

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Département Études Spatiales

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Télécommunications Spatiales

THEME

*Simulation et réalisation d'une antenne ACP fonctionnant  
à 2.45 GHz dédiée à la détection d'humidité*

Proposé et dirigé par :

Dr. TAHRAOUI Sofiane

Dr. MOUFFOK Lila

Réalisé par :

CHETTOUH Imen

KAMEL Salima

*Soutenue devant le jury composé de :*

Pr. HEBIB Sami

Professeur

Président

Dr. OTHMANE Fadhila

MCA

Examinatrice

Promotion : 2022 / 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté d'entamer et de mener à terme ce modeste travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr TAHRAOUI Sofiane et Mme MOUFFOK Lila, on les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur rigueur et leur disponibilité durant notre préparation de ce projet de fin d'étude.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir pris le temps d'examiner et juger ce travail.

Nous tenons aussi à remercier nos chères familles pour leur soutien, leur engagement et leur amour inconditionnel.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles tous le long de notre parcours académique.

Enfin, Nous tenons à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

## **Dédicace**

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce fruit de mon parcours académique :*

*A la prunelle de mes yeux*

*A celle qui m'a donné la vie, à celle qui a su toujours me guider, à celle qui remplit ma vie de joie, à mon pilier et mon exemple dans cette vie. A toi ma très chère maman, et dieu seul sait comme que toutes les belles paroles qui puissent exister ne sauront exprimer mon amour pour toi et ne sauront être à la hauteur et l'ampleur de ta présence dans ma vie. Quoi que je dise je ne saurais te remercier comme il se doit ma lumière.*

*A mes très chers grands frères Sami, Mohammed Said et Massinissa qui n'ont cessé d'être à mes cotes et m'encourager le long de ce parcours.*

*A celles qui font mon bonheur, mes très chères grandes sœurs Lynda et Lydia en signe d'amour et de gratitude pour le dévouement dont vous avez fait preuves à mon égard.*

*A ma plus belle rencontre dans cet institut, ma très chère amie Maroua. Malgré le fait que la vie ait décidé de séparer nos chemins, nos cœurs sont toujours liés.*

*Sans oublier ma binôme et mon accompagnatrice le long de ce projet Imen.*

*A ma belle-sœur Karima et mon petit bout de sucre Maeva.*

*A celle qui rends ma vie plus belle et joyeuse par sa présence, ma très chère amie Thanina.*

*A toutes personnes qui ont voulu voir le fruit de mes efforts et ma réussite.*

*Et enfin, à tous ceux que j'ai pu croisés et avec qui j'ai pu partagé des moments de bonheur qui ont rendu ces cinq dernières années plus belles.*

*Sans votre aide, bienveillance et sacrifices ce travail n'aurait pu voir le jour, mille merci du fond du cœur.*

**KAMEL Safima**

# إهداء

قال تعالى: (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)  
إلهي لا يطيب الليل الا يشركك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك. ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة  
إلا بعفوك. ولا تطيب الجنة إلا برويتك الله جل جلاله  
من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. نبي الرحمة ونور العالمين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم  
الى من كلله الله بالهيبه والوقار الى من علمني العطاء بدون انتظار ... إلى من احمل اسمه بكل افتخار  
والذي العزيزي..  
إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمه الحياة وسر الوجود الي من كان  
دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى اعلى الحبايب  
أمي الحبيبة..  
إلى من تسعد عيني بروية وجوههم، ويفرح فؤادي بسماع رنات ضحكاتهم..  
إلى من انتظروا قطاف ثمرة جهدي طويلاً، فكانوا شركاء كل بسمه ودمعة وحسرة.. أحباب قلبي..  
أخواتي الغاليات و اخوتي الصغار ليليا.. رامي  
إلى من أبصر في عيونهن الأمل، وأستشعر من نظراتهن حب الخير لي... خالاتي الحبيبات  
إلى من تجعل الحياة أجمل بوجودها، إلى من يتزين قلبي ببسماتها... إلى صديقة المواقف لا السنين، شريكة الدرب  
صديقتي الجميلة..  
إلى من جمعتني بهم أجمل الصدف في الحياة، فكانوا خير الرفقة ونعم الأصدقاء  
إلى من تمنوا لي الخير سراً أو جهراً، إلى كل من قدّم لي دعماً ولو كان مجرد كلمة.. إلى كل من أرسل لي  
نواياه الطيبة  
شكراً من القلب..  
و في الأخير اهدي نجاحي إلى الشمعة التي يحرق قلبي غيابها عن أجمل لحظات حياتي.. رحمها الله وأسكنها فسيح  
جنانه.. خالتي

شطوح إيمان

## Résumé

Au cours de ce projet de fin d'étude, nous nous sommes attelés à l'étude et la réalisation d'une Antenne Patch Couplée à fente (ACP) avec un condensateur inter-digité (IDC) permettant la détection d'humidité et fonctionnant à la fréquence de 2.45 GHz de la bande ISM.

D'abord un état de l'art sur les capteurs d'humidité à base d'antenne a été exploré. Ensuite, nous avons dimensionné la structure antennaire sur 2 types de substrat, d'abord le Roger puis le FR4 avec une étude paramétrique qui a permis le bon fonctionnement à 2.45 GHz. Cette structure antennaire a été simulée avec le simulateur électromagnétique CST MWS 2017, réalisée et mesurée par notre soin au niveau de notre institut AES (Aéronautique et Etudes Spatiales). Une connaissance préalable des appareils de réalisation et de mesure tels que la graveuse et l'analyseur de réseau ont été effectués pour une bonne manipulation de ces derniers.

## Abstract

During this end-of-study project, we focused on the study and development of an Aperture Coupled Patch (ACP) antenna with a slotted Inter-Digitated Capacitor (IDC) for humidity detection, operating at a frequency of 2.45 GHz in the ISM band.

Firstly, we conducted a literature review on humidity sensors based on antenna technology. Next, we dimensioned the antenna structure using two types of substrates, initially Rogers, and then FR4, with a parametric study to ensure proper operation at 2.45 GHz. This antenna structure was simulated using the electromagnetic simulator CST MWS 2017, fabricated, and measured by us at our institute ASS (Aeronautics and Space Studies). We also acquired prior knowledge of fabrication and measurement equipment such as the etching machine and network analyzer to ensure proper handling of these tools.

## ملخص

خلال مشروع نهاية الدراسة، بدأنا في دراسة وتصميم هوائي التصحيح المزدوج (ACP) بفتحة مع مكثف رقمي (IDC) يسمح بالكشف والتشغيل عند تردد 2.45 جيجا هرتز من نطاق ISM.

أولاً قمنا بتعريف مستشعرات الرطوبة القائمة على الهوائي، ثم قمنا بتحديد أبعاد هيكل الهوائي على نوعين من الركائز، أولاً Roger ثم FR4 بدراسة الأبعاد التي سمحت بالتشغيل السليم عند 2.45 جيجا هرتز تمت محاكاته باستخدام جهاز المحاكاة الكهرومغناطيسية CST MS2017 الذي تم إنتاجه ومحاكاته في معهدنا).

وفي الأخير قمنا بإجراء معالجة بأجهزة التحقيق والقياس مثل آلة النقش ومحلل الشبكة لنتائج جيدة لهذا الأخير.

## Table des matières

<i>Remerciement</i> .....	i
<i>Dédicace</i> .....	ii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>ملخص</b> .....	iv
<b>Table des matières</b> .....	v
<b>Liste des Figures</b> .....	viii
<b>Liste des tableaux</b> .....	x
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 01 : Etat de l'art des antennes capteurs.</b>	
1 Introduction .....	3
2 Présentation des antennes capteurs.....	3
2.1 Histoire des antennes capteurs .....	3
2.2 Définition d'une antenne capteur .....	4
2.3 Les différents types des antennes capteurs .....	4
2.3.1 Antennes capteurs de microbalance à quartz .....	4
2.3.2 Antennes capteurs à résonance magnétique .....	5
2.3.3 Antennes capteurs à résonance diélectrique .....	5
2.3.4 Antennes capteurs à fibres optiques .....	5
2.3.5 Antennes capteurs à nanostructures .....	5
2.4 Différentes applications des antennes capteurs.....	5
2.5 Les avantages des antennes capteurs.....	6
3 Présentation des antennes micro-ruban.....	6
3.1 Description d'une antenne micro-ruban .....	6
3.2 Les paramètres fondamentaux des antennes .....	7
3.2.1 L'impédance .....	7
3.2.2 Coefficient de réflexion .....	8
3.2.3 Taux d'onde stationnaire (TOS) .....	8
3.2.4 Directivité et gain .....	8
3.2.5 Diagramme de rayonnement .....	9
3.3 Techniques d'alimentation des antennes micro-ruban .....	9
3.3.1 Alimentation par ligne micro-ruban .....	10
3.3.2 Alimentation par câble coaxiale.....	10
3.3.3 Alimentation couplée par ouverture.....	11

3.3.4	Alimentation couplée par proximité.....	12
4	Etat de l'art des antennes capteurs dédiée à la détection d'humidité .....	12
4.1	Antenne capteur d'humidité avec contact.....	12
4.2	Antenne capteur d'humidité sans contact .....	13
4.3	Antenne capteur d'humidité avec et sans contact .....	15
5	Motivation sur le choix d'antenne capteur .....	17
6	Conclusion.....	17

**Chapitre 02 : Etude d'une antenne patch couplée (ACP) à fente avec un condensateur inter-digité (IDC) dédiée à la détection d'humidité.**

1	Introduction .....	18
2	Description de la structure de l'antenne patch couplée (ACP) à fente .....	18
3	Présentation du condensateur inter-digité (IDC).....	19
4	Les dimensions de l'antenne capteur.....	20
5	Détails expérimentaux .....	22
5.1	Fabrication de l'antenne SACP .....	22
5.2	Synthèse de matériau de détection .....	23
5.3	Description du matériau de détection.....	24
5.4	Performance du capteur .....	25
5.5	Dérive de la ligne de base .....	28
6	Conclusion.....	29

**Chapitre 03 : Simulation et réalisation d'une antenne ACP fonctionnant à 2.45 GHz dédiée à la détection d'humidité.**

1	Introduction .....	30
2	Présentation du simulateur CST Micro-wave Studio .....	30
3	Simulation de l'antenne ACP .....	33
3.1	Étude paramétrique :.....	36
3.1.1	Influence de la longueur de patch .....	36
3.1.2	Influence de la largeur de patch .....	36
3.1.3	Influence de la position du point d'alimentation .....	37
3.1.4	Influence de la largeur de la fente .....	38
3.1.5	Effet de la longueur de la fente .....	39
3.1.6	Adaptation de l'antenne.....	40
3.1.7	Simulation d'antenne optimale .....	41
	.....	42
4	Réalisation d'antenne ACP .....	42



4.1	Fabrication de l'antenne .....	43
5	Résultat de l'antenne réalisé.....	44
5.1	Discussion des résultats simulés et réalisés .....	45
6	Conclusion.....	46
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Liste des Figures

### Chapitre 01 : Etat de l'art des antennes capteurs.

Figure 1.1 : structure d'une antenne micro-ruban.....	7
Figure 1.2 : divers formes d'éléments rayonnants.....	7
Figure 1.3 : diagramme de rayonnement en 3D et diagramme de rayonnement dans le plan YOZ. ....	9
Figure 1.4 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban [17].....	10
Figure 1.5 : Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale [17].....	11
Figure 1.6 : Antenne imprimée alimentée par fente [17]. ....	12
Figure 1.7 : Antenne imprimée alimentée par proximité [17].....	12
Figure 1.8 : Petite antenne boucle chargée avec SRR sans et avec Kapton [22]. ....	13
Figure 1.9 : antenne fabriquée avec kapton [22]. ....	13
Figure 1.10 : antenne capteur fabriquée. A: antenne de référence, B: bord nanotube de carbone (CNT) [23].....	14
Figure 1.11 : géométrie de l'antenne ACP [24].....	15
Figure 1.12 : Antenne patch rectangulaire à micro-ruban [25].....	15
Figure 1.13 : (a) Géométrie et (b) prototype de l'antenne de détection [26].....	16

### Chapitre 02 : Etude d'une antenne patch couplée (ACP) à fente avec un condensateur inter-digité (IDC) dédiée à la détection d'humidité.

Figure 2.1 : Géométrie de l'antenne ACP (vue exposée en 3D).....	18
Figure 2.2 : les paramètres d'un IDC [30]. ....	19
Figure 2.3 : géométrie de l'antenne SACP [31]. ....	20
Figure 2.4 : Géométrie de l'IDC intégré à l'antenne ACP [21]. ....	21
Figure 2.5 : réalisation de l'antenne SACP [31]. ....	22
Figure 2.6 : Antenne ACP à l'intérieur du cadre en plastique. Les vis A et B déplacent le substrat d'antenne dans le sens vertical. Les vis C et D déplacent l'antenne dans le sens horizontal. Les vis E, F, G et H arrêtent le substrat dans la position optimisée [21]. ....	23
Figure 2.7 : Organigramme de la synthèse de $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ [24]. ....	24
Figure 2.8 : (a) MEB et (b) MET analyses du $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ nanoparticules [21]. ....	25
Figure 2.9 : technique du drop-coating [5]. ....	25
Figure 2.10 : générateur d'humidité Thunder Scientific 2500. ....	26
Figure 2.11 : Décalage de fréquence à différentes concentrations d'humidité par rapport à la fréquence de résonance dans l'air sec (10 % HR). ....	26
Figure 2.12 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne à différentes concentrations d'humidité relative (T = 23 °C) [24]. ....	27
Figure 2.13 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne à différentes concentrations d'humidité relative (T = 30 °C) [24]. ....	28

Figure 2.14 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne pendant les cycles de désorption caractérisés par de l'air sec ( $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La ligne bleue est la réponse du capteur et la ligne rouge indique le profil d'humidité [24].....29

### Chapitre 03 : Simulation et réalisation d'une antenne ACP fonctionnant à 2.45 GHz dédiée à la détection d'humidité.

Figure 3.1 : Différents simulateurs dans CST Studio Suite. ....	31
Figure 3.2 : Modèles et leurs descriptions. ....	31
Figure 3.3 : Menu "Objects" dans Microwave Studio. ....	32
Figure 3.4 : interface du logiciel CST. ....	32
Figure 3.5 : Géométrie de l'antenne. (a) : le top de substrat 1. (b) : le bottom de substrat 2. (c) : plan de masse et fente. (d) : direction de l'antenne. ....	33
Figure 3.6 : Géométrie de l'IDC. ....	34
Figure 3.7 : Variation du coefficient de réflexion S11 de l'antenne en fonction de la fréquence. ....	35
Figure 3.8 : modification du matériau. ....	35
Figure 3.9 : module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. ....	36
Figure 3.10 : Variation de la fréquence en fonction de la largeur de l'antenne en variant la longueur du patch. ....	36
Figure 3.11 : paramètre sweep pour la largeur de l'antenne. ....	37
Figure 3.12 : variation de la fréquence de l'antenne en variant la largeur du patch. ....	37
Figure 3.13 : paramètre sweep pour la largeur de la ligne. ....	38
Figure 3.14 : Variation d'adaptation d'antenne en fonction de la position du point d'alimentation(Y). ....	38
Figure 3.15 : paramètre sweep pour varier la largeur de la fente. ....	39
Figure 3.16 : Variation de la fréquence avec la variation la de largeur de la fente. ....	39
Figure 3.17 : paramètre sweep pour la variation de la longueur de la fente. ....	40
Figure 3.18 : Variation de fréquence en variant la longueur de la fente. ....	40
Figure 3.19 : paramètre sweep pour varier la largeur de la ligne de transmission. ....	40
Figure 3.20 : variation de $S_{11}$ avec la variation de la largeur de ligne de transmission. ....	41
Figure 3.21 : coefficient de réflexion de l'antenne optimale ACP avec substrat FR4. ....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.22 : Les trois faces de l'antenne sélectionnée pour les importer en format Gerber. ....	42
Figure 3.23 : impression des faces de l'antenne sur du papier transparent. ....	43
Figure 3.24 : matériels utilisés pour la fabrication. (a) : appareil de coupage. (b) : machine à ultraviolet. (c) : machine à gravure. ....	43
Figure 3.25 : Réalisation de l'antenne ACP. ....	44
Figure 3.26 : présentation de l'analyseur de réseau vectoriel. ....	44
Figure 3.27 : kit de calibration du VNA. ....	45
Figure 3.28 : mesure de S11 de l'antenne à l'aide du VNA. ....	45
Figure 3.29 : résultats de la simulation et de la réalisation. ....	46

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 : comparaison entre les propriétés des différents antennes capteurs étudiés.</b>	<b>16</b>
<b>Tableau 2 : dimensions de l'antenne SACP.</b>	<b>22</b>
<b>Tableau 3 : les dimensions des paramètres de l'antenne ACP avec IDC avec substrat Rogers.</b>	<b>34</b>
<b>Tableau 4 : les nouvelles dimensions de l'antenne ACP avec IDC avec substrat FR4.</b>	<b>41</b>

## Introduction générale

Au cours des dernières années, il est indéniable que la recherche en technologie de la communication a significativement avancé. Les laboratoires et les entreprises de recherche semblent travailler sans relâche pour faire évoluer ces technologies, au profit de toutes les disciplines les utilisant dans leurs domaines respectifs. De nombreuses industries utilisent ces technologies pour améliorer la qualité de leurs produits et de leur production. Les progrès des technologies de détection jouent un rôle crucial dans le domaine agricole. Ces avancées de détection servent à collecter des données sur le sol, les cultures, la météo, et d'autres facteurs pertinents pour l'agriculture. Ces données peuvent être utilisées pour optimiser les pratiques agricoles, telles que l'irrigation précise, la gestion des nutriments, la détection des maladies des plantes, et la prévision des rendements. Grâce à ces paramètres, les agriculteurs peuvent optimiser leur production en surveillant précisément les conditions environnementales de leurs cultures.

L'évaluation rigoureuse de la teneur d'humidité est d'une importance cruciale pour de nombreuses industries, y compris l'agriculture, car elle peut affecter considérablement les cultures et les récoltes, ayant ainsi un impact significatif sur les résultats obtenus. Étant donné que ce facteur est vital pour la garantie de performances optimales dans ce domaine, une précision extrême dans sa mesure s'avère essentielle.

L'estimation de la teneur d'humidité est un sujet quelque peu complexe. Pour garantir une mesure précise et fiable, plusieurs éléments doivent être pris en compte. C'est pourquoi notre étude se concentre sur les antennes fonctionnant comme capteur. Ces derniers sont particulièrement intéressants car ils permettent d'obtenir des résultats très précis en un temps record. Parmi les différents modèles des antennes fonctionnant comme capteurs d'humidité, citons notamment l'antenne imprimée, le patch, l'antenne cornet [1] ainsi que l'antenne planaire en F inversé (PIFA : Planar Inverted-F Antenna) [2]. Chacun de ces modèles possède des caractéristiques spécifiques qui lui confèrent des avantages et des inconvénients. Il est donc important de savoir choisir le bon modèle en fonction de ses besoins.

Dans l'objectif de fournir des mesures précises et fiables de l'humidité, ainsi qu'une connectivité sans fil pour faciliter la surveillance et la collecte des données d'humidité dans diverses applications. Grâce à cette technologie de pointe, les applications agricoles pourront bénéficier d'une surveillance en temps réel de la teneur en eau du sol. En effet, ce capteur sera capable de fournir des données précises sur l'humidité du sol, permettant ainsi de prendre des

décisions éclairées et de réaliser des ajustements pertinents en fonction des besoins du moment. De cette façon, il sera possible de gérer de manière plus efficace les pratiques agricoles et de prendre des décisions pertinentes en conséquence.

L'objectif de ce travail est d'étudier, de réaliser et de mesurer un prototype d'antenne capteur imprimée dédiée à la détection d'humidité. Ce capteur est basé sur un IDC (interdigitated capacitor) associé à un matériau de détection. Pour cela, le manuscrit sera réparti en trois chapitres. Le premier chapitre introduit des généralités et un état de l'art sur les antennes micro-rubans et les antennes capteurs ce qui nous a permis de choisir, tout en justifiant ce choix, une structure d'antenne intéressante répondant à notre problématique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de de l'Antenne Patch Couplée (ACP) à fente avec un condensateur inter-digité (IDC) associé au matériau titanate de baryum avec revêtement d'urée ( $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) connu pour être sensible à l'humidité.

Le dernier chapitre présente la méthode suivie permettant le dimensionnement de l'antenne patch à deux couches qui fonctionne sur la bande ISM (industrielle, scientifique et médicale) à la fréquence 2.45 GHz, ainsi que l'étude paramétrique, les résultats de simulation et de mesure obtenus.

Enfin, nous avons clôturé notre travail par une conclusion générale.

**Chapitre 01 :**  
**Etat de l'art des antennes**  
**capteurs**

## **1 Introduction**

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et contrôler les environnements est devenu essentiel dans différents domaines : militaires, scientifiques, médical..., etc

Pour répondre à cet impératif, de nouvelles technologies ont vu le jour, prenant en compte la sensibilité de l'environnement et fournissant des informations pertinentes sur les milieux étudiés. Les progrès récents dans les domaines de la communication sans fil et de l'électronique ont notamment contribué à faire émerger des mini-composants multifonctionnels, peu coûteux et particulièrement performants, permettant ainsi de répondre aux défis rencontrés dans ces environnements hostiles. Ces dispositifs développés par ces domaines sont nommés capteurs ce sont des outils qui reconnaissent ou quantifient les propriétés physiques et les transforment en signaux électriques ou en d'autres formats de données lisibles. Ces capteurs possèdent une grande capacité à détecter diverses informations comme la température, l'humidité, la lumière, les vibrations sismiques, ainsi que la présence ou l'identification d'organismes biologiques. Ils ont une importance primordiale dans divers systèmes, incluant ceux de l'électronique, de l'automobile, de l'automatisation industrielle, de l'industrie aérospatiale, des dispositifs médicaux, et bien plus encore.

Au fil des années, la détection a connu de nombreuses améliorations. Les antennes ont notamment été intégrées comme base de détection dans ce domaine, tout en jouant sur les différents types et paramètres d'antennes. Les progrès technologiques ont également permis le développement d'antennes plus compactes, miniaturisées et intégrées, offrant de nouvelles options pour les systèmes de détection.

Ce premier chapitre abordera les antennes micro-rubans et les éléments des antennes capteurs. Suivra une revue des études antérieures sur l'intégration de capteurs avec des antennes.

## **2 Présentation des antennes capteurs**

### **2.1 Histoire des antennes capteurs**

Les antennes capteurs, utilisées dans les systèmes de mesure et de détection, ont une histoire riche qui remonte aux premiers stades de développement de ces technologies. Voici un bref aperçu de leur évolution [3], [4]:

Des recherches ont été menées dans les années 1950-1960 afin de créer des antennes capteurs pour la télédétection et la surveillance environnementale. Les scientifiques ont étudié l'utilisation d'antennes pour mesurer des phénomènes physiques tels que la température, la



pression et l'humidité. Les premières antennes capteurs étaient grandes et réservées à des applications spécialisées.

Au cours des années 70 et 80, les technologies de microélectronique et de fabrication de circuits intégrés ont permis la miniaturisation des antennes capteurs. Les scientifiques ont développé des antennes de plus en plus compactes pour une meilleure intégration dans les dispositifs portables et les systèmes embarqués.

Au cours des années 90-2000, il y a eu des progrès dans les matériaux diélectriques, les méthodes de fabrication et les simulations numériques, qui ont eu un impact positif sur les antennes capteurs. De nouveaux types d'antennes, tels que les antennes patch, fente et micro-strip, ont été développés, offrant une sensibilité plus grande, une directivité plus importante et une bande passante plus large.

De nos jours, grâce aux avancées des nanotechnologies et des techniques de fabrication sophistiquées, les antennes capteurs sont devenues bien plus petites qu'entre 2000 et 2020, ce qui améliore considérablement leurs performances et facilite leur intégration dans des dispositifs sans fil et des réseaux de capteurs. Les recherches actuelles visent à améliorer les performances des antennes capteurs en matière de sensibilité, de sélectivité, de miniaturisation et de consommation d'énergie réduite.

## **2.2 Définition d'une antenne capteur**

Une antenne sensorielle est un type spécifique d'antenne qui a été conçue afin de détecter et mesurer une grandeur physique spécifique. Elle associe les fonctions d'une antenne et d'un capteur pour permettre la collecte d'informations liées à une grandeur physique particulière grâce aux ondes électromagnétiques. Elle émet ou reçoit des ondes électromagnétiques et utilise les variations de ces ondes pour la grandeur physique ciblée [5]

## **2.3 Les différents types des antennes capteurs**

Il existe différents types d'antennes capteurs utilisées pour la détection de grandeurs physiques, Il est important de noter que chaque type d'antenne capteur a ses propres caractéristiques, avantages et limites. Voici quelques exemples :

### **2.3.1 Antennes capteurs de microbalance à quartz**

Ce type d'antenne capteur fonctionne grâce à l'utilisation d'un matériau très sensible aux changements de masse, le cristal de quartz. Il permet donc de mesurer avec précision différents paramètres tels que la masse, la densité ou encore la viscosité des substances qui sont en contact

direct avec l'antenne, il est ainsi possible d'obtenir des mesures extrêmement précises et fiables [6].

### **2.3.2 Antennes capteurs à résonance magnétique**

Ces antennes utilisent la magnétométrie pour mesurer des grandeurs physiques telles que la température, la pression ou la déformation. Elles détectent les variations de la résonance magnétique en réponse à ces grandeurs [7].

### **2.3.3 Antennes capteurs à résonance diélectrique**

Ce genre d'antenne capteur détecte les changements de permittivité diélectrique des matériaux afin de mesurer certaines variables telles que l'humidité, la concentration de solutés, ou encore la permittivité des substances environnantes [8, 9].

### **2.3.4 Antennes capteurs à fibres optiques**

Les antennes détectent et mesurent les changements de pression, de température et d'autres grandeurs physiques grâce aux fibres optiques sensibles. Les fibres optiques transforment les variations de la lumière en signaux électriques qui sont analysés et mesurés. Ces variations optiques sont ensuite détectées et mesurées, permettant ainsi de déterminer la valeur de la grandeur physique [10].

### **2.3.5 Antennes capteurs à nanostructures**

Ces antennes capteurs utilisent des nanostructures métalliques ou diélectriques pour la détection en modifiant les propriétés électromagnétiques de l'antenne en présence de la grandeur physique visée [11].

## **2.4 Différentes applications des antennes capteurs**

Les antennes capteurs sont utilisées dans de nombreuses applications où la détection et la mesure de grandeurs physiques sont nécessaires. Voici quelques exemples d'applications courantes d'antennes capteurs :

- **Surveillance de l'environnement** : elles servent à observer et évaluer diverses conditions de leur environnement, comme l'humidité, la température, la pression de l'air, et tant d'autres. Ces technologies sont pratiques pour plusieurs secteurs, notamment l'agriculture, la météorologie et la surveillance écologique.
- **Contrôle industriel** : Les antennes capteurs sont employés en contrôle industriel pour mesurer diverses grandeurs (pression, température, force, déformation, etc.). Ils garantissent la sûreté et la productivité des processus grâce à leur intégration dans les dispositifs de surveillance et de contrôle.

- **Santé et médecine** : Les antennes capteurs peuvent être utilisées dans les dispositifs médicaux pour mesurer des paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque, la température corporelle, la pression artérielle, etc. Elles peuvent également être utilisées dans les domaines de la télémédecine, des implants médicaux et de la surveillance de la santé.
- **Sécurité et surveillance** : Dans les systèmes de sécurité et de surveillance, les antennes de capteur peuvent être utilisées pour suivre et mesurer les vibrations, les intrusions et d'autres événements. Les systèmes de détection d'intrusion, les systèmes de sécurité domestique et les systèmes de surveillance industriels les utilisent fréquemment.

Ces applications ne sont que quelques-unes des utilisations possibles des antennes capteurs. Selon les spécifications et les exigences de chaque application.

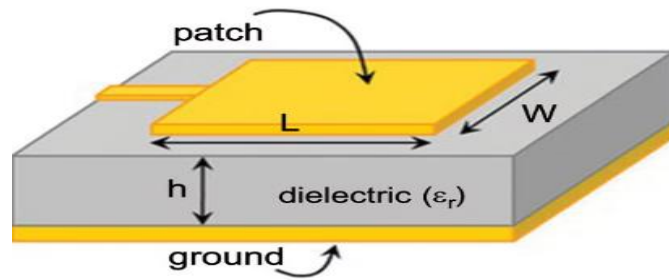
## 2.5 Les avantages des antennes capteurs

- Mesures non invasives : L'antenne capteur permet une mesure sans contact direct avec l'objet à mesurer ou l'environnement de mesure. Cela les rend particulièrement utiles dans les applications où l'interaction physique directe est difficile, dangereuse ou impossible [12].
- Détection précise : Les antennes de capteur permettent la détection précise de grandeurs physiques [13].
- Réponse aux besoins du marché tels qu'un faible coût de fabrication, une consommation énergétique la plus basse possible, une bonne stabilité, fiabilité du dispositif, et enfin une portabilité élevée.

## 3 Présentation des antennes micro-ruban

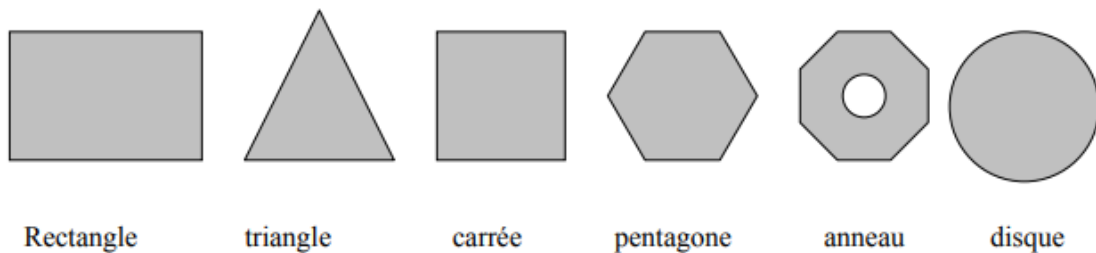
### 3.1 Description d'une antenne micro-ruban

L'antenne imprimée ou micro-ruban, également connue sous le nom d'antenne patch en anglais, est une technologie émergente de plus en plus répandue. Une antenne microbande (voir Figure 1.1) est composée d'une plaque métallique, appelée élément rayonnant ou patch, qui se trouve sur la surface supérieure d'un substrat diélectrique. Généralement, le conducteur est considéré comme parfait et d'épaisseur négligeable, tandis que le plan de masse se trouve en dessous du substrat diélectrique [14].



**Figure 1.1 : structure d'une antenne micro-ruban.**

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes, Généralement les caractéristiques de l'antenne dépendent de la forme et des dimensions du patch. La figure (1.2) montre les formes des éléments rayonnants les plus utilisés, leurs dimensions sont faibles de l'ordre de  $\lambda/2$  à  $\lambda$ .



**Figure 1.2 : diverse forme d'éléments rayonnants.**

Parmi toutes ces formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus commun pour sa géométrie qui facilite la compréhension des mécanismes de rayonnement.

### **3.2 Les paramètres fondamentaux des antennes**

Voici un bref aperçu des paramètres employés pour évaluer l'efficacité de l'antenne. Nous nous attarderons sur les paramètres relatifs aux circuits et à la radiation.

#### **3.2.1 L'impédance**

L'impédance est la résistance électrique totale présentée par l'antenne à une fréquence donnée. Une correspondance d'impédance appropriée entre l'antenne et le système électronique auquel elle est connectée est essentielle pour maximiser le transfert d'énergie.

Une antenne est caractérisée par son impédance (Équation 1) complexe  $Z_a$  composée d'une partie réelle  $R_a$  et d'une partie imaginaire  $X_a$ .

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (1.1)$$

### 3.2.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion d'une antenne noté  $\Gamma$ , est une mesure de la quantité d'énergie réfléchi par rapport à l'énergie incidente à l'interface entre l'antenne et le système auquel elle est connectée. Le coefficient de réflexion d'une antenne est défini par :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (1.2)$$

$Z_a$  : impédance de l'antenne

$Z_0$  : impédance caractéristique de départ

Un coefficient de réflexion proche de zéro signifie que l'impédance entre l'antenne et le système est bien adaptée, assurant ainsi un transfert d'énergie efficace de l'émetteur à l'antenne. Une bonne adaptation d'antenne doit avoir :  $|\Gamma| \leq -10$  dB.

### 3.2.3 Taux d'onde stationnaire (TOS)

Le TOS ou le SWR en anglais (standing wave ratio), doit être plus proche de 1 pour avoir une bonne adaptation d'impédance et afin de le minimiser une antenne doit être adaptée à l'impédance caractéristique  $Z_0$  réelle d'une ligne de transmission (généralement  $50 \Omega$  ou  $75 \Omega$ ). Le taux d'onde stationnaire TOS est donné par :

$$\text{TOS} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.3)$$

Une bonne adaptation d'antenne doit avoir :  $1 \leq \text{TOS} \leq 1.5$

### 3.2.4 Directivité et gain

La directivité  $D(\theta, \phi)$ , d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace et elle est définie par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance rayonnée totale d'une antenne isotrope (Équation 4) [15].

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \phi)}{\text{puissance rayonnée totale}} \quad (1.4)$$

Le gain d'une antenne  $G(\theta, \phi)$ , est donné par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance acceptée par l'antenne qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes (Équation 5).

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \phi)}{\text{puissance rayonnée acceptée}} \quad (1.5)$$

### 3.2.5 Diagramme de rayonnement

Il fournit des informations sur la capacité d'une antenne à rayonner dans l'espace. Il est possible, à partir du diagramme de rayonnement, de définir plusieurs paramètres (figure 1.3) du rayonnement d'une antenne dont le niveau de puissance, l'ouverture, et la direction des lobes secondaires [16].

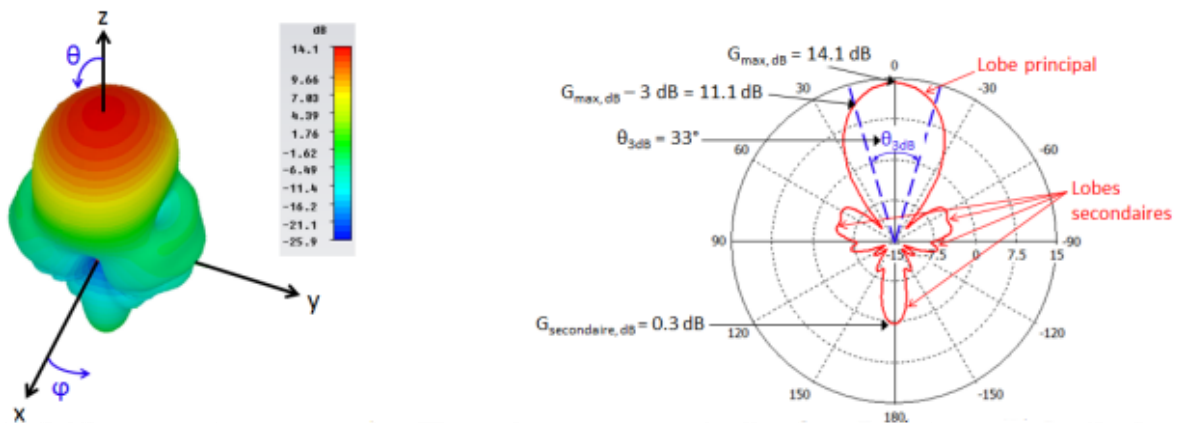


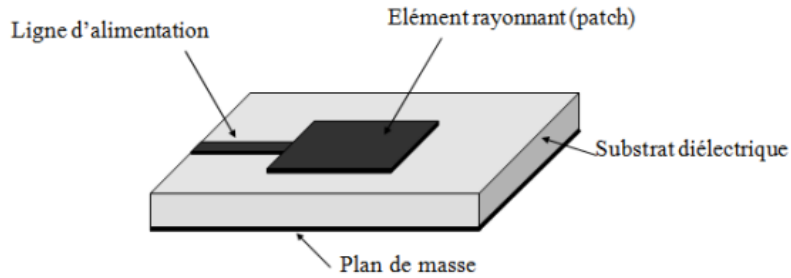
Figure 1.3 : diagramme de rayonnement en 3D et diagramme de rayonnement dans le plan YOZ.

### 3.3 Techniques d'alimentation des antennes micro-ruban

L'alimentation joue un rôle crucial dans le bon fonctionnement d'une antenne, notamment en améliorant l'adaptation d'impédance d'entrée [17]. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour alimenter une antenne patch micro-ruban, qui peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes avec contact et les méthodes sans contact. Dans les méthodes avec contact, la puissance RF est directement transmise au patch rayonnant grâce à des éléments de connexion tels qu'une ligne micro-ruban. En revanche, dans les méthodes sans contact, le patch n'est pas alimenté directement par la puissance RF. Au lieu de cela, la puissance est transférée depuis la ligne d'alimentation via un couplage électromagnétique le long du trajet.

### 3.3.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Dans ce type de technique d'alimentation, une bande conductrice est connectée directement au bord du patch micro-ruban, comme illustré à la figure 1.4. La bande conductrice est plus petite en largeur que le patch, et ce type de disposition d'alimentation a l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane [18 ,19].



**Figure 1.4 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban [17].**

### 3.3.2 Alimentation par câble coaxiale

Le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le plan de masse et le diélectrique, il est directement soudé à l'élément rayonnant en un point où l'adaptation est obtenue, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse (Figure 1.5).

Cette technique est adaptée à une alimentation séparée de chaque élément du réseau. Elle est simple à réaliser. La position de l'alimentation détermine le type de mode excité, de plus elle contrôle l'adaptation de l'élément. Cependant, cette technique d'alimentation pose des problèmes technologiques du fait du percement du substrat et des soudures sur chaque élément rayonnant, surtout pour les grands réseaux [20].

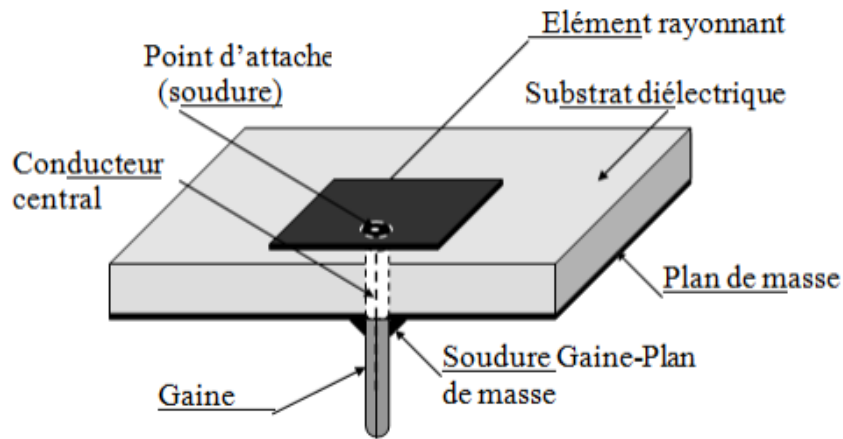


Figure 1.5 : Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale [17].

### 3.3.3 Alimentation couplée par ouverture

L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant. Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente (Figure 1.6). Elle apporte les avantages suivants :

- Isolation du circuit d'alimentation par l'intermédiaire du plan de masse. De ce fait, un rayonnement parasite faible, en fait ce rayonnement parasite se situe au-dessous du plan de masse, ce qui n'est pas la direction de propagation.
- Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Mais cette technique présente quelques inconvénients, tels que :

- Faible bande passante, mais peut être amélioré en jouant sur l'épaisseur du diélectrique et en superposant plusieurs éléments rayonnants.
- Difficile à mettre en œuvre [20].



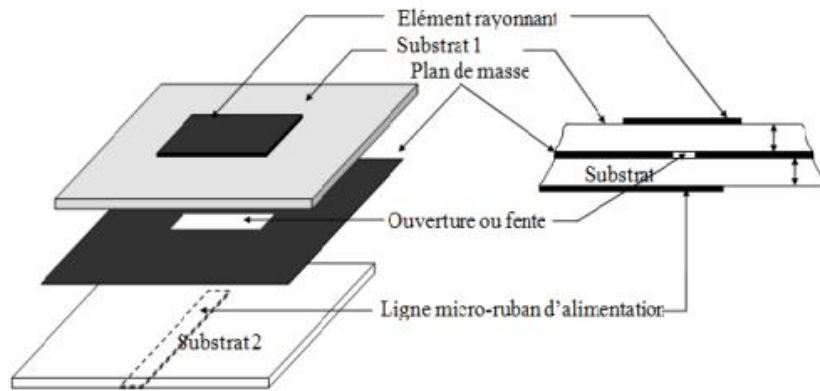


Figure 1.6 : Antenne imprimée alimentée par fente [17].

### 3.3.4 Alimentation couplée par proximité

Dans l'alimentation de proximité, la ligne d'alimentation est placée entre deux substrats diélectriques. Dans ce type d'alimentation, l'énergie est transmise à l'antenne patch par couplage électromagnétique avec une ligne de transmission par un couplage capacitif. Il a une efficacité de bande passante améliorée par rapport aux autres techniques. L'inconvénient de cette méthode est que la fabrication multicouche doit être faite, et elle offre une faible pureté de polarisation [21].

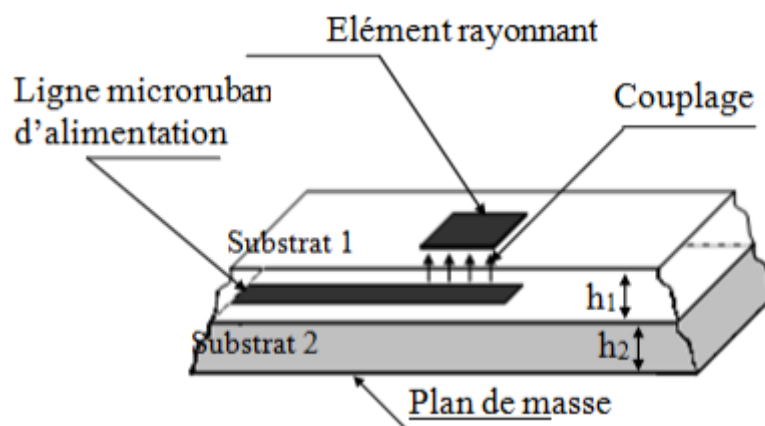


Figure 1.7 : Antenne imprimée alimentée par proximité [17].

## 4 Etat de l'art des antennes capteurs dédiée à la détection d'humidité

### 4.1 Antenne capteur d'humidité avec contact

Ce type d'antenne a été proposé dans [22] afin d'estimer le taux d'humidité. La proposition est de fabriquer une étiquette de capteur passive peu coûteuse avec du FR4

( $h=1.6\text{mm}$ ,  $35*35\text{ mm}$ ) comme substrat. Cette étiquette de capteur contient un capteur capacitif opérant entre 0 et 1,5 GHz et doté d'une petite antenne à anneau fendu (SRR : split ring resonator) équipée d'un chargement de méta-matériaux. Pour détecter l'humidité, il suffit de placer le résonateur SRR, protégé par du Kapton, sur le dessus du résonateur.

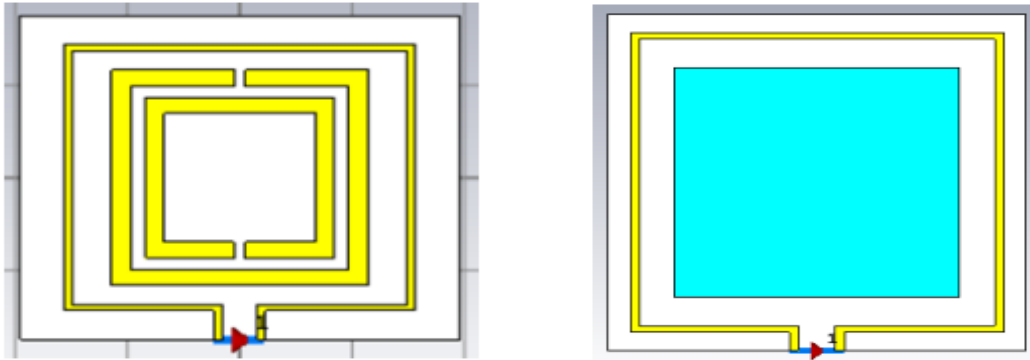


Figure 1.8 : Petite antenne boucle chargée avec SRR sans et avec Kapton [22].

La mesure de l'humidité se fait en appliquant du Kapton sur le résonateur SRR (figure 1.9), ce qui influence la capacité des SRR quand 0,05 ml d'eau sont ajoutés sur la surface du kapton. Lorsque la valeur de l'humidité relative (HR) augmente, la permittivité relative augmente également, entraînant une baisse de la fréquence. Il est important de noter que le Kapton a une relation linéaire avec l'humidité en ce qui concerne sa permittivité [22].

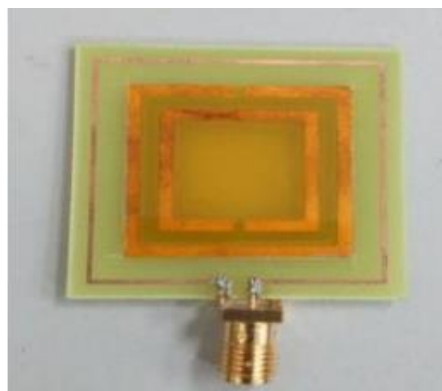
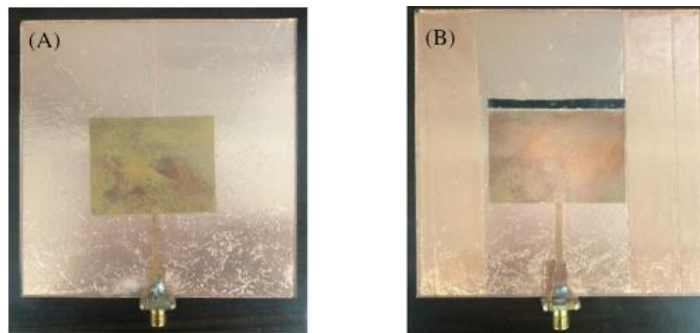


Figure 1.9 : antenne fabriquée avec kapton [22].

#### 4.2 Antenne capteur d'humidité sans contact

Cette catégorie d'antenne a été proposée dans [23], [24] et [25] dans le but de mesurer le taux d'humidité avec des conceptions différentes les unes les autres.

- la référence [23] traite une nouvelle méthode de conception de capteur de gaz et d'humidité doté d'une meilleure sensibilité à 2,4 GHz. La conception utilise une antenne plane avec des nanotubes de carbone (NTC), (figure 1.10) pour la détection de différents gaz ou niveaux d'humidité. La sensibilité est améliorée en remplaçant une partie du conducteur patch situé au bord dominant par une bande de film CNT. Le film CNT est choisi pour sa sensibilité aux gaz, ce qui permet de mesurer le coefficient de réflexion de ces gaz. Le champ et la fréquence sont affectés par la conductivité variable du film CNT en fonction des gaz et de l'humidité.



**Figure 1.10 : antenne capteur fabriquée, A: antenne de référence, B: bord nanotube de carbone (CNT) [23].**

- Les auteurs de la référence [24] présentent la fabrication et les tests d'une antenne ACP de 2,45 GHz. De plus, un condensateur inter-digité (IDC) a été intégré au bord de la ligne micro-ruban qui alimente l'antenne ACP, comme le présente la figure 1.11. Le matériau de détection utilisé est un film de titanate de baryum déposé sur l'IDC. Ce matériau ( $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$ ) est utilisé pour détecter des variations de permittivité entre les électrodes inter-digitées. La fréquence de résonance de l'antenne varie en fonction de la permittivité du matériau. La sensibilité augmente de manière exponentielle en présence d'humidité [24].

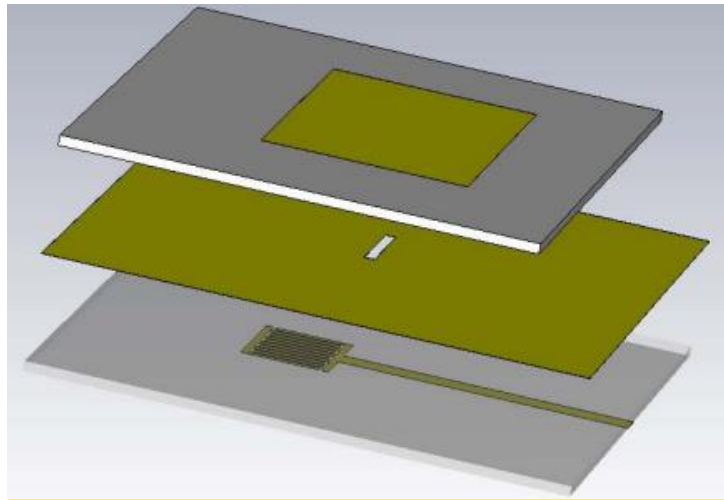


Figure 1.11 : géométrie de l'antenne ACP [24].

- La référence [25] présente une antenne patch micro-ruban (figure 1.12) avec une fréquence de résonance de 900 MHz qui fonctionne comme un capteur d'humidité sans contact, en utilisant les caractéristiques de rétrodiffusion de l'antenne. En augmentant progressivement la teneur en humidité de l'échantillon testé, on observe une diminution correspondante aux pertes de retour. Cette méthode est très pratique car elle permet une mesure non invasive de la teneur en humidité.

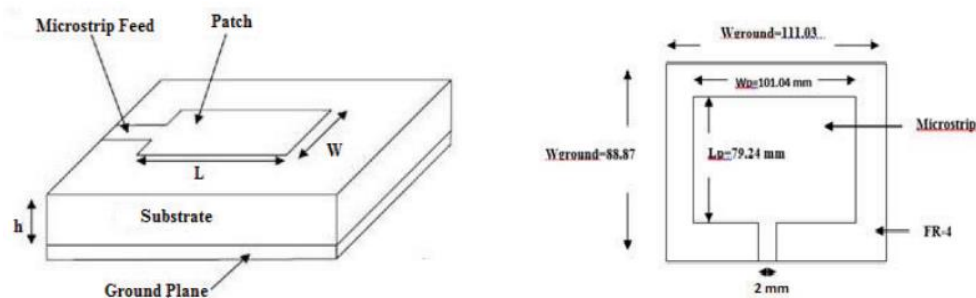
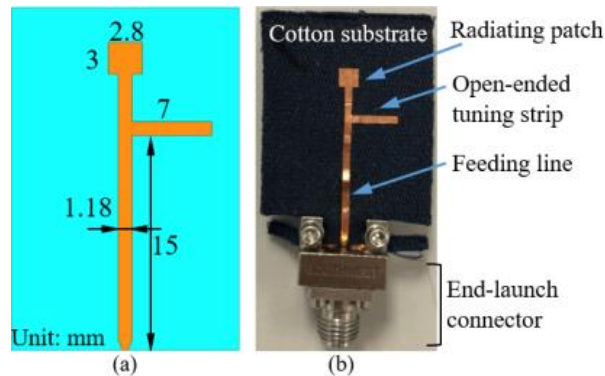


Figure 1.12 : Antenne patch rectangulaire à micro-ruban[25].

#### 4.3 Antenne capteur d'humidité avec et sans contact

Cette nouvelle version d'antenne a été proposée dans [26], c'est une antenne portable dotée d'une fonction de détection d'humidité est présentée pour les applications futures de réseau corporel. Elle fonctionne à une fréquence d'ondes millimétriques de 38 GHz, qui est une fréquence candidate pour les réseaux cellulaires de 5e génération (5G). L'antenne portable (figure 1.13) est équipée d'une structure micro ruban avec un plan de masse pour minimiser l'impact du corps humain. Pour la fabrication d'un prototype de cette antenne, un tissu de coton ordinaire est utilisé comme substrat, et un tissu en nylon nickelé avec une feuille de cuivre

souple sont employés pour les parties conductrices. La fréquence de résonance de l'antenne de détection varie en fonction de l'humidité ambiante.



**Figure 1.13 : (a) Géométrie et (b) prototype de l'antenne de détection [26].**

Cette antenne a comme avantage sa sensibilité de détection et sa flexibilité ce qui la rend facile à intégrer dans les vêtements de tous les jours pour les applications de surveillance des soins de santé.

Dans ce tableau on apporte un résumé sur les articles qui constitue une synthèse concise des informations clés tirées des différents articles pour accéder rapidement aux détails importants.

**Tableau 1 : comparaison entre les propriétés des différents antennes capteurs étudiés.**

Propriétés	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]
Type d'antenne	Antenne micro-ruban	Antenne planaire	Antenne patch couplé	Antenne micro-ruban	Antenne patch rectangulaire
Année	2020	2020	2021	2018	2019
Fréquence de résonance	0---1.5 GHz	2.4 GHz	2.45 GHz	38 GHz	900 MHz
Méthode de mesure	Coefficient de réflexion $S_{11}$	Coefficient de réflexion $S_{11}$	Coefficient de réflexion $S_{11}$	Perte de retour	Perte de retour
Contact	Avec	Sans	Sans	Sans et avec	Sans

## **5 Motivation sur le choix d'antenne capteur**

Après notre étude des différents articles, on a décidé de mener notre thèse on se basant sur la référence [24] où l'on présente un antenne capteurs à résonance diélectrique, ce genre d'antenne capteur détecte les changements de permittivité diélectrique des matériaux afin de mesurer certaines variables telles que l'humidité. Dans cet article les auteurs ont exploité une antenne ACP possédant une géométrie qui permet de réduire les interférences EM entre le réseau d'alimentation et le radiateur principal et minimise le rayonnement d'alimentation en intégrant un élément de détection IDC avec le matériau de titanate de baryum déposé entre ses électrodes. Ce dernier est connu pour ses propriétés piézoélectriques et ses caractéristiques ferroélectriques.

D'une part, Le titanate de baryum est sensible à l'humidité et peut réagir avec l'eau, entraînant une augmentation de la conductivité électrique et des changements dans ses propriétés diélectriques. En outre, La présence d'humidité modifie les caractéristiques diélectriques du matériau du capteur, permettant ainsi de mesurer son niveau. Les propriétés diélectriques jouent donc un rôle crucial dans la détection d'humidité à l'aide d'un capteur.

La combinaison faite dans cet article entre l'antenne ACP et le matériau de détection répond parfaitement à notre sujet de thèse qui est la conception d'une antenne capteur pour la détection d'humidité plus précisément dans le domaine agricole. Aussi, notre thème pourrait être d'une grande utilité au future car l'antenne peut être facilement montée sur des drones permettant de collecter des données sur l'humidité sur une zone agricole.

## **6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté, en premier lieu des généralités sur les antennes micro-ruban (paramètres, alimentation, avantages) et les antennes capteurs (types et applications). Ensuite, nous avons abordé l'étude de quelques articles similaires à notre sujet de mémoire parmi lesquels on a sélectionné et étudié un, tout en expliquant nos motivations sur ce choix. Dans le prochain chapitre on se focalisera sur l'étude de l'article d'antenne capteur d'humidité ACP présentés dans [24] qu'on a choisie comme base pour notre recherche où on expliquera son fonctionnement, son processus de détection et ses performances.

## **Chapitre 02 :**

**Etude d'une antenne patch couplée  
(ACP) à fente avec un condensateur  
inter-digité (IDC) dédiée à la détection  
d'humidité**

## 1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter l'étude de l'antenne patch couplée à fente (ACP) intégrant un condensateur inter-digité (IDC) le long de la ligne d'alimentation micro-ruban sur lequel un dépôt de la nano-poudre de titanate de baryum avec revêtement d'urée ( $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) est effectué pour détecter l'humidité. Les informations exposées dans ce chapitre seront reportés selon la référence [24].

## 2 Description de la structure de l'antenne patch couplée (ACP) à fente

En revenant quelques années en arrière l'antenne ACP inter-dégité n'existait pas. Il en a fallu des dizaines c'est ce n'est pas des centaines de recherches pour les scientifiques pour arriver à en concevoir une. Donc cette invention est passée par divers étapes pour voir le jour.

L'antenne ACP (figure 2.1), introduite par Pozar [28], [29] comprend un patch imprimé sur substrat, couplé électro magnétiquement à une ligne d'alimentation micro-ruban placée sur un autre substrat, à travers une fente étroite dans le plan de masse qui sépare les deux substrats (fig. 2.1). Les auteurs de la référence [24] proposent de rajouter un condensateur inter-digité (IDC) au bout de la ligne d'alimentation avec une géométrie de l'IDC esquissée sur la Figure 2.4. L'IDC a d'abord été déployé en tant que capteur dans une structure d'antenne imprimée dans [24] dans laquelle le couplage entre les deux modes dominants sur une antenne à fente annulaire a été ajusté pour élargir la bande passante en contrôlant la capacité le long de la ligne d'alimentation micro-ruban. L'IDC permet de modifier l'impédance d'entrée et la bande passante de l'antenne qui peuvent être utilisées comme marqueurs dans le signal de détection. D'autre part, les auteurs de [24] proposent de recouvrir l'IDC d'un matériau de détection à base de titanate de baryum. Le matériau de détection a été déposé entre les électrodes IDC par dépôt de gouttes dans un appareil de test de gaz IDC spécialement conçus.

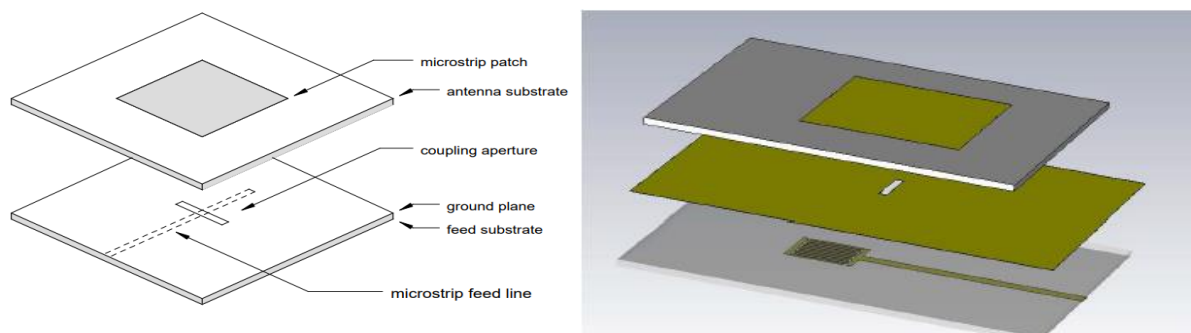


Figure 2.1 : Géométrie de l'antenne ACP (vue exposée en 3D).



### 3 Présentation du condensateur inter-digité (IDC)

L'IDC est un type de structure de condensateur composé d'électrodes métalliques entrelacées, souvent utilisé dans la microélectronique, les circuits intégrés et les applications haute-fréquence.

Chaque structure IDC est bien déterminée à l'aide d'un ensemble de paramètres : géométriques, physiques, etc. La figure 2.2, montre les paramètres géométriques et diélectriques pour un IDC. Chaque doigt possède une longueur ( $L$ ), une largeur ( $W$ ) et un espacement ( $S$ ) entre chaque paire des doigts adjacents. La périodicité de la structure d'électrode est représentée par la longueur d'onde spatiale  $\lambda$ . Le nombre total des doigts est égale à  $N$  [30].

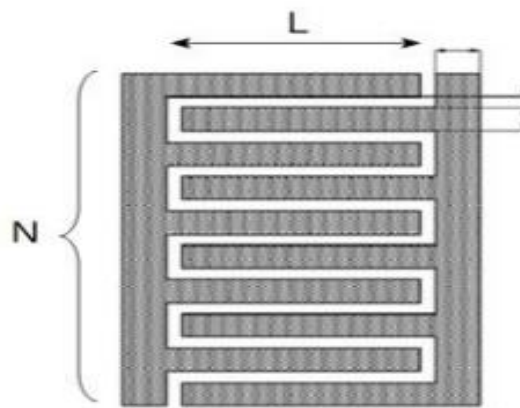


Figure 2.2 : les paramètres d'un IDC [30].

Le fonctionnement du condensateur inter-digité (IDC) réside dans l'utilisation des principes de capacité. La capacité d'un composant est son aptitude à stocker de l'énergie électrique dans un champ électrique. Dans le cas d'un IDC, la structure de verrouillage des doigts augmente la surface effective des plaques de condensateur, ce qui entraîne une plus grande capacité. Un IDC a deux ensembles d'électrodes inter-digitées connues comme "doigts". Chaque ensemble est connecté à une borne du condensateur. Lorsqu'une tension est appliquée, les doigts créent un champ électrique et forment une structure de condensateur avec les lignes de champ électrique qui passent d'un doigt à son voisin.

L'utilisation de la structure inter-digitée permet d'optimiser la surface du condensateur en augmentant le nombre de lignes de champ électrique. De cette manière, la capacité du condensateur est accrue. Cependant, cette capacité dépend des différents paramètres physiques tels que la taille, l'espacement des doigts et du matériau diélectrique utilisé. Pour améliorer les performances du condensateur, l'espace entre les doigts est rempli d'un matériau diélectrique qui augmente la capacité du condensateur en empêchant le claquage électrique entre les doigts et en réduisant l'intensité du champ électrique. Lorsqu'une tension est appliquée, l'IDC stocke de l'énergie dans le champ électrique entre les doigts inter-digités. La quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle à la capacité de l'IDC et au carré de la tension appliquée.

#### 4 Les dimensions de l'antenne capteur

Dans cette partie on va décrire en détail la conception SACP (sensor aperture coupled patch) d'un capteur d'humidité (figure 2.3). L'antenne ACP exploitée est comprise de deux substrats séparés par un plan de masse à une ouverture étroite. Le premier substrat contient sur le top l'élément rayonnant patch et le deuxième contient sur le back la ligne de transmission fusionnée avec l'élément de détection IDC à son extrémité. La géométrie de l'IDC est esquissée à la Figure 2.4. Une extrémité de l'IDC est connectée à la ligne d'alimentation et l'autre extrémité est laissée en circuit ouvert.

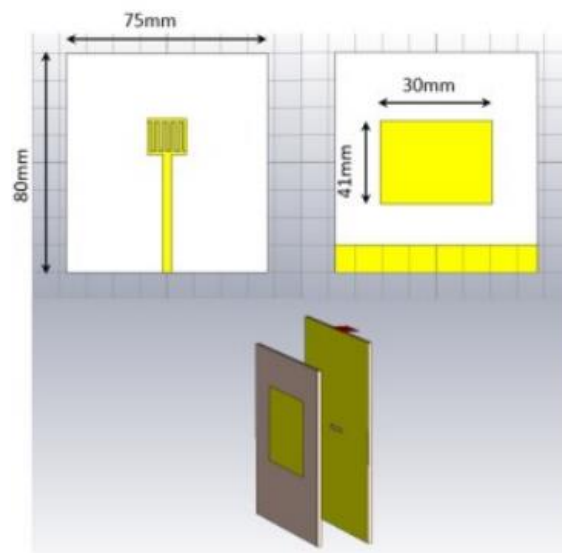


Figure 2.3 : géométrie de l'antenne SACP [31].

Le patch rectangulaire est d'abord conçu en utilisant les formules classiques rapportées dans la littérature (voir [31]). Sa longueur ( $L = 40$  mm) et sa largeur ( $W = 30$  mm) sont calculées

pour une résonance de 2,45 GHz en utilisant le substrat Rogers RO4003C d'une permittivité 3.38. La ligne d'alimentation sur le deuxième substrat est conçue pour une impédance d'entrée de 50  $\Omega$ . La longueur et la largeur de l'antenne sont désignées selon les équations suivantes :

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h}\right)^{+0.264}}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h}\right)^{-0.8}} \right) \quad (2.2)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W}\right)}} \right] \quad (2.3)$$

c : vitesse de la lumière

h : épaisseur du substrat (1.52mm)

$\epsilon_r$  : constante diélectrique du substrat (3.38)

La conception du prototype a été améliorée grâce à une simulation électromagnétique par éléments finis, qui a été validée par des mesures. Le logiciel Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite a été utilisé dans ce processus.

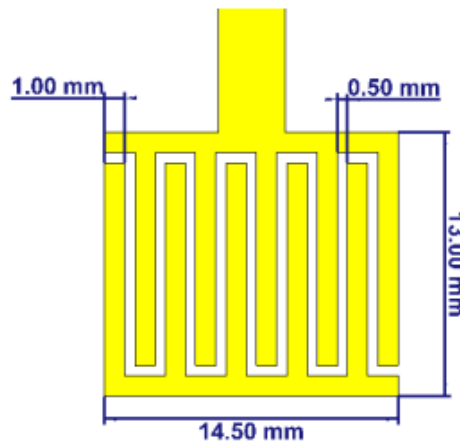


Figure 2.4 : Géométrie de l'IDC intégré à l'antenne ACP [24].

Dans le tableau suivant on présente les dimensions de l'antenne SACP.

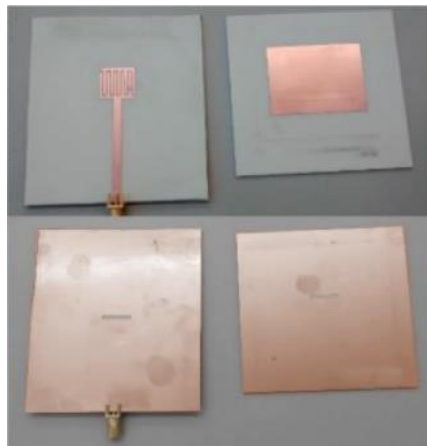
**Tableau 2 : dimensions de l'antenne SACP.**

Paramètres (largeur/longueur)	Dimensions (mm)
Substrat	75/80
Patch rectangulaire	30/41
Ligne micro-ruban	3.3/40
IDC finger	1/11.5
IDC finger pitch	0.5
Ouverture	1.5/12.4

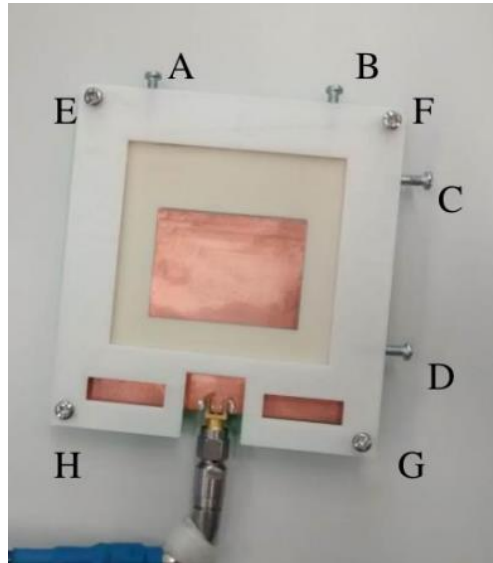
## 5 Détails expérimentaux

### 5.1 Fabrication de l'antenne SACP

Après l'avoir conçue et optimisée, l'antenne SACP a été produite sur un support Rogers RO4003C (figure 2.5) en utilisant LPKF Protomat S103 PCB Milling Machine. Un connecteur SMA a été connecté à la fin de la ligne micro-ruban pour créer un port d'excitation. Un cadre en plastique a été imprimé en 3D pour assembler l'ACP, il permet de mettre les deux substrats en place, les aligner avec des vis dans les directions x et y, puis les ajuster dans la position optimale (figure 2.6). D'après les modélisations, la perte de retour est grandement affectée par l'alignement des cartes (c.-à-d. la taille et la position de l'ouverture), alors que la fréquence de résonance est principalement établie par les dimensions du patch rectangulaire [31]. Les mesures hyperfréquences sur l'antenne fabriquée sont effectuées à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel Rohde & Schwarz ZNB20 (VNA).



**Figure 2.5 : réalisation de l'antenne SACP [31].**



**Figure 2.6 : Antenne ACP à l'intérieur du cadre en plastique. Les vis A et B déplacent le substrat d'antenne dans le sens vertical. Les vis C et D déplacent l'antenne dans le sens horizontal. Les vis E, F, G et H arrêtent le substrat dans la position optimisée [24].**

## 5.2 Synthèse de matériau de détection

Une fois l'antenne fabriquée, ils ont appliqué le matériau de détection sur la surface de l'IDC. Il a été utilisé la nano-poudre d'oxalate de titanate de baryum avec revêtement d'urée ( $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) pour cette tâche et sa synthèse nécessite deux étapes. En premier, 0,05 mol Du chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) a été ajouté à 300 ml d'eau à une température de  $60^\circ\text{C}$  et mélangé pendant quelques minutes pour que  $\text{BaCl}_2$  se stabilise (solution A). Une seconde solution a été préparée en utilisant 300 ml d'eau à  $60^\circ\text{C}$  en le mélangeant avec 0.1 mol d'acide oxalique ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) et nous avons ajouté 0.05 mol de tétrachlorure de titane ( $\text{TiCl}_4$ ) après dissolution (solution B). Par la suite, 1 heure de mélange des solutions A et B à  $60^\circ\text{C}$  a entraîné la production d'oxalate de titanate de baryum intermédiaire  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$ . Ce produit intermédiaire formé a ensuite été filtré, lavé à l'eau, et placé à l'intérieur d'une étuve à  $80^\circ\text{C}$  pendant 12 h.

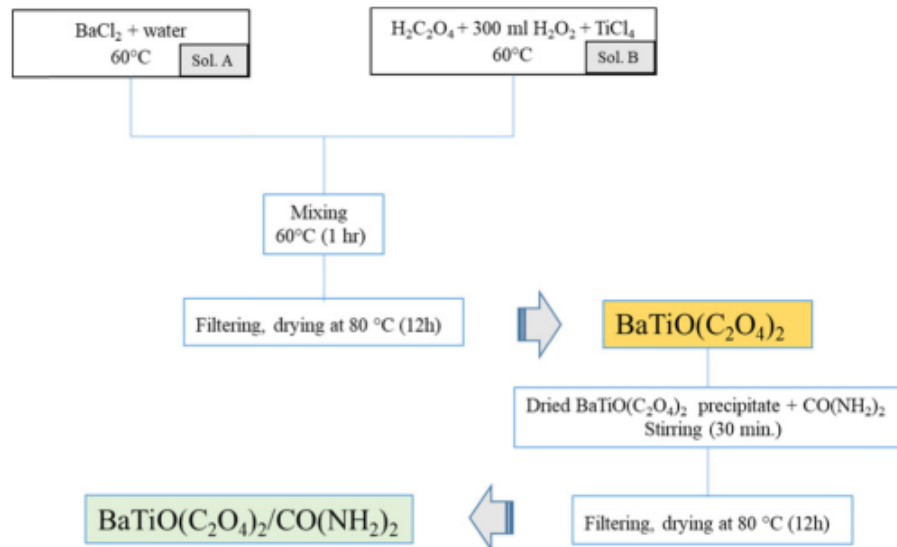


Figure 2.7 : Organigramme de la synthèse de  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  [24] .

La deuxième partie, consistait à modifier le  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$  par traitement au  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . La poudre de titanate de baryum prétraitée a été dispersée dans de l'eau distillée. La poudre de  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$  modifiée à l'urée a été obtenue par filtration, lavage à l'eau distillée et séchage dans une étuve à vide. Puis, Les poudres hybrides ont été soigneusement séchées dans une étuve à vide pendant 12 h à  $80^\circ\text{C}$ .

### 5.3 Description du matériau de détection

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) du composé  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  a révélé des agglomérats de nanoparticules dont la taille de faisceau est inférieure à  $5 \mu\text{m}$  (figure 2.8 (a)). Ces agglomérats prennent une forme sphérique et semblent se composer de grains primaires de taille nanométrique. Ensuite, une analyse par microscopie électronique à transmission (MET) a montré que chaque grain comporte un noyau cristallin interne en  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$  ainsi qu'un revêtement externe amorphe en urée (flèches jaunes sur la figure 2.8 (b)), d'une épaisseur comprise entre 3 et 5 nm.

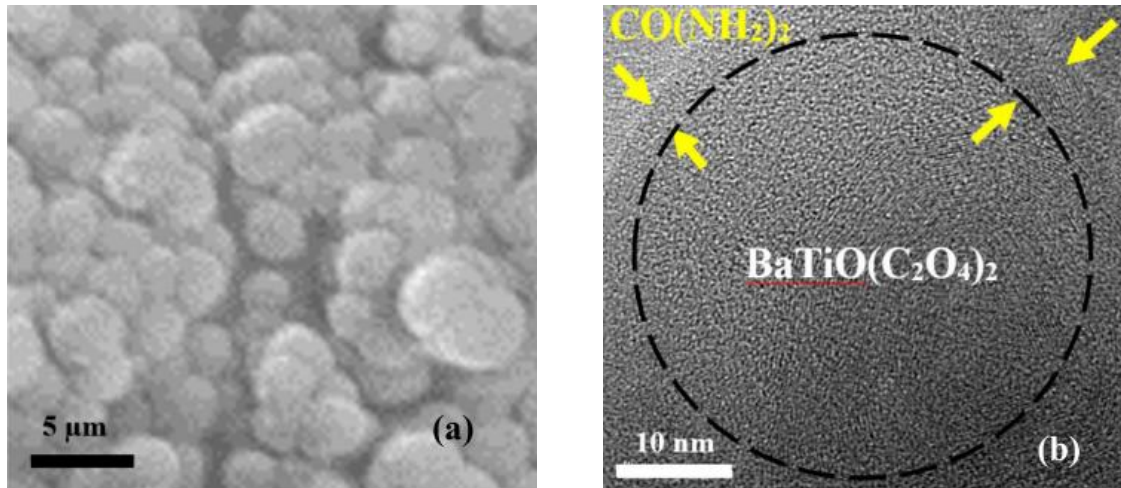


Figure 2.8 : (a) MEB et (b) MET analyses du  $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  nanoparticules [24].

#### 5.4 Performance du capteur

Le matériau obtenu ressemble à de la poudre blanche. Il a été combiné à de l'eau et appliqué sur les doigts IDC avec la technique drop-coating (figure 2.9). À la fin, on a enlevé l'excès de matière pour ne laisser entre les doigts que la matière ( $17 \mu\text{m}$  d'épaisseur).

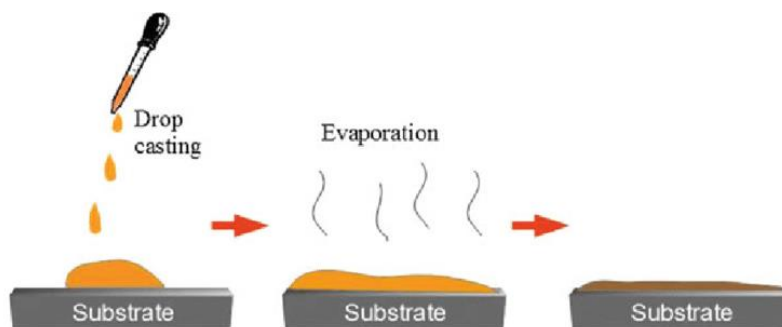


Figure 2.9 : technique du drop-coating [5].

L'antenne SACP, dotée d'un cadre en plastique, est installée dans le générateur d'humidité Thunder Scientific 2500 (figure 2.10), à proximité de la fenêtre en verre pour éviter les ondes électromagnétiques réfléchies par les parois métalliques.



Figure 2.10 : générateur d'humidité Thunder Scientific 2500.

D'abord, la température dans la pièce est maintenue à 23 °C. Ensuite, le capteur est soumis à quatre niveaux d'humidité différents, soit 10 % (air sec), 40 %, 80 % et 95 % HR (fig.26). Le  $S_{11}$  est mesuré chaque minute pour calculer la différence de fréquence de résonance par rapport à la valeur moyenne des données initiales de 10 % HR. Après chaque cycle d'exposition à l'humidité, l'humidité est réduite à 10 % HR pour remettre le capteur à sa valeur de référence. On constate qu'il n'y a pas de différence notable de fréquence lorsque l'humidité est inférieure à 40 % (voir Figure 2.11). En revanche, avec une humidité plus élevée, la fréquence de résonance de l'antenne varie en fonction de la concentration d'humidité. Pour une variation de 10% HR à 95% HR, un décalage d'environ 600 kHz est enregistré.

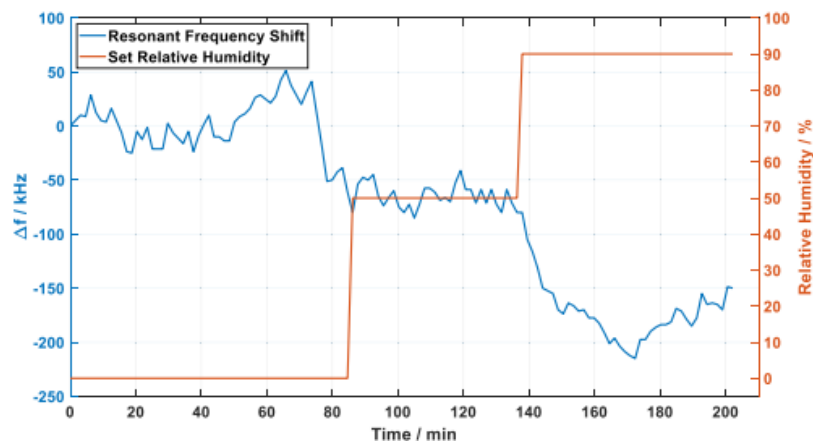
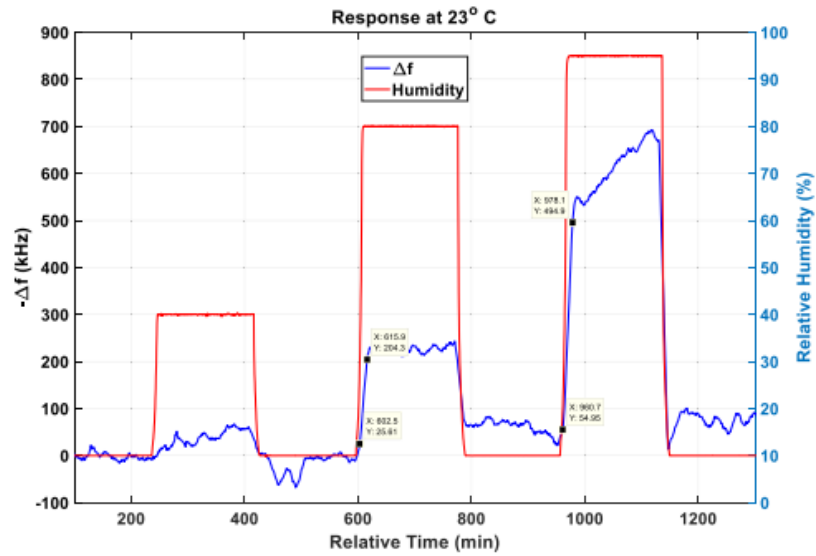


Figure 2.11 : Décalage de fréquence à différentes concentrations d'humidité par rapport à la fréquence de résonance dans l'air sec (10 % HR).





**Figure 2.12 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne à différentes concentrations d'humidité relative (T = 23 °C) [1].**

Ensuite, les mêmes mesures sont effectuées à 30 °C avec des résultats différents, comme le montre la Figure 2.12. En effet, à température plus élevée, pour une même concentration d'humidité relative, la teneur en eau de l'air est plus élevée. Cela explique donc pourquoi la sensibilité est plus élevée à cette température, avec une variation de fréquence de 1,2 MHz observée pour une variation de l'humidité entre 10% HR et 95% HR. Toutefois, aucun changement significatif de fréquence n'a été remarqué pour des niveaux d'humidité inférieurs à 40 % HR. Les mesures sont répétées à 40 °C et des conclusions similaires ont été observées (résultats non tracés par souci de brièveté).

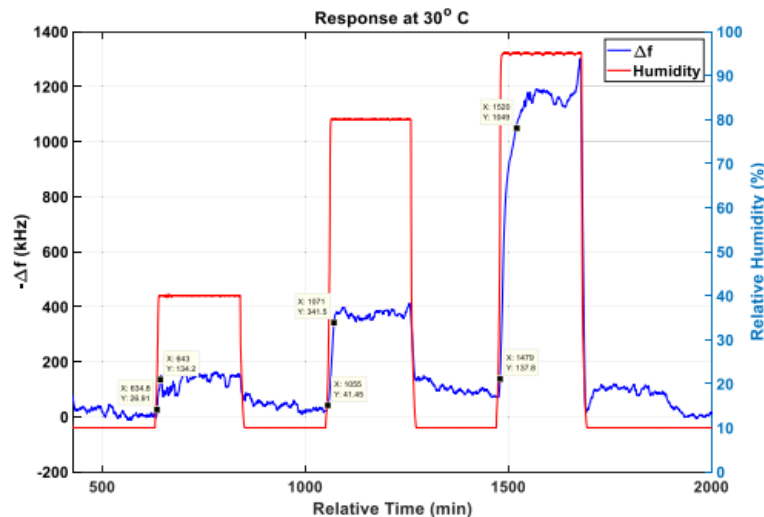
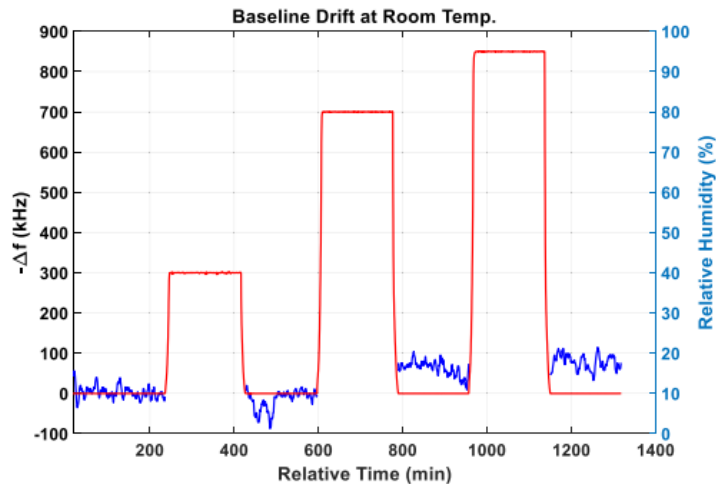


Figure 2.13 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne à différentes concentrations d'humidité relative ( $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [24].

L'Analyse de la sensibilité à l'humidité de l'antenne SACP avant et après le dépôt du matériau de détection a montré dans le premier cas à température ambiante, un décalage de fréquence de 200 kHz a été enregistré pour la variation d'humidité de l'air sec à 90 % HR (voir figure 2.12), avec une sensibilité de 2 kHz par % HR et dans ce dernier cas (figure 2.13), un décalage de 600 kHz est observé pour la variation d'humidité de l'air sec à 95 % HR, ce qui donne une sensibilité de 6,3 kHz par % HR. Cette forte augmentation de la sensibilité à l'humidité (215%) valide les excellentes performances de détection du titanate de baryum déposé entre les doigts de l'IDC. À des températures plus élevées, la sensibilité augmente encore, comme le montre la figure 2.12.

### 5.5 Dérive de la ligne de base

D'après les Figures 2.12 et 2.13, on constate que le capteur se rétracte efficacement à la ligne de base lorsque l'air sec est injecté dans la chambre de test après chaque niveau d'humidité. En raison de l'hystérésis, du bruit de mesure et des erreurs aléatoires, il est prévisible qu'une certaine dérive de la ligne de base se produise lors de chaque cycle de désorption suivant l'exposition au gaz, à cause des processus d'interaction physique se produisant au niveau de la nanostructure du film de détection. Pour évaluer cette dérive, la réponse du capteur à température ambiante dans de l'air sec, mesurée entre les cycles d'adsorption d'humidité, est retracée sur la figure 2.14. Pour les quatre cycles d'air sec étudiés, les décalages de fréquence moyens sont de 7,4032, -15,3204, 62,5736 et 77,7663 kHz. Ainsi, la dérive augmente au fur et à mesure des cycles de désorption suite aux expositions à des niveaux d'humidité plus élevés.



**Figure 2.14 : Décalage de la fréquence de résonance de l'antenne pendant les cycles de désorption caractérisés par de l'air sec ( $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La ligne bleue est la réponse du capteur et la ligne rouge indique le profil d'humidité [24].**

A température ambiante, la dérive moyenne sur presque 24 h est de 33 kHz (moyenne des quatre segments bleus). Cette dérive de la ligne de base est peu élevée (seulement 5 %), comparativement à la réponse du capteur face à une variation d'humidité de 10 % à 95 % HR, entraînant un décalage de fréquence de 600 kHz (figure 2.12). Au fur et à mesure que la température s'élève, la dérive de la ligne de base diminue proportionnellement aux oscillations de la réponse générale (voir figure 2.13).

## 6 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre la conception, la production et les essais d'un capteur imprimé intégré à une antenne ACP de 2,45 GHz. L'élément sensible se compose d'un IDC imprimé couvert d'un matériau nanostructuré à base de titanate de baryum. L'IDC se localise à l'extrémité de la ligne micro-ruban d'alimentation de l'antenne ACP. La position de l'IDC à la fin de la ligne ainsi que le couplage d'ouverture grâce à une fente séparant les deux substrats assurent que le couplage entre le capteur et l'antenne patch est minimisé, favorisant ainsi la sensibilité. Cette solution a résolu les problèmes de désaccord et de perte de sensibilité touchant la configuration normale du détecteur d'antenne patch alimenté en ligne directe, nous avons aussi présenté la synthèse du matériau déposé sur l'IDC.

Une comparaison des mesures de réponse à l'humidité avant et après le dépôt du matériau de détection révèle l'amélioration de la sensibilité de cette nouvelle conception.

**Chapitre 03 :**  
**Simulation et réalisation d'une**  
**antenne ACP fonctionnant à 2.45 GHz**  
**dédiée à la détection d'humidité**

## 1 Introduction

Dans la première partie, on va présenter le logiciel de simulation électromagnétique utilisé : CST MWS (Computer Science Technology Microwave Studio), puis on va présenter la méthode suivie permettant le dimensionnement d'une antenne patch a deux courbes qui fonctionne sur la bande ISM (industrielle, scientifique et médicale) à la fréquence 2.45 GHz qui dédié à la détection d'humidité. Ensuite, on va présenter l'étude paramétrique et les résultats de la simulation de l'antenne aperture coupled patch (ACP). Ainsi que la réalisation et les résultats de mesure obtenue.

## 2 Présentation du simulateur CST Micro-wave Studio

Le logiciel Microwave Studio (MWS) de Computer Science Technology (CST) est un logiciel de simulation électromagnétique de structures en 3-Dimensions. Nous utilisons la méthode temporelle (Transient solver) du logiciel Microwave Studio. Elle est basée sur la technique des intégrales finies (FIT : Finite Integration Technique), pour déterminer les solutions aux problèmes électromagnétiques régis par les équations de Maxwell sous formes intégrales. En ce qui concerne la technique FIT, cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace, identique à celle de la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain).

Le logiciel MWS maille la structure en utilisant des éléments volumiques parallélépipèdes, permettant la description en 3-D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. Il permet aussi de décrire les dispositifs hyperfréquences, tels qu'ils ont été réalisés en pratique, par un empilement des couches de matériaux avec ses propres caractéristiques (permittivité et tangente de pertes dans le cas d'un semiconducteur et conductivité électrique dans le cas d'un métal à pertes).

Microwave Studio offre une interface graphique facile à utiliser, présentée sur la figure 3.4. L'outil inclut les primitives d'objet comme des cubes, sphères, etc.

Après avoir lancé l'environnement de conception de CST, on procède à la création d'un nouveau projet comme le montre la figure 3.2.

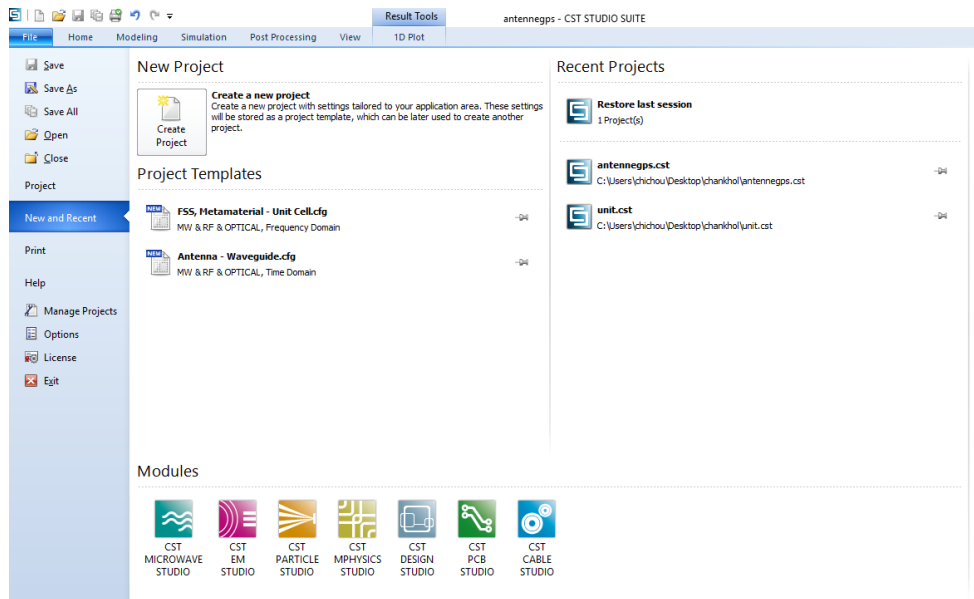


Figure 3.1 : Différents simulateurs dans CST Studio Suite.

La fenêtre ouverte nous invite à sélectionner le modèle le plus convenable pour notre structure (fig. 3.2).

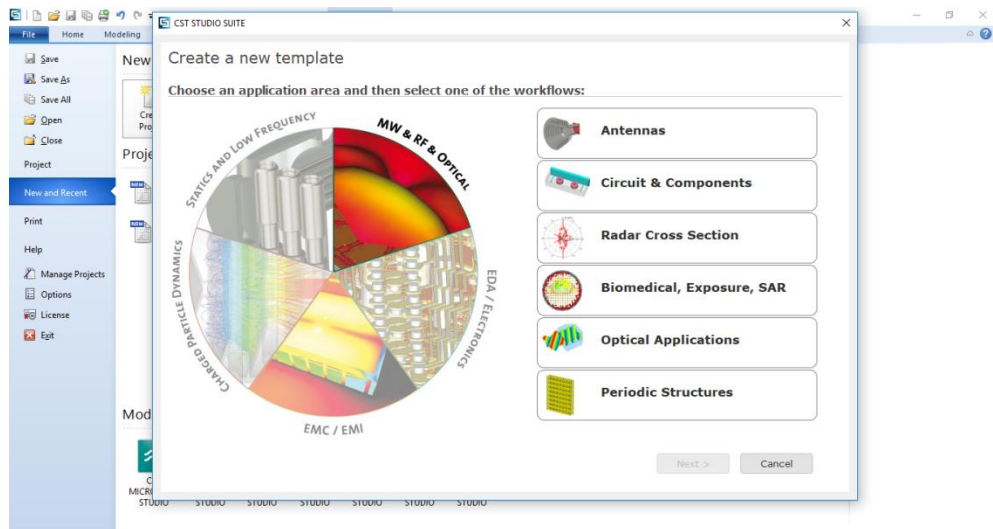


Figure 3.2 : Modèles et leurs descriptions.

Ensuite, on passe à la création de l'antenne à partir du menu "Objects" donné par la figure 3.

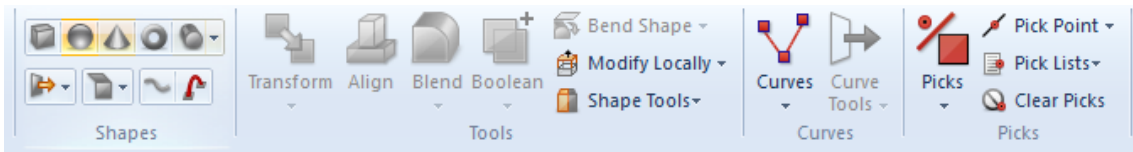


Figure 3.3 : Menu "Objects" dans Microwave Studio.

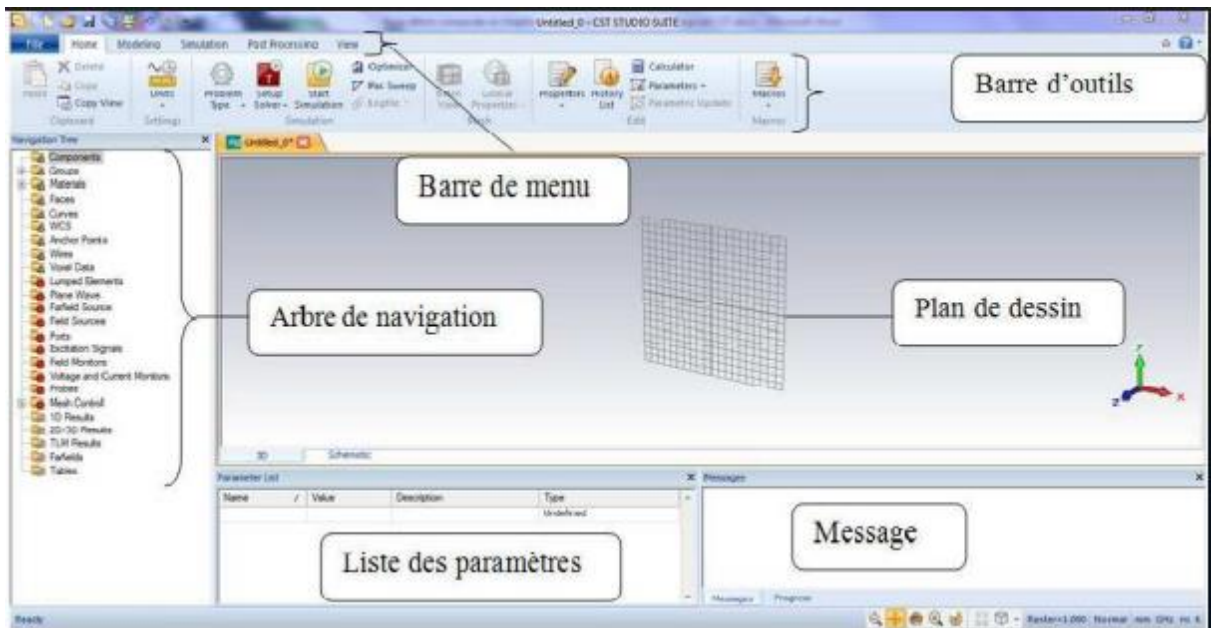


Figure 3.4 : interface du logiciel CST.

Une fois le projet créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST

- À l'entête de l'interface, on trouve la barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu
- A gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation d'où on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- Au corps de l'interface se trouve le plan de travail sur lequel la structure est en 3D.

Au pied de l'interface, nous avons :

- la liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation

- le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparaît

### 3 Simulation de l'antenne ACP

L'antenne est constituée d'une patch rectangulaire de longueur ( $L = 41\text{mm}$ ) et de largeur ( $W = 30\text{mm}$ ) dimensionnée pour une résonance de 2,45 GHz, imprimée sur le substrat Rogers RO4003C de dimensions de  $80 \times 75\text{mm}^2$ , d'une constante diélectrique  $\epsilon_r = 3.38$  et épaisseur  $h = 1,52\text{mm}$ . La ligne d'alimentation a une largeur de 3.3 mm dimensionnée pour une impédance d'entrée de  $50\Omega$ . Les dimensions du plan de masse sont  $80 \times 75\text{mm}^2$  avec une fente de dimensions  $12.4 \times 1.5\text{mm}^2$ . La géométrie et les paramètres sont présentées sur la figure 3.5.

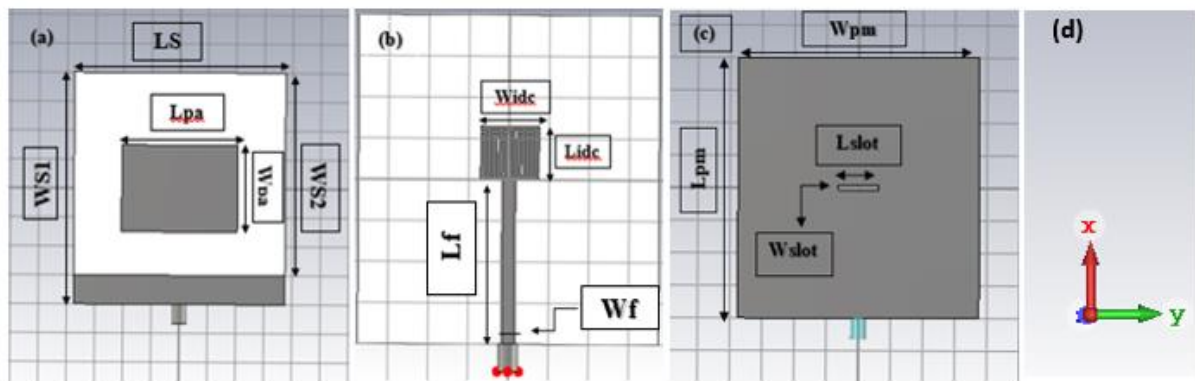


Figure 3.5 : Géométrie de l'antenne. (a) : le top de substrat 1. (b) : le bottom de substrat 2. (c) : plan de masse et fente. (d) : direction de l'antenne.



Comme nous avons indiqué dans le précédent chapitre l'IDC dimensionné comme suivant Figure 3.6 :

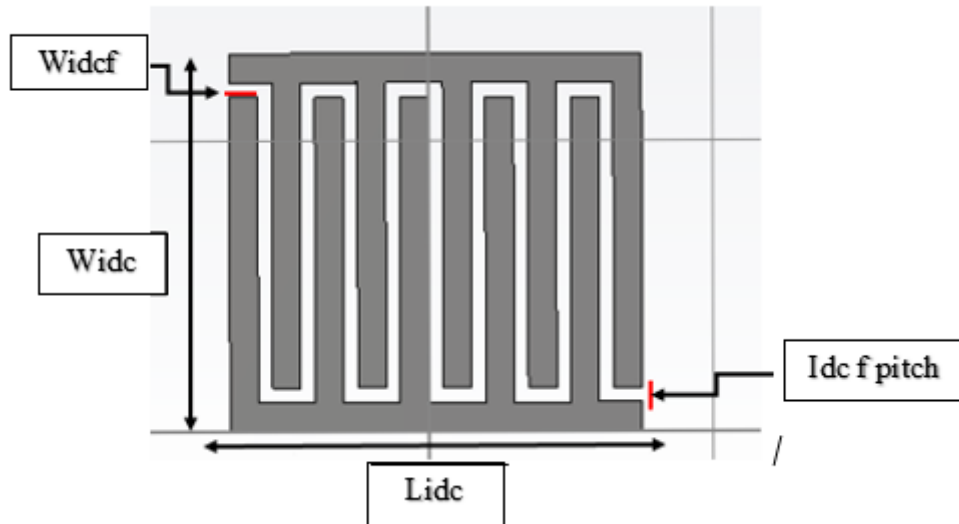


Figure 3.6 : Géométrie de l'IDC.

Tableau 3 : les dimensions des paramètres de l'antenne ACP avec IDC avec substrat Rogers.

Les paramètres	Les dimensions (mm)
Wpa	30
lpa	41
Ws1	40
Ls1	75
Ws2	70
Ls2	75
wpm	80
lpm	75
Wide	13
Lidc	14.5
Wf	3.3
Lf	40
wslot	1.5
lslot	6.2
Wide	13
Lidc	14.5
Width idc finger	1
Idc finger pitch	0.5

Le coefficient de réflexion au port 1 est obtenu après simulation de l'antenne avec le solveur « Transient » de CST Microwave Studio et est présenté sur la Figure 3.7. L'objectif est d'obtenir un module du coefficient de réflexion inférieur à -10 dB dans la bande ISM (industriel Scientifique Médical) avec l'antenne simulé avec substrat Rogers RO4003 à une résonance de 2.45GHz comme le montre la figure 3.7.

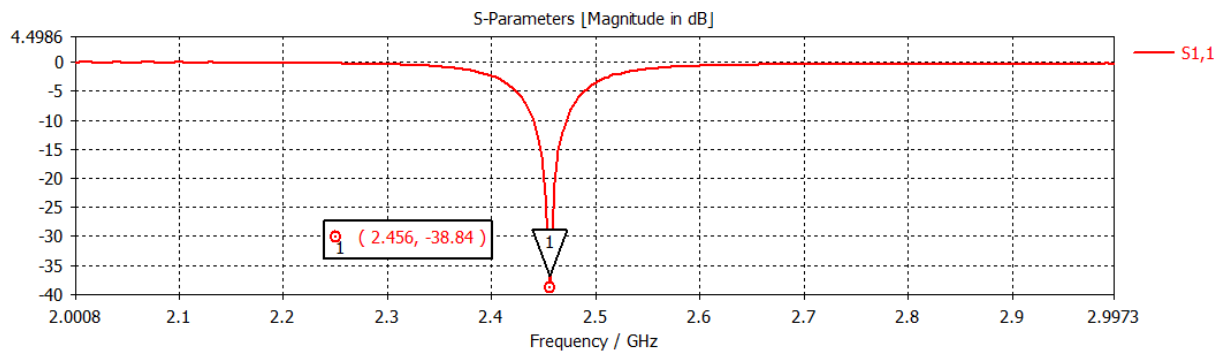


Figure 3.7 : Variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne en fonction de la fréquence.

Pour des raisons de non disponibilité du substrat Rogers RO4003C au laboratoire, le substrat FR4 a été utilisé (figure 3.8). Le module du coefficient de réflexion avec ce nouveau substrat est présenté sur la figure 3.9. On constate que la fréquence de résonance est décalée vers 2.18 GHz car la variation de la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la permittivité du substrat. Les nouvelles dimensions de la structure optimale sont présentées dans le tableau 4.

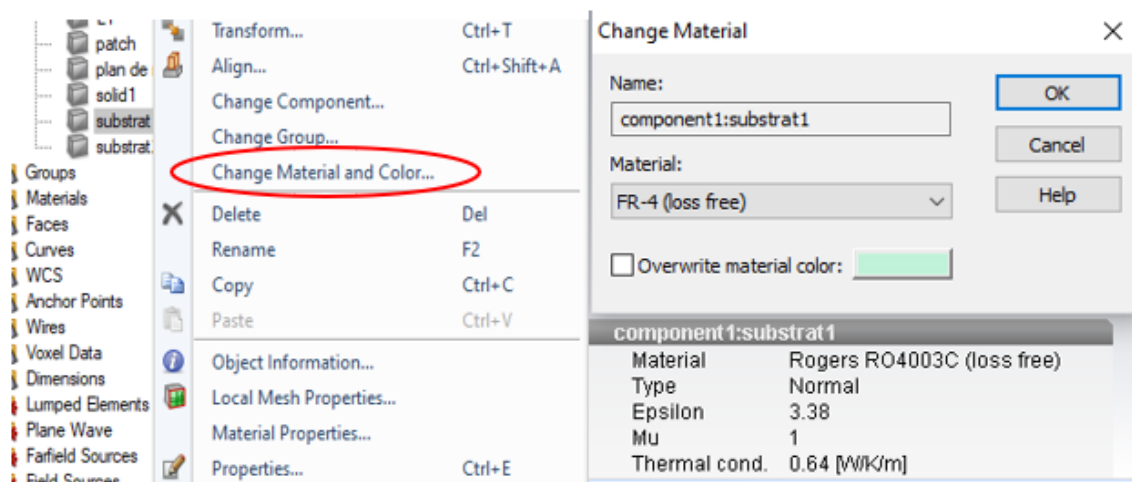


Figure 3.8 : modification du matériau.

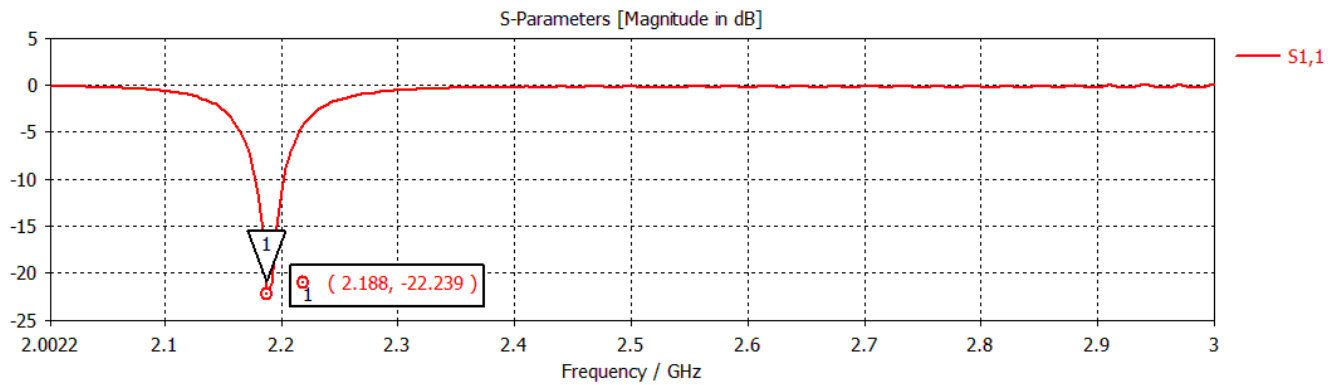


Figure 3.9 : module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

### 3.1 Étude paramétrique :

#### 3.1.1 Influence de la longueur de patch

Nous avons effectués les imulations pour six différentes longueurs ( $x=15.5\text{mm}$ ,  $16.5\text{mm}$ ,  $17.5\text{mm}$ ,  $18.5\text{mm}$ ,  $19.5\text{mm}$ ,  $20.5\text{mm}$ ). Les résultats obtenus sont donnés par la figure 3.10. D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que la longueur n'influence que très peu le coeficient de réflexion.

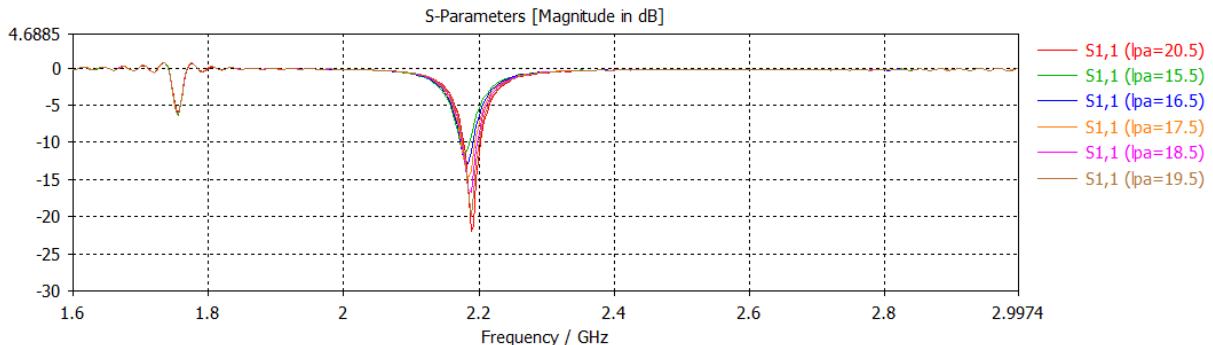


Figure 3.10 : Variation de la fréquence en fonction de la largeur de l'antenne en variant la longueur du patch.

#### 3.1.2 Influence de la largeur de patch

En variant la largeur ( $x=12.5\text{mm}$ ,  $13\text{mm}$ ,  $13.5\text{mm}$ ,  $14\text{mm}$ ,  $14.5\text{mm}$  et  $15\text{mm}$ ) de patch et en gardant tous les autres paramètres fixes, nous obtenons les courbes du coefficient de réflexion implantées dans la figure (3.12). Nous pouvons constater que plus la largeur de l'antenne dimunie plus la fréquence se rapproche à 2.45 GHz.

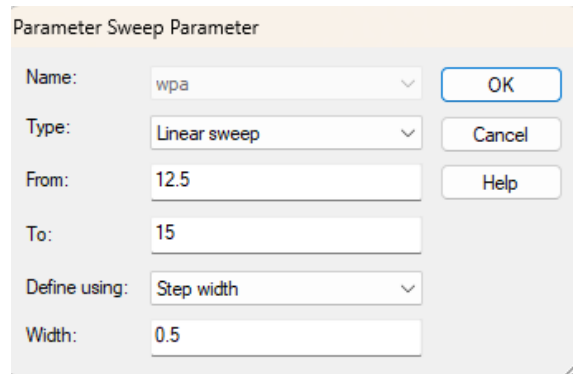


Figure 3.11 : paramètre sweep pour la largeur de l'antenne.

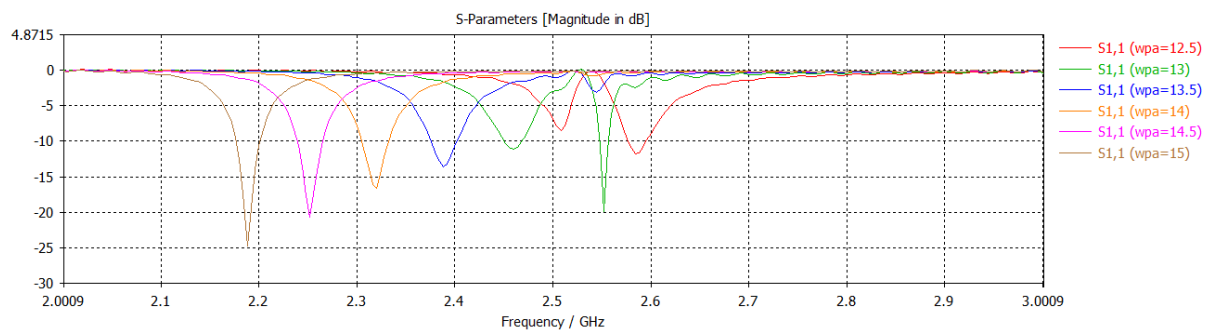


Figure 3.12 : variation de la fréquence de l'antenne en variant la largeur du patch.

On constate d'après cette dernière figure que la fréquence de résonance se rapproche en variant la largeur du patch mais en dépassant 13.5, on observe l'apparition d'une deuxième résonance. Donc on fixe la largeur du patch à 13.5mm.

### 3.1.3 Influence de la position du point d'alimentation

On a fixé la valeur de coordonnée X selon l'axe OX à 40mm et nous avons lancé la simulation pour cinq valeurs de coordonnée Y. Les résultats de la simulation pour ce cas sont illustrés dans les figures (3.14). On remarque que le niveau d'adaptation ne varie pas, donc la largeur de la ligne n'a aucune influence sur la résonance de l'antenne.

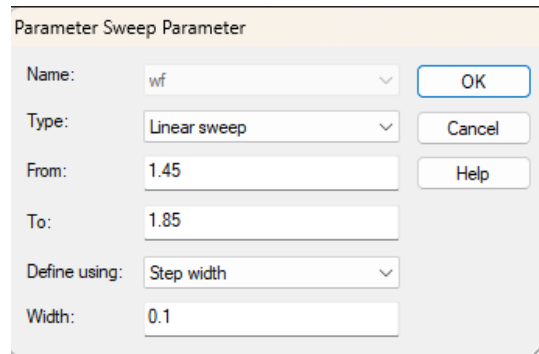


Figure 3.13 : paramètre sweep pour la largeur de la ligne.

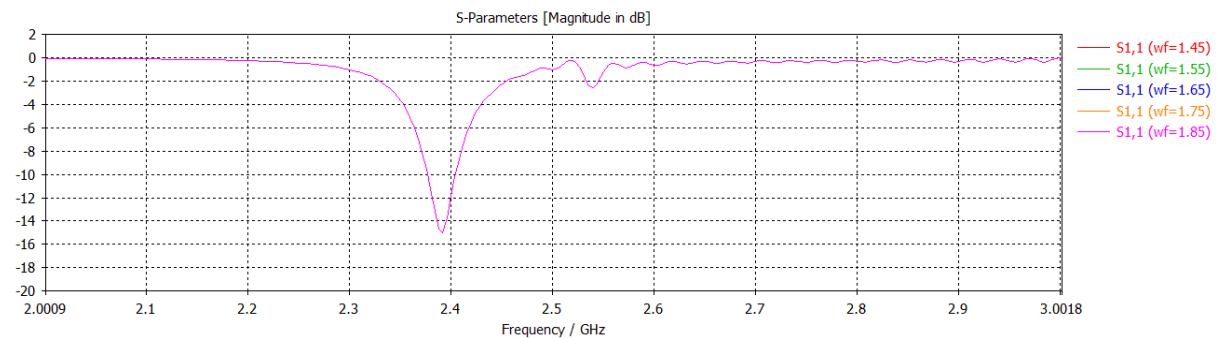


Figure 3.14 : Variation d'adaptation d'antenne en fonction de la position du point d'alimentation(Y).

### 3.1.4 Influence de la largeur de la fente

On varie la largeur de la fente (voir la figure 3.15 (a)) en gardant tous les autres paramètres fixes, nous obtenons les courbes du coefficient de réflexion implantées dans la figure (3.16(a)) où en l'on remarque que pour les différentes largeurs de la fente, les fréquences de résonance se rapprochent de la fréquence de résonance souhaitée entre la largeur de la fente  $w_{slot}=0.15$  et  $w_{slot}=0.25$ . Donc, on a lancé une autre simulation selon la figure 3.15(b) pour voir plus claire, les résultats sont montrés dans la figure 3.16(b) où on constate que la fréquence 2.45GHz est contenu sur la courbe de  $w_{slot}=0.23$ .

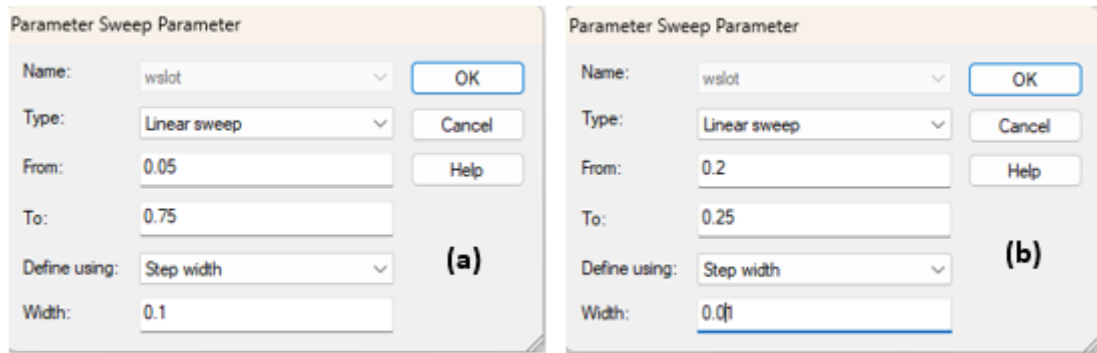


Figure 3.15 : paramètre sweep pour varier la largeur de la fente.

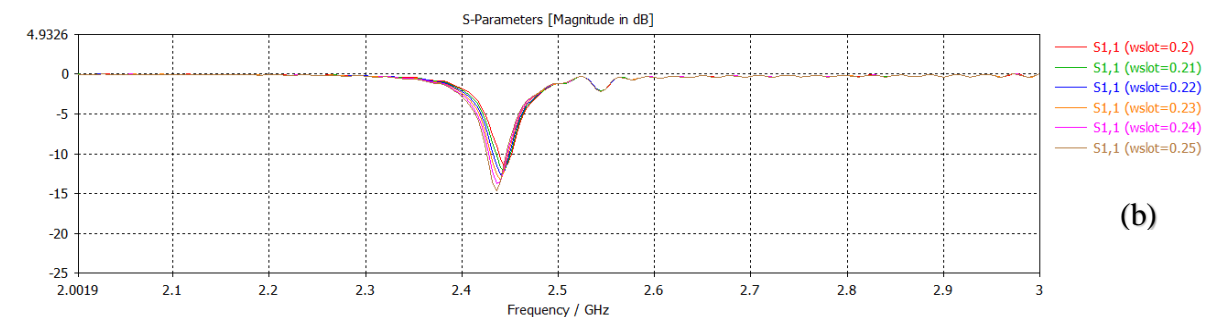
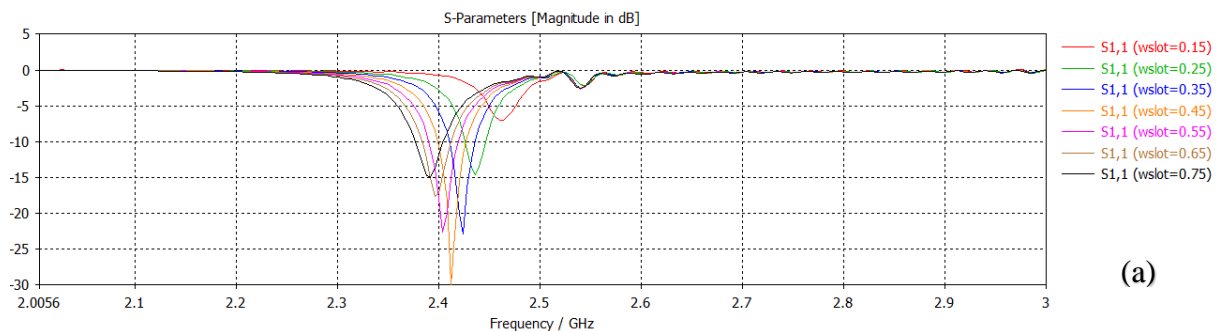


Figure 3.16 : Variation de la fréquence avec la variation la de largeur de la fente.

### 3.1.5 Effet de la longueur de la fente

Avec le même test en variant les longueurs (lslot=5.7mm, 5.8mm, 5.9mm, 6mm, 6.1mm et 6.2mm), on remarque que plus on varie la longueur de la fente, les fréquences s'approchent à la fréquence voulue et s'adaptent aussi (figure 3.18). On constate aussi avoir eu la fréquence de résonance voulue (2.45 GHz) à lslot= 5.9mm mais le coefficient de réflexion est supérieur à -10dB.

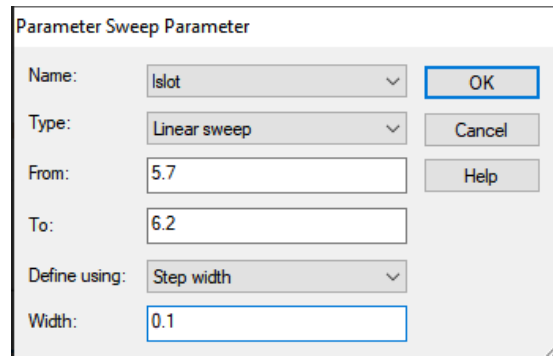


Figure 3.17 : paramètre sweep pour la variation de la longueur de la fente.

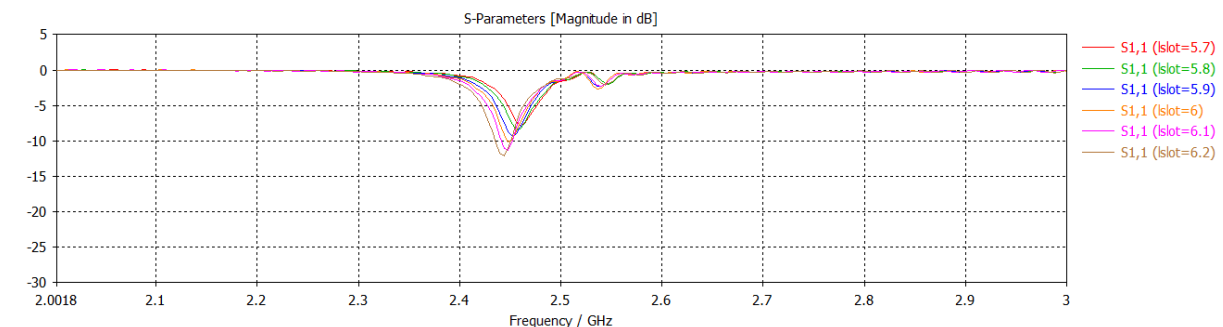


Figure 3.18 : Variation de la fréquence en variant la longueur de la fente.

### 3.1.6 Adaptation de l'antenne

Pour adapter l'antenne, on lance une simulation pour différentes valeurs de la largeur de la ligne de transmission (figure 3.19), où l'on remarque que plus on élargie la ligne de transmission le coefficient de réflexion de l'antenne se rapproche de la bonne adaptation (figure 3.20).

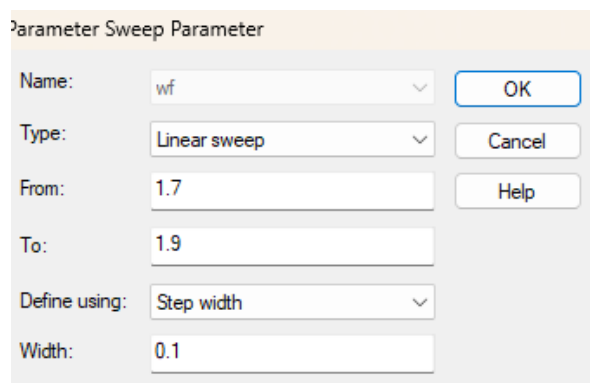


Figure 3.19 : paramètre sweep pour varier la largeur de la ligne de transmission.

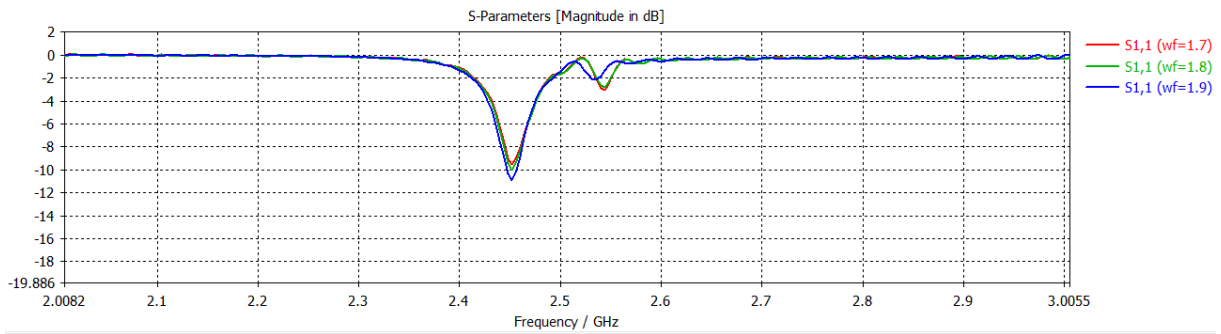


Figure 3.20 : variation de  $S_{11}$  avec la variation de la largeur de ligne de transmission.

### 3.1.7 Simulation d'antenne optimale

On simule l'antenne optimale selon les dimensions qui sont rapportés dans le tableau 4 et on trouve les résultats de la simulation dans la figure 3.21 où on voit qu'on a pu avoir la fréquence de résonance souhaitée pour l'antenne ACP à fente avec le substrat FR4.

Tableau 4 : les nouvelles dimensions de l'antenne ACP avec IDC avec substrat FR4.

Les dimensions	Après (mm)
Wpa	27
lpa	41
Ws1	80
Ls1	75
Ws2	70
Ls2	75
wpm	80
lpm	75
wf	3.8
lf	40
wslot	0.42
lslot	11.8
Widc	13
Lidc	14.5
Width idc finger	1
Idc finger pitch	0.5



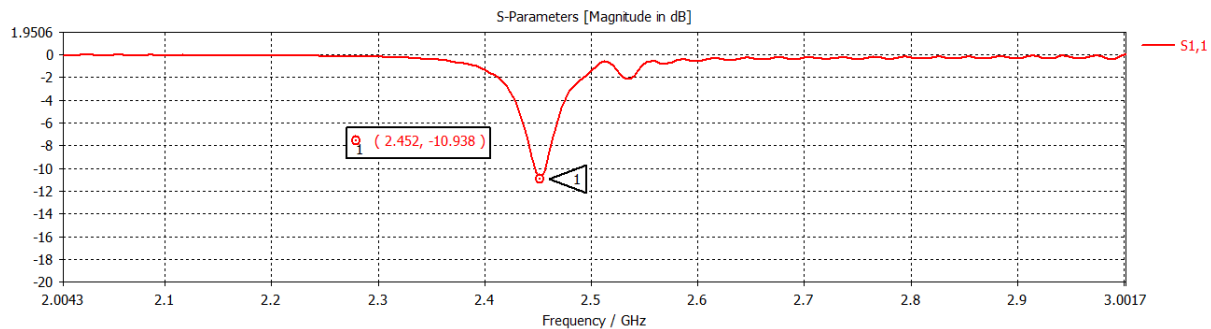


Figure 3.21 : coefficient de réflexion de l'antenne optimal ACP avec substrat FR4.

## 4 Réalisation d'antenne ACP

Après avoir eu tous les paramètres nécessaires et la résonance souhaitée (2.45 GHz) d'antenne grâce au simulateur électromagnétique CST MWS, on passe à la partie de la mise en œuvre de l'antenne ACP.

Dans cette partie on va sélectionner les 3 surfaces (figure 3.22) des composants en pec (patch, plan de masse, IDC) avec leurs points de références pour les exporter en fichier Gerber.

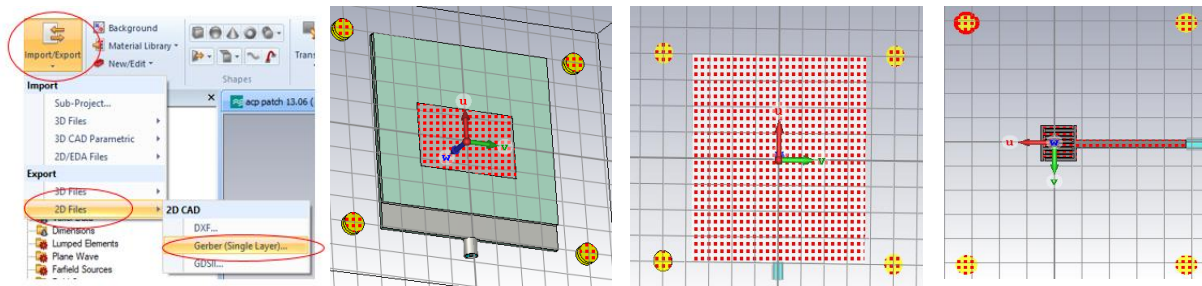


Figure 3.22 : Les trois faces de l'antenne sélectionnée pour les importer en format Gerber.

Afin de procéder à la réalisation de l'antenne, on va utiliser le logiciel Kicad qui permet de faire un schéma, de générer une netliste et de réaliser le typon avec une fonction d'autoroutage. Le logiciel Kicad est un logiciel open source utilisé pour la réalisation de schémas électroniques et de circuits imprimés.

Après avoir importé les faces de l'antenne en fichier gerber à l'aide du logiciel KICAD on les convertis en PDF puis on les imprime sur du papier transparent comme le montre la figure 3.23. Les points de références servent à savoir bien positionnés les faces imprimées.

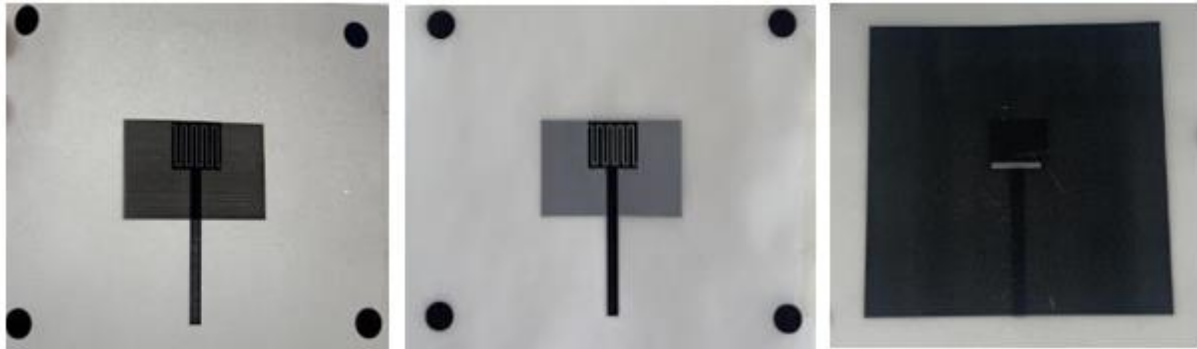


Figure 3.23 : impression des faces de l'antenne sur du papier transparent.

#### 4.1 Fabrication de l'antenne

Cette partie est réalisée au sein du laboratoire de l'institut.

Premièrement, on a superposé les 3 impressions sur les 2 substrats FR4 pour savoir les couper selon les dimensions voulu avec l'appareil de coupage (figure (a).24).

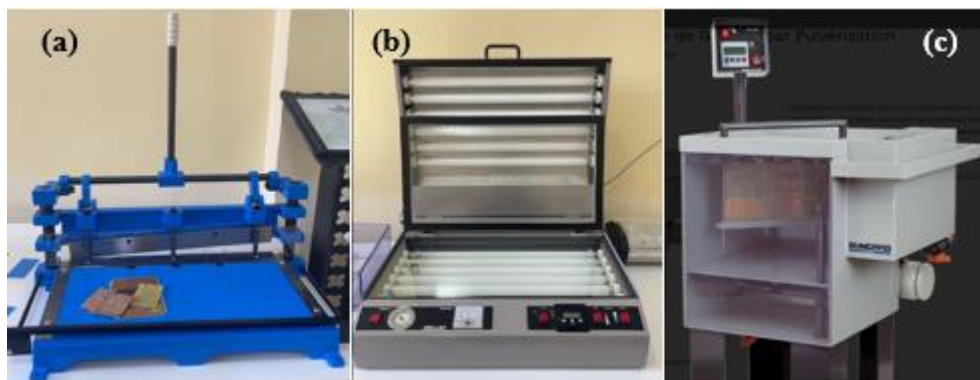


Figure 3.24 : matériels utilisés pour la fabrication. (a) : appareil de coupage. (b) : machine à ultraviolet. (c) : machine à gravure.

Ensuite, on a posé les substrats dans une machine pour les exposés aux ultra-violets (figure (b).24) afin d'éliminer le photorésiste des parties qui ne sont pas protégés avec l'encre qui se trouve sur le papier transparent et ça durant 2min20sec. Puis on insère les substrats dans la machine à gravure (figure (c).24) contenant du chlorure de fer ( $\text{FeCl}_2$ ). Ce dernier élimine le cuivre dans les régions qui ne sont pas protégées par le photorésiste qui a été éliminé dans l'étape précédente.

Après avoir enlevé les substrats de l'appareil, on les a rincés. Puis on a soudé un connecteur SMA sur le substrat contenant la ligne de transmission. Enfin nous trouverons dans la figure 3.25 le résultat final de la réalisation de l'antenne.

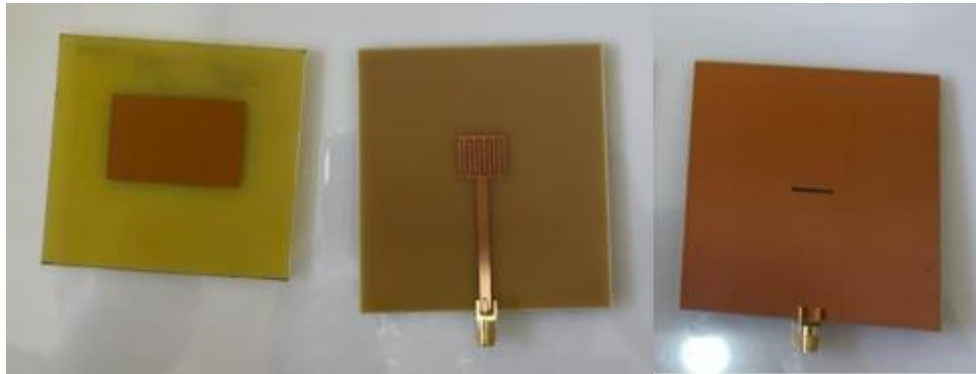


Figure 3.25 : Réalisation de l'antenne ACP.

## 5 Résultat de l'antenne réalisé

Dans cette partie, on va mesurer le coefficient de réflexion avec l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) Rohde & Schwarz fonctionnant jusqu'à la fréquence 20 GHz (figure 3.28). On va premièrement calibrer manuellement le VNA de 2 à 3 GHz avec la méthode OSM (Open, Short, Match) avec le kit de calibration (figure 3.27) . Comme c'est notre première utilisation de l'appareil une connaissance préalable a été nécessaire (figure 3.26).

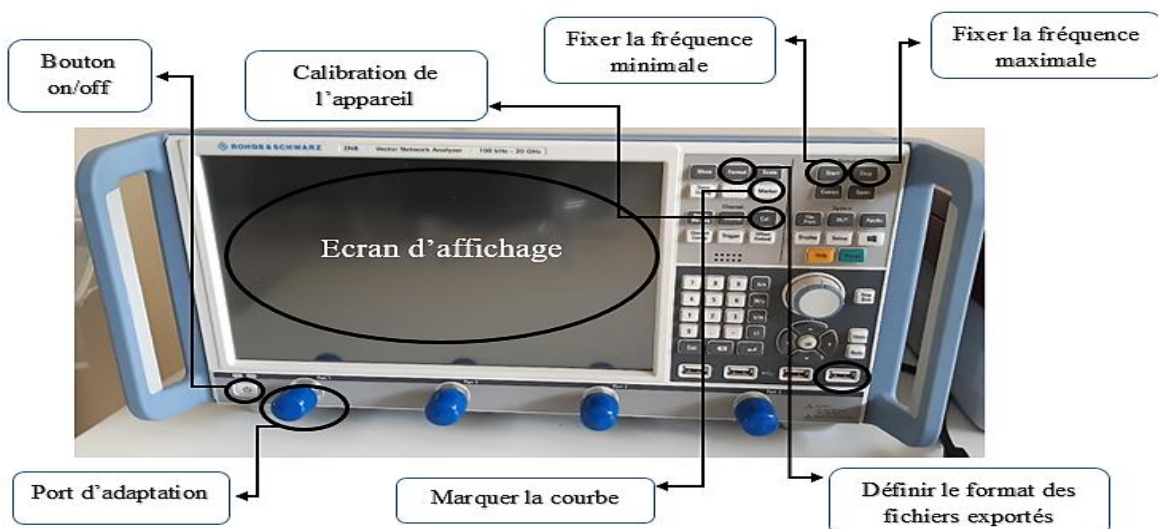


Figure 3.26 : présentation de l'analyseur de réseau vectoriel.



Figure 3.27 : kit de calibration du VNA.

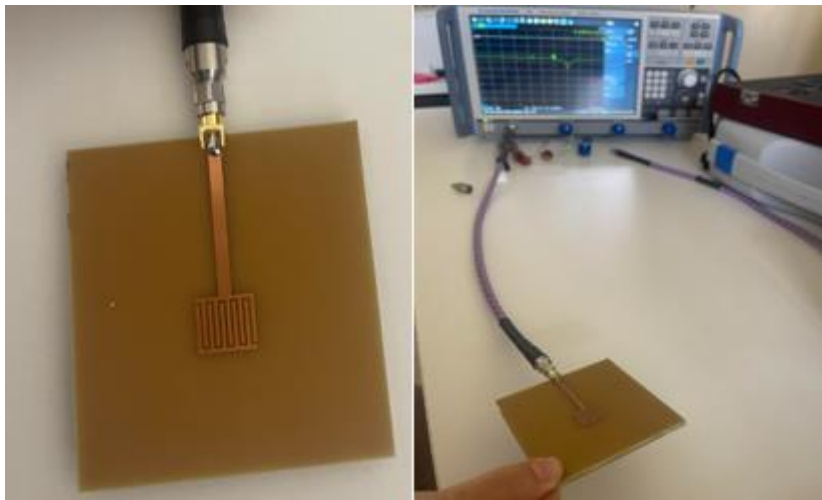


Figure 3.28 : mesure de  $S_{11}$  de l'antenne à l'aide du VNA.

## 5.1 Discussion des résultats simulés et réalisés

La figure 3.29 présente les deux courbes du coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne simulée et mesurée en fonction de la fréquence. On constate un décalage de 38 MHz entre les 2 courbes. Cette différence provient probablement à la constante diélectrique du substrat avec le quelle on a simulé l'antenne qui possède une constante diélectrique de  $\epsilon_r=4.3$  et celle du substrat de l'antenne mesurée est de 4.5 et aussi à cause des imperfections du processus de réalisation. On tient également à signaler que ce n'est pas la structure optimale qui a été réalisée donc une réalisation de la structure optimale est nécessaire qu'on n'a malheureusement pas pu faire à cause du manque de temps.

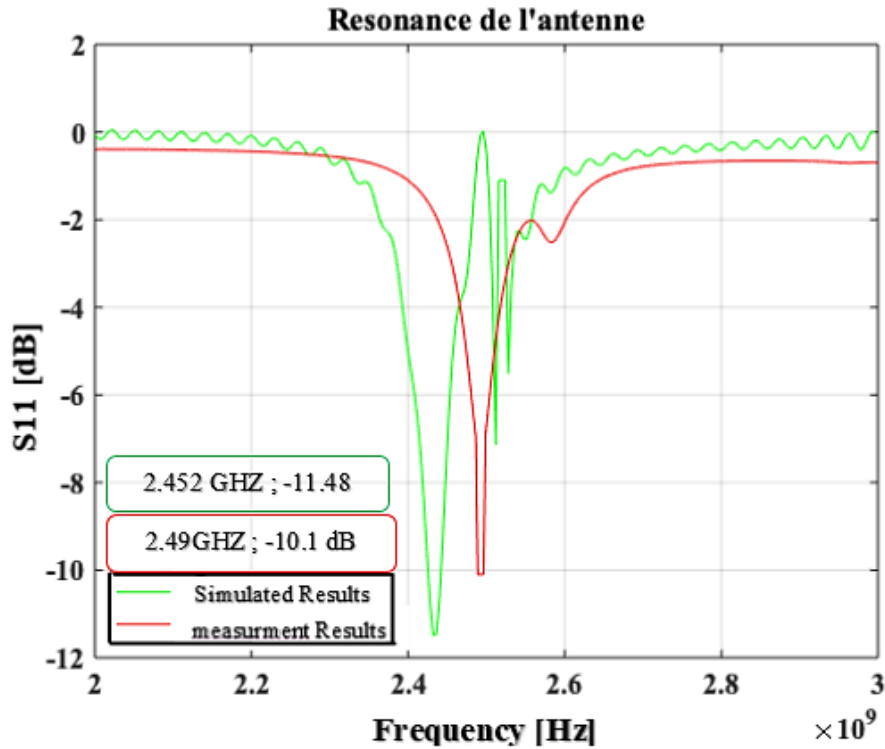


Figure 3.29 : résultats de la simulation et de la réalisation.

## 6 Conclusion

Ce chapitre a été attribué à la simulation et réalisation d'antenne patch couplé à fente. Nous avons commencé par la simulation de l'antenne avec le substrat ROGERS RO4003C qu'on a remplacé avec FR4 tout en passant par une étude paramétrique pour déterminer le paramètre qui est responsable sur la résonance d'antenne souhaitée. Ensuite, nous avons exposé la partie expérimentale tout en présentant le matériel et la méthode utilisée pour la réalisation de l'antenne. Enfin, on a comparé les résultats d'antenne simulés et mesurés puis on les a discutés.

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'études se sont portés sur l'étude, la simulation et la réalisation d'un capteur à base d'antenne micro-ruban couplée à l'ouverture pour la détection de l'humidité. Ce travail a été réalisé en premier lieu avec le logiciel CST microwave studio. Puis après avoir obtenu les résultats souhaités, il a été mis en œuvre au niveau de la plateforme de l'institut d'aéronautique et des études spatiales qui se trouve à l'université SAAD DAHLEB BLIDA 1.

Dans un premier temps une présentation générale des antennes micro-ruban et les antennes capteurs ainsi que l'étude faite sur les articles similaires à notre recherche nous ont permis de bien assimiler leur principe de fonctionnement. Grâce à notre étude bibliographique, nous avons pu établir une base solide pour notre partie de simulation.

Dans la deuxième partie, nous avons fourni une analyse détaillée de l'article sur lequel nous avons basé notre travail. Nous avons présenté sa théorie, sa conception, la simulation utilisée pour le tester, sa fabrication ainsi que les résultats finaux obtenus.

La dernière partie a été consacrée en premier à la conception et la simulation de l'antenne patch couplé à fente à l'aide du logiciel CST Microwave Studio où on a constaté qu'il existe une corrélation inverse entre la largeur du patch  $W$  et la fréquence de résonance : si la largeur augmente la fréquence diminue, et inversement la diminution de la largeur augmente la fréquence. Une fois le modèle est optimisé, Nous avons opté à l'étape de réalisation avec différentes machines. Les mesures effectuées par l'analyseur de réseaux vectoriel (VNA), ont montrés que les résultats trouvés par la réalisation sont en concordance avec les résultats trouvées par simulation. Les petites différences entre les prévisions théoriques et les mesures trouvées sont dues essentiellement à l'incertitude de dimensionnement des antennes imprimées lors de la réalisation, les défauts et le problème de la machine de gravure.

Comme perspective à court termes, l'antenne patch couplée (ACP) optimale à fente doit être réalisée et d'insérer le titanate de baryum avec revêtement d'urée afin de pouvoir détecter l'humidité. A long terme, cette antenne peut être montée sur un drone permettant de collecter les données sur l'humidité s'une zone agricole.

## Bibliographie

- [1] A. Benleulmi, "Étude d'architectures de capteurs RF intégrés au substrat destinés à la mesure diélectrique," Université du Québec à Trois-Rivières, 2018.
- [2] T. Alves, "Conception d'antennes pour le réseau BAN et modélisation du canal de propagation," Université Paris-Est, 2011.
- [3] S. Soloman, *Sensors handbook*. McGraw-Hill Education, 2010.
- [4] M. Howard, D. LeBlanc, and J. Viega, *24 deadly sins of software security: Programming flaws and how to fix them*. McGraw-Hill Education, 2010.
- [5] K. Finkensteller, *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John Wiley & sons, 2010.
- [6] Y. Wu, H. Ma, and D. Gu, "A quartz crystal microbalance as a tool for biomolecular interaction studies," *Rsc Advances*, vol. 5, no. 79, pp. 64520-64525, 2015.
- [7] Y. Wang, "Développement d'un capteur magnéto acoustique on-chip pour la caractérisation des matériaux complexes," Cergy-Pontoise, 2014.
- [8] A. Said, A. Bossuet, S. Bourdel, F. Hameau, and R. Vauche, "Conception d'une antenne patch en bande millimétrique pour la détection non-invasive des caractéristiques de la peau," in *XXII èmes Journées Nationales Microondes 8-10 juin 2022–Limoges*, 2022.
- [9] N. Ullah, M. Mansha, I. Khan, and A. Qurashi, "Nanomaterial-based optical chemical sensors for the detection of heavy metals in water: Recent advances and challenges," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 100, pp. 155-166, 2018.
- [10] D. A. Krohn, T. MacDougall, and A. Mendez, *Fiber optic sensors: fundamentals and applications*. Spie Press Bellingham, WA, 2014.
- [11] C. A. Paragua Macuri, "Conception de capteurs de gaz radiofréquences à base de nanotubes de carbone et imprimés par jet d'encre," Limoges, 2016.
- [12] S. K. Verma, S. S. Bhadauria, and S. Akhtar, "Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures," *Journal of construction engineering*, vol. 2013, no. 2008, pp. 1-11, 2013.
- [13] E. Skiani, S. Mitilineos, and S. Thomopoulos, "A study of the performance of wireless sensor networks operating with smart antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 3, pp. 50-67, 2012.
- [14] D. BELGUELLAOUI, "Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire," DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [15] S. A. Rahmani and N. B. Hacene, "Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques: Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multibandes," ed: avril, 2012.
- [16] R. Ammar, "Etude d'une antenne microruban de forme arbitraire par la méthode FDTD," Thèse de Magister en Electronique présentée a UNIVERSITE FERHAT ABBAS S ETIF ..., 2009.
- [17] N. Kaur, N. Sharma, and N. Singh, "A study of different feeding mechanisms in microstrip patch antenna," *International Journal of Microwaves Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 4-8, 2017.
- [18] M. Arulaalan and L. Nithyanandan, "Analysis of Microstrip Line Feed Triangular Patch Antenna for WLAN (2.4 GHz)," in *Proc. of Int. Conf. on Advances in Communication, Network, and Computing, CNC*, 2014, pp. 802-806.

- [19] L. C. Paul and N. Sultan, "Design, simulation and performance analysis of a line feed rectangular micro-strip patch antenna," *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 117-126, 2013.
- [20] D. Walid, "Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2017.
- [21] D. B. Ganure, S. Mallikarjun, P. Hadalgi, and P. Hunagund, "Proximity Coupled Rectangular Microstrip Patch Antenna for S-band applications," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 124-126, 2015.
- [22] S. Akhir, S. Ibrahim, N. Rosli, A. S. Md Zain, and N. Khalid, "Antenna for humidity sensor using split ring resonator," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, pp. 584-590, 02/01 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v13.i2.pp584-590.
- [23] W. Ge, L. Pei, Y. Liu, and R. Baktur, "Carbon-nanotube-loaded planar gas and humidity sensor," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 12, pp. 3857-3863, 2020.
- [24] G. Gugliandolo, K. Naishadham, G. Neri, V. C. Fericola, and N. Donato, "A novel sensor-integrated aperture coupled microwave patch resonator for humidity detection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, 2021.
- [25] P. Gundewar *et al.*, "Design of a microstrip patch antenna as a moisture sensor," in *2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*, 2019: IEEE, pp. 1-5.
- [26] X. Lin, B.-C. Seet, and F. Joseph, "Wearable humidity sensing antenna for BAN applications over 5G networks," in *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2018: IEEE, pp. 1-4.
- [27] D. M. Pozar, "Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline," *Electronics letters*, vol. 21, p. 49, 1985.
- [28] D. M. Pozar, "A review of aperture coupled microstrip antennas: History, operation, development, and applications," *University of Massachusetts at Amherst*, pp. 1-9, 1996.
- [29] K. Naishadham, "Design of a graphene loaded slot antenna with 100: 1 bandwidth for wireless sensor applications," in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014: IEEE, pp. 894-895.
- [30] I. Oussama, "étude et simulation d'une structure à peignes inter-digités (IDC)," électronique, université SAAD DAHLEB BLIDA 1, BLIDA, 2015.
- [31] G. Gugliandolo, K. Naishadham, N. Donato, G. Neri, and V. Fericola, "Sensor-integrated aperture coupled patch antenna," in *2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, 2019: IEEE, pp. 1-5.
- [32] M. M. Ahamed, K. Bhowmik, and A. Al Suman, "Analysis and design of rectangular microstrip patch antenna on different resonant frequencies for pervasive wireless communication," *International journal of scientific & technology research*, vol. 1, no. 5, pp. 2010-2013, 2012.