

1. Ayissi Eyebe G.F.Valery, «Conception et réalisation des capteurs micro-ondes sans fils par les Technologies d'impression, » Université Quebec à Trois-Rivières, 2018, Thèse de Doctorat.
2. Ayissi Guy Eyebe et al, «Microwave sensing schemes of CPW resonators fully printed on humidity sensitive substrates, » IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019.
3. Guy Ayissi Eyebe et al, «Investigation on temperature-dependent dielectric properties of ETFE, » ELSEVIER/ Sensors and Actuators, vol. A 290, pp. 215-221, 2019.
4. D. M. POZAR, Microwave Engineering fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
5. Guy Ayissi Eyebe, Frederic Domingue, Towards Substrate-Sensitive Chipless Tags for Sensing Applications, IEEE, 2019.
6. Lu, D., et al. Humidity dependent permittivity characterization of polyvinyl-alcohol film and its application in relative humidity RF sensor. In Microwave Conference (EuMC), 2014 44th European. 2014.
7. Byrd, P.F. and M.D. Friedman, Handbook of elliptic integrals for engineers and physicists. Vol. 67. 2013: Springer.
8. Amin, E.M., N.C. Karmakar, and B. Winther-Jensen, Polyvinyl-alcohol (pva)-based RF humidity sensor in microwave frequency. Progress in Electromagnetics Research B, 2013. 54: p. 149-166.
9. Domwa Yves Merlin, “Adaptation d'impédance d'une antenne et d'un transducteur en technologie coplanaire imprimés sur des substrats de permittivités différentes pour la conception des capteurs micro-ondes passifs”, Mémoire de Master, Université de Yaoundé I, 2021.
10. Fongou Tagny Dylan Landry, “Modélisation d'un coupleur directionnel micro-onde combinant lignes couplées et fentes pour opération dans une bande étroite”, Mémoire de Master,

Université de Yaoundé I, 2022

11. M. M. Jatlaoui, Capteurs Passifs à Transduction Electromagnétique Pour la Mesure Sans Fil de La Pression, Thèse, Université de Toulouse, Avril 2009.
12. Hettak, K., et al., A class of novel uniplanar series resonators and their implementation in original applications. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1998.
13. Ndoye, M., et al., Passive Monolithic Microwave Multisensor based on N coupled Substrate Integrated Resonators for Environmental Detection, in EuMW. 2016.
14. Simons, R.N., Coplanar waveguide circuits, components, and systems. Vol. 165. 2004: John Wiley & Sons.
15. Wei, Y.M., et al., A novel coplanar waveguide resonator on flexible substrate. OptikInternational Journal for Light and Electron Optics, 2016.
16. Wadell, B.C. and B.C. Wadell, Transmission line design handbook. 1991, Norwood, Mass.: Artech House. xvi, 510 p.
17. Mohamed Saadaoui, Optimisation des Circuits Passifs Micro-ondes Suspendus Sur Membrane Diélectrique, Thèse de doctorant de l'UPS de Toulouse, Novembre 2005.
18. M. M. Jatlaoui, F. Chebila, I.Gmati, P.Pons, H.Aubert, New Electromagnetic Transduction Micro-sensor Concept For Passive Wireless Pressure Monitoring Application, The 15th Conference on Solid-State Sensors, Actuators & Microsystems, Transducers 2009, June 21-25 2009, Denver, Colorado, USA.
19. K.S Kundert, Introduction to RF simulation and its application, IEEE Journal of SolidState Circuits, Vol. 34, No. 9, September 1999.
20. Jon S. Wilson, Sensor Technology Handbook, Elsevier 2005.
21. Joseph F. White, High Frequency Techniques: an introduction to RF and Microwave Engineering, Wiley-Interscience, 2004.
22. K. Wu, D. Deslandes, and Y. Cassivi, The substrate integrated circuits- A new concept for high-

- frequency electronics and optoelectronics, 2003 Proc. TELSIKS, Serbia and Montenegro vol. 1.
23. K.G.Ong, C.A. Grimes, C.L. Robbins, R.S. Singh, Design and application of a wireless, passive, resonant-circuit environmental monitoring sensor, Sensors and Actuators A 93 (2001).
24. Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, fourth edition, John Wiley & Sons, 2016.
25. David M. Pozar, Microwave Engineering, fourth edition, John Wiley & Sons, 2012.
26. Devendra K. Misra, Radio Frequency and Microwave Communication Circuits, Wiley Interscience, 2004.
27. Dib, N.I., Theoretical characterization of coplanar waveguide transmission lines and discontinuities. 1992.