

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie
DEPARTEMENT : Electronique
N° : INST/2026



FILIÈRE : Electronique
OPTION : Instrumentation

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:
ALLAL Hadil
NASRI Ali

THÈME

Conception et réalisation d'un capteur de mesure de
salinité a base de la technologie SIW

Soutenu publiquement le : **10/06/2026** devant le jury composé de:

Dr. OUAGUENI Fayssal	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Président
Dr. LAIB Abderrzak	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Examineur
Dr. ABED Ahcene	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Dr. HERIZI Abdelghafour	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2025 /2026

Dédicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۚ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ﴾ [المجادلة: 11]

Le parcours a été long et truffé d'obstacles, mais grâce à la faveur et à la sauvegarde de Dieu je me tiens aujourd'hui sur le point d'obtenir mon diplôme, couronnant ainsi des années consacrées à la quête du savoir. Je dédie avant tout ce succès à moi-même, qui ai persévéré durant toutes mes études, qui ai continué mon chemin vers le succès et la réalisation de mes aspirations.

*Je dédie ce modeste ouvrage à :
Mes chers parents, Salah et Sabrina*

Aucun mot ne saurait exprimer assez ma gratitude et mon amour envers vous. Vous avez toujours été mon pilier, ma source d'inspiration et ma force dans les moments les plus difficiles.

***À mon père**, symbole de sacrifice et de générosité. Tu as tout donné pour que je puisse poursuivre mes études et réaliser mes rêves. Ta sagesse, tes conseils et ton soutien moral m'ont accompagné à chaque étape de ce long chemin. Puisse Dieu te préserver et te donner une longue vie pleine de santé et de bonheur.*

***À ma mère**, la lumière de ma vie. Tes prières, ta tendresse et ton amour inconditionnel ont été mon refuge. Tu as toujours cru en moi, même quand moi-même je doutais. Aucune dédicace ne saurait te rendre justice. Que Dieu te garde auprès de moi pour très longtemps. Ce travail est le fruit de vos sacrifices. Je vous le dédie avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle.*

À mes frères Ali Al-Saeed et Baraa, et ma sœur Hanan.

À mes frères et sœurs chers, à vous qui m'êtes liés par le sang et par l'esprit, à vos cœurs qui battent sans cesse d'amour et de prières pour moi, je dédie cette réussite en témoignage de reconnaissance pour votre précieuse présence dans ma vie et pour m'avoir accompagné à chaque étape de ce parcours.

À mes amis

Avec qui j'ai partagé de merveilleux moments, merci pour votre précieuse présence, vos rires qui ont calmé mes soucis et vos paroles bienveillantes qui m'ont toujours encouragée. Votre amitié sincère n'aura jamais de prix.

À mon Encadreur : Dr. Abed Ahcene

Je vous remercie infiniment pour vos conseils et votre soutien ; ils m'ont été d'une aide précieuse dans mon projet de recherche. Vous avez été l'exemple même du professionnalisme, de l'intégrité et de la fiabilité. Nous prions Dieu de vous accorder une santé et un bien-être constants, et de récompenser vos efforts et votre dévouement. Que le Seigneur vous garde, vous et votre famille.

Hadil

Aux personnes les plus chères au monde,

À mes très chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma profonde gratitude pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance.

Que ce travail soit le fruit de vos prières et sacrifices, et que Dieu tout-puissant vous accorde santé, bonheur et existence prolongée.

À mes frères et sœurs

Merci d'être à mes côtés aux moments éprouvants de ma vie. Merci pour votre sincère amour, et votre appui sans réserve. Que le Dieu vous protège de tout mal.

À toute la famille NASRI

À mes chères amies

Je vous remercie pour votre amitié et pour tous les moments inoubliables qu'on a passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Ali

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens avant tout à rendre grâce à Dieu, qui m'a accordé la connaissance et m'a guidé tout au long de cette réalisation.

Mes remerciements les plus sincères vont à Monsieur **ABED AHCENE** et à Monsieur **HERIZI Abdelghafour**, enseignants à l'Université de M'sila, pour avoir assuré l'encadrement de ce travail avec dévouement. Leur disponibilité, leur rigueur scientifique et leurs précieuses qualités humaines ont été des piliers essentiels dans l'aboutissement de cette étude.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Président ainsi qu'aux membres du jury, qui me font l'honneur d'évaluer ce travail. Leur regard expert est pour moi une marque de considération que j'apprécie vivement.

Enfin, je remercie très chaleureusement toutes celles et tous ceux qui, bien que leur nom ne soit pas mentionné ici, ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Une pensée toute particulière va à ma famille, dont le soutien indéfectible m'a permis d'aller au bout de cette aventure.

ملخص:

تتعلق هذه الأطروحة بإنشاء جهاز استشعار يستخدم تقنية الأدلة الموجية المضمنة في الركيزة أو SIW، لقياس ملوحة الماء. معظم أجهزة الاستشعار المتوفرة حاليا باهظة الثمن ويصعب العثور عليها ولا يمكن دمجها بسهولة في الأنظمة الحالية. لحل هذه المشاكل، نقترح جهاز استشعار باستخدام الركيزة fr4_epoxy وتعمل في نطاق التردد [8 à 12 GHz] يعتمد مبدأ هذا المستشعر على حقيقة أن تردد الرنين يتغير اعتمادا على ملوحة الماء. لتحقيق هذا الهدف، أنشأنا أولا أساسا نظريا يغطي معلومات عامة حول أجهزة الاستشعار ومفهوم الملوحة وطرق القياس. درسنا أيضا الأسس الكهرومغناطيسية للدليل الموجي وتكنولوجيا الاشتراكية الدولية. ثم، استخدمنا برنامج HFSS لمحاكاة أجهزة الاستشعار والتحقق من صحة عملها. أظهرت نتائج المحاكاة أن المستشعر حساس لملوحة المياه وأن النهج المعتمد مناسب. كما كشف النموذج الأولي للمستشعر عن ظهور ترددتين للرنين، مما يؤكد حساسية وأهمية النهج المعتمد.

الكلمات المفتاحية : ملوحة المياه، مستشعرات، الدليل الموجي المضمن في الركيزة، الركيزة FR4-Epoxy

Résumé :

Ce mémoire concerne la création d'un capteur qui utilise la technologie des guides d'ondes intégrés au substrat, ou SIW, pour mesurer la salinité de l'eau. La plupart des capteurs actuellement disponibles sont très chers, difficiles à trouver et ne peuvent pas être facilement intégrés dans les systèmes existants. Pour résoudre ces problèmes, les auteurs proposent un capteur qui utilise un substrat en FR4_Epoxy et qui fonctionne dans la bande de fréquence de 8 à 12 GHz. Le principe de ce capteur repose sur le fait que la fréquence de résonance change en fonction de la salinité de l'eau. Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont d'abord établi un socle théorique qui couvre les généralités sur les capteurs, la notion de salinité et les méthodes de mesure. Ils ont également étudié les fondements électromagnétiques des guides d'ondes et la technologie SIW. Ensuite, ils ont utilisé le logiciel HFSS pour simuler le capteur et valider son fonctionnement. Les résultats de la simulation ont montré que le capteur est sensible à la salinité de l'eau et que l'approche adoptée est pertinente. Le prototype du capteur a également révélé l'apparition de deux fréquences de résonance, ce qui confirme la sensibilité et la pertinence de l'approche adoptée.

Mots-clés : Salinité, capteurs, siw, Fr4-Epoxy.

Summary :

This thesis concerns the creation of a sensor that uses the technology of waveguides integrated into the substrate, or SIW, to measure the salinity of water. Most of the sensors currently available are very expensive, difficult to find and cannot be easily integrated into existing systems. To solve these problems, the authors propose a sensor which uses a FR4_Epoxy substrate and which operates in the frequency band from 8 to 12 GHz. The principle of this sensor is based on the fact that the resonant frequency changes depending on the salinity of the water. To achieve this objective, the authors first established a theoretical base that covers general information about sensors, the notion of salinity and measurement methods. They also studied the electromagnetic foundations of waveguides and SIW technology. Then, they used the HFSS software to simulate the sensor and validate its operation. The results of the simulation showed that the sensor is sensitive to the salinity of the water and that the approach adopted is relevant. The prototype of the sensor also revealed the appearance of two resonance frequencies, which confirms the sensitivity and relevance of the approach adopted.

Keywords : Salinity, sensors, siw, Fr4-Epoxy.

Table des matières

Liste des Abréviations.....	iii
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux.....	v
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 Capteurs de salinité : généralités et principes fondamentaux	3
1.1 Introduction	4
1.2 Historique	4
1.3 Capteurs pour la mesure	5
1.4 Types de capteurs	6
1.4.1 Capteurs passifs	6
1.4.2 Capteurs actifs	7
1.5 Notions sur la salinité	9
1.5.1 Définition.....	9
1.5.2 Catégorie des capteurs de salinité.....	10
1.5.3 Applications des capteurs de salinité.....	11
1.5.4 Caractéristiques d'un capteur de salinité.....	12
1.6 Conception et analyse des capteurs	14
1.7 Conclusion.....	16
Chapitre 2 Guides d'ondes intégrés aux substrats SIW	17
2.1 Introduction	18
2.2 Définition du guide d'onde.....	18
2.2.1 Guides d'ondes classiques.....	19

2.2.2 Equations de Maxwell	19
2.2.3 Modes de propagation	21
2.2.4 Guides d'ondes rectangulaires.....	23
2.2.5 Guides d'ondes circulaires	24
2.3 Guide d'ondes intégrée dans un substrat	25
2.3.1 Caractéristiques modales	26
2.3.2 Dimension du guide d'onde SIW	27
2.3.3 Avantages du guide d'onde	29
2.3.4 Inconvénients du guide d'onde.....	30
2.4 Conclusion.....	30
Chapitre 3 Simulation et résultats expérimentales	31
3.1 Introduction	32
3.2 Présentation du logiciel HFSS.....	32
3.3 Conception d'une structure sous HFSS	34
3.3.1 Création d'un nouveau projet	34
3.3.2 Sauvegarder le projet.....	34
3.3.3 Insertion d'une conception sous HFSS.....	34
3.3.4 Manipulation d'un projet.....	34
3.4 Conception et simulation de capteurs de salinité.....	38
3.4.1 Guide d'ondes (10 GHz)	38
3.4.2 Cavité rectangulaire (10GHz).....	41
3.4.3 Capteur de salinité rectangulaire avec slot (10GHz)	43
3.4.4 Capteur de salinité circulaire (10GHz).....	44
3.5 Relation entre la fréquence de résonance et la salinité	45
3.6 Validation expérimentale	47
3.7 Conclusion.....	48
Conclusion Générale	50
Références Bibliographiques	52

Liste des Abréviations

SIW :	Substrate Integrated Waveguide
PCB:	Printed Circuit Board
TE :	Transversal Electrique
TM :	Transversal Magnétique
TEM :	Transversal Electro-Magnétique
IoT :	Internet Of Things
CAN :	Conversion Analogique Numérique
PSU :	PracticalSalinity Unit
LTCC :	Low Temperature Co-fired Ceramics

Liste des Figures

Figure1.1. Un capteur au sein d'une chaîne d'acquisition.....	6
Figure1.2. Effet piézoélectrique	8
Figure 1.3. Effet photoélectrique.....	8
Figure 1.4. Effet HALL.....	9
Figure 1.5. Effet photovoltaïque.....	9
Figure 1.6. Conductivité de l'eau de mer en fonction de la salinité.....	15
Figure 1.7. Permittivité de l'eau de mer en fonction de la salinité	15
Figure 2.1. Collection de composants de guide d'ondes standard	19
Figure 2.2. Distribution du champ $E \vec{}$ et $H \vec{}$ d'un mode TE dans un guide rectangulaire.....	21
Figure 2.3. Distribution du champ E et H d'un mode TM dans un guide rectangulaire	22
Figure 2.4. Guide d'ondes rectangulaires.....	23
Figure 2.5. Guide d'onde circulaire.....	24
Figure 2.6. Guide d'ondes intégré dans un substrat	25
Figure 2.7. Paramètres d'un guide d'ondes SIW	27
Figure 3.1. Fonctionnement du logiciel HFSS.	33
Figure 3.2. Fenêtre principale du logiciel HFSS.	33
Figure 3.3. Choix d'unité du Modèle.	35
Figure 3.4. Choix du substrat	36
Figure 3.5. Choix de fréquence et de la solution	36
Figure 3.6. Sélection de type de solution.	37
Figure 3.7. Assignement d'une excitation.	38
Figure 3.8. Cavité résonnante SIW.	38
Figure 3.9. Paramètre S_{11} du capteur rectangulaire Fonctionnement du logiciel HFSS.	40
Figure 3.10. Distribution du champ électrique du capteur rectangulaire	40
Figure 3.11. Cavité rectangulaire à port unique.	41
Figure 3.12. Paramètre S_{11} de la cavité rectangulaire.....	42
Figure 3.13. Distribution du champ électrique d'un Cavité rectangulaire à port unique.	42
Figure 3.14. Capteur rectangulaire avec Slot sous HFSS.....	43
Figure 3.15. Paramètre S_{11} du capteur rectangulaire Avec Slot.	43
Figure 3.16. Distribution du champ électrique du capteur rectangulaire avec Slot.....	44
Figure 3.17. Capteur circulaire de salinité en technologie SIW.....	44
Figure 3.18. S_{11} en fonction du taux de salinité.....	45
Figure 3.19. Salinité en fonction de la fréquence de résonance.	47
Figure 3.20. caractérisation du capteur de salinité	47
Figure 3.21. resultat expérimental pour la mesure de salinité	48

Liste des Tableaux

Tableau 1: Capteurs passifs et leurs principes de base [6]	6
Tableau 2: Capteurs actifs et leurs principes de base [6]	7
Tableau 3: Paramètres dimensionnels du capteur simulé	39
Tableau 4: Différences divisées de Newton pour l'estimation de la salinité.....	46

Introduction Générale

Là où les soucis de l'environnement se corsent, il est crucial de garder un œil attentif sur les caractéristiques physico-chimiques des... La salinité, ou le taux de sels dissous dans une solution, influence directement le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, les processus biologiques et diverses utilisations industrielles. De nos jours, sa portée s'étend à divers domaines tels que l'océanographie, l'agriculture de pointe, le traitement et la désalinisation de l'eau, l'industrie agroalimentaire, ainsi que le secteur biomédical. Une estimation précise de ce paramètre permet d'optimiser la gestion des ressources en eau et d'éviter les soucis causés par les fluctuations trop importantes de la concentration saline. En plein dans les fluides. La salinité, c'est super important, tu vois, parce que ça permet de mesurer la qualité de l'eau et de suivre comment elle évolue dans plein de milieux différents.

Les méthodes classiques de mesure de la salinité, reposant essentiellement sur des techniques électrochimiques et conductimétriques, ont toutefois certaines limites en matière de miniaturisation, de sensibilité, de rapidité de réponse et d'intégration dans les systèmes modernes. Devant ces contraintes, il devient indispensable de développer de nouvelles technologies de détection pour concevoir des capteurs plus performants, plus compacts et économiquement accessibles.

Dans cette optique, les technologies hautes fréquence proposent une approche novatrice en raison de leur grande sensibilité aux changements des caractéristiques électriques des matériaux. Le guide d'onde intégré au substrat (SIW : Substrate Integrated Waveguide) représente une option particulièrement captivante parmi ces technologies. Cette configuration combine les bénéfices des guides d'ondes traditionnels, tels qu'une faible perte, une bonne isolation du champ électromagnétique et un haut niveau de qualité, avec la facilité de fabrication et d'intégration des circuits imprimés plats.

Le but premier de cette tâche est donc de créer et d'analyser un capteur microonde de salinité utilisant une structure résonante SIW. Le concept repose sur la connexion entre le champ électromagnétique créé dans la cavité qui résonne et le liquide à analyser. Un changement dans la concentration saline induit une modification des caractéristiques diélectriques de l'environnement, ce qui entraîne un décalage de la fréquence de résonance détectable par le paramètre de réflexion S_{11} .

Pour arriver à ce but, ce document est découpé en trois parties. Le début du livre nous présente les idées de base sur les capteurs, comment ils fonctionnent, leurs particularités et les différentes méthodes utilisées pour mesurer la salinité. Le deuxième chapitre met l'accent sur l'étude de la technologie SIW, sa manière de marcher, ses spécificités et ses multiples applications dans le domaine des capteurs à micro-ondes. Le troisième chapitre expose la création du capteur proposé, les étapes de simulation effectuées à l'aide du logiciel HFSS, et l'analyse des résultats relatifs à la variation de la fréquence de résonance en lien avec la salinité.

Finalement, ce boulot se terminera par une synthèse complète dévoilant les principaux résultats obtenus et les pistes possibles pour améliorer et faire évoluer ce type de capteurs.

Chapitre 1

Capteurs de salinité : généralités et principes
fondamentaux

1.1 Introduction

Les capteurs, c'est un truc super important dans les machines high-tech d'aujourd'hui. Ils servent à plein de trucs, comme la médecine, les bagnoles, les trucs électriques, les usines, et même la science. Leur valeur se trouve dans leur aptitude à contrôler et à évaluer une diversité de paramètres physiques comme la température, la force, la position, la vitesse et la luminosité, parmi d'autres grandeurs compliquées à mesurer directement avec les méthodes électroniques traditionnelles. Au jour le jour, ces senseurs occupent une place essentielle en transformant les événements mécaniques, chimiques et thermiques en signaux électriques exploitables et analysables [1, 2].

D'un point de vue technologique, les capteurs ont grandement participé à l'avancée des technologies de la microélectronique, notamment la technologie du silicium, devenue un élément clé dans la création de ces équipements. En vérité, le silicium, avec ses caractéristiques physiques et mécaniques exceptionnelles, permet la création de capteurs d'une grande précision et à moindre coût, les rendant ainsi parfaits pour les utilisations industrielles et commerciales. Ces capteurs ont prouvé leur efficacité technique et économique dans divers secteurs, en proposant des performances fiables et une intégration fluide avec les circuits électroniques embarqués [3, 4].

C'est dans ce cadre que se situe notre labeur, focalisé sur l'exploration et l'examen d'une catégorie particulière de capteurs, dans le dessein d'enrichir ses performances et d'approfondir notre compréhension de ses mécanismes opérationnels, en se basant sur des schémas mathématiques et des simulations informatiques pour aboutir à des conclusions précises et exploitables sur le terrain.

1.2 Historique

Les premiers capteurs apparaissent dans l'Antiquité. On y retrouve des dispositifs simples comme les horloges solaires et les nilomètres d'Égypte. Ceux-ci permettaient d'évaluer le temps et le niveau des eaux du Nil. Ces mécanismes entièrement mécaniques montrent que les humains avaient dès le début le désir de mesurer les phénomènes naturels. L'objectif était de les prévoir et de les contrôler[5].

La Renaissance est une période de progrès. Galilée crée le premier thermoscope en 1593. Celui-ci est l'ancêtre du thermomètre d'aujourd'hui. En 1643, Torricelli invente le baromètre à mercure. C'est le premier appareil qui mesure la pression atmosphérique. Ces outils innovants posent les bases de la métrologie scientifique actuelle. Ils lient pour la première [13], fois une mesure physique à une échelle graduée et reproductible.

L'arrivée de l'électricité et de l'électromagnétisme a marqué un changement crucial au cours du XIXe siècle. Les thermocouples de Seebeck, découverts en 1821, ont permis de mesurer la température grâce à l'effet thermoélectrique [14].

En 1880, les frères Curie ont inventé la piézoélectricité, ce qui a permis de développer une gamme complète de capteurs de force, de pression et d'accélération. Ces progrès ont mené à la création des premières chaînes de mesure complètes, incluant un capteur, une amplification et une restitution du signal [15 16].

Le vingtième siècle a connu une accélération sans précédent, principalement due à l'électronique et à la physique des semi-conducteurs. L'apparition du transistor en 1947 a ouvert la voie à la miniaturisation des circuits liés aux capteurs [17].

Les microsystèmes électromécaniques, également appelés MEMS, sont apparus dans les années 1970 et 1980. Ces MEMS regroupent différents composants, tels que des éléments mécaniques, des actionneurs et des circuits de traitement du signal, sur une seule puce. Cela a eu un impact considérable sur divers secteurs, notamment l'industrie automobile, l'aérospatiale et la médecine implantable [18 19].

1.3 Capteurs pour la mesure

Un capteur, c'est un outil qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une forme utilisable, telle que la tension, le niveau de mercure, l'intensité ou la déviation de l'aiguille. On mélange souvent (à tort) le capteur et le transducteur : un capteur doit au moins inclure un transducteur [20 21].

Le capteur et l'instrument de mesure se distinguent par le fait que le capteur agit comme une simple interface basique entre un phénomène physique et une information manipulable. En revanche, le outil de mesure est un appareil autonome qui peut marcher sans aide, muni d'un écran ou d'un système de stockage des données. En ce qui concerne le

capteur, il n'en a point en sa possession. Les capteurs, c'est le cœur des systèmes pour choper des infos. Leur utilisation entre dans le domaine de l'instrumentation.

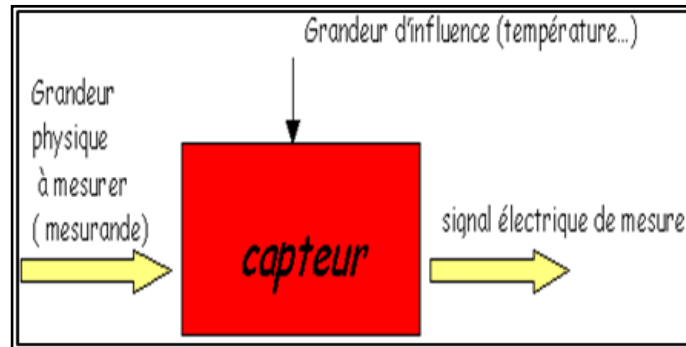


Figure1.1. Un capteur au sein d'une chaîne d'acquisition.

1.4 Types de capteurs

Si nous examinons les phénomènes physiques impliqués dans les capteurs, nous pouvons les classer en deux types : capteurs passifs et actifs.

1.4.1 Capteurs passifs

Dans la plupart des cas, ils ont besoin d'un coup de boost externe pour fonctionner. Ces sont des capteurs qu'on peut représenter par impédance. Des ajustements de l'impédance sont provoqués par des variations dans le phénomène physique observé. Il faut appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie, tu vois.

Voici la représentation des principes physiques fondamentaux des capteurs passifs (Tableau 1).

Tableau 1: Capteurs passifs et leurs principes de base [6]

<i>Mesurande</i>	<i>Grandeur de sortie</i>	<i>Matériau</i>
Température	Résistivité	Platine, Nickel, Cuivre, Semi-Conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité, Perméabilité	Alliages nickel, Alliages ferromagnétique
Position	Résistivité	Magnétorésistances, Antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

1.4.2 Capteurs actifs

Un capteur actif, c'est quand on transforme directement un phénomène physique en électricité pour mesurer quelque chose. C'est la physique en personne qui fait le pont entre la mesure et le signal électrique. Les capteurs actifs sont souvent employés comme moteurs, et dans ce cas, leur sortie correspond à la différence de potentiel. Bien sûr, y a pas beaucoup de lois physiques qui peuvent faire ce genre de transformation, donc on peut repérer facilement les capteurs qui sont actifs. Néanmoins, l'ampleur de l'application est sacrément large.

Le tableau 2 illustre les fondements physiques essentiels des capteurs actifs.

Tableau 2: Capteurs actifs et leurs principes de base [6]

<i>Mesurande</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeur de sortie</i>
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission	Courant
	Pyroélectricité	Charge
Force	Piézoélectricité	Tension
Pression	Piézoélectricité	Tension
Accélération	Piézoélectricité	Tension
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

Les effets physiques les plus classiques sont :

- **Effet thermoélectrique** : Phénomène thermoélectrique : Un montage composé de deux conducteurs ayant des propriétés chimiques distinctes, les températures à la jonction étant T_1 et T_2 , là où se trouve la force électromotrice de la source de chaleur $e(T_1, T_2)$.
- **Effet piézoélectrique**: Lorsqu'on exerce une contrainte mécanique sur certains matériaux, ça peut provoquer des changements intéressants dans leur structure. Les prétendus piézoélectriques (comme le quartz) engendrent des déformations et Les charges de même signe se retrouvent sur les côtés opposés.
- **Effets de l'induction électromagnétique** : Changements dans le courant magnétique d'induction Y'a une vibe qui se crée dans le circuit (quand il capte un objet en métal qui passe).

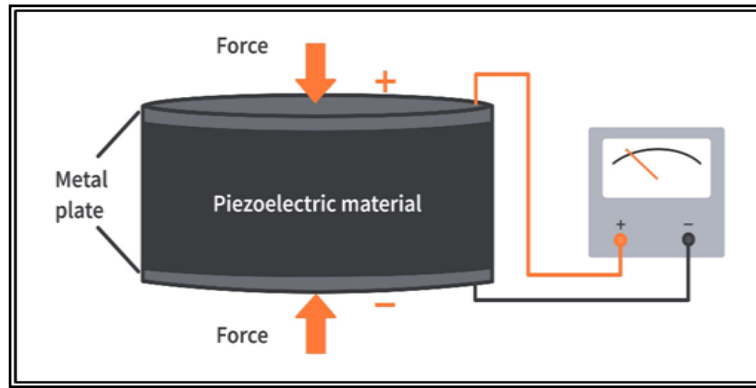


Figure1.2. Effet piézoélectrique

- **Effet photoélectrique** : La libération de charge électrique dans la matière peut être provoquée par divers phénomènes, tels que l'interaction avec le rayonnement lumineux ou plus généralement avec les ondes électromagnétiques. Ces interactions peuvent entraîner des réactions au niveau atomique ou moléculaire, libérant ainsi des charges électriques et générant des effets observables.

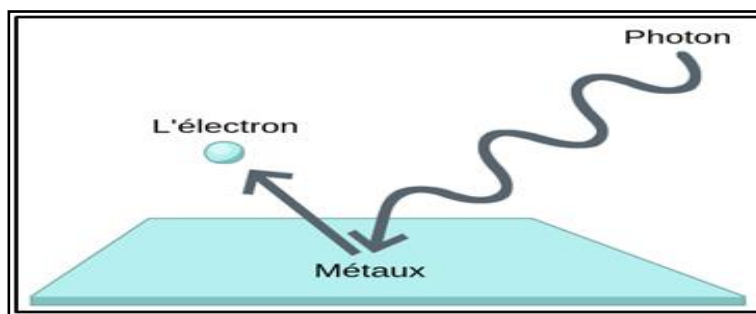


Figure 1.3. Effet photoélectrique

- **Effets de l'induction électromagnétique** : Changements apportés à l'intensité du champ magnétique induit. Une tension est créée dans le circuit lorsqu'il détecte le passage d'un objet métallique, ce qui provoque une réaction électrique mesurable.
- **Effet Hall** : Un champ magnétique B et un courant I interagissent dans un matériau pour créer des phénomènes magnétiques et influencer son comportement. La tension U_H mesure l'énergie potentielle par unité de charge entre deux points d'un circuit électrique. Dans ce cas, la différence de potentiel est de 4 volts, ce qui implique que chaque coulomb déplacé entre ces deux points transfère 4 joules d'énergie potentielle.

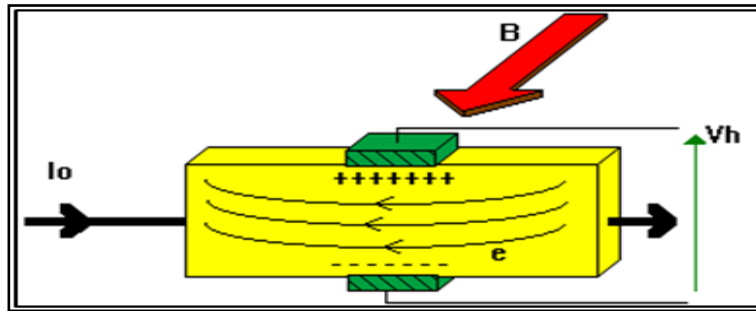


Figure 1.4. Effet HALL

- **Effet photovoltaïque** : Lorsque des jonctions PN sont éclairées, des électrons et des trous sont libérés à proximité. Ce phénomène entraîne un déplacement de ces porteurs de charge, ce qui a pour conséquence de modifier la tension aux bornes des jonctions.

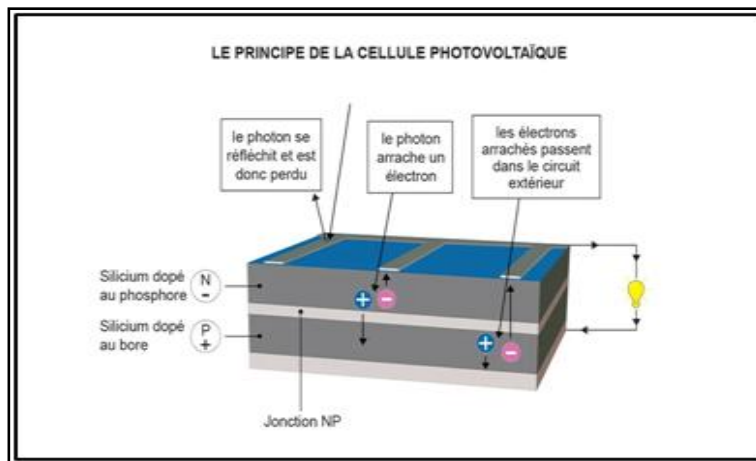


Figure 1.5. Effet photovoltaïque

1.5 Notions sur la salinité

1.5.1 Définition

La salinité d'une étendue d'eau est la quantité de sels minéraux dissous, mesurée en g/kg ou en ‰. Les sels les plus communs sont le chlorure de sodium ($NaCl$), le chlorure de magnésium ($MgCl_2$) et le sulfate de sodium (Na_2SO_4), utilisés en chimie, agriculture et médecine. Quand les sels se dissolvent dans l'eau de mer, ils se séparent en ions chargés. Ces ions donnent à l'eau de mer ses propriétés physico-chimiques spécifiques, comme sa conductivité électrique et sa capacité de dissolution.

Au fil du temps, plusieurs définitions ont été utilisées. La salinité selon Knudsen (1901) correspondait à un indicateur de la chlorinité, c'est-à-dire la concentration en ions halogénures. La définition a été remplacée par celle de l'Échelle Pratique de Salinité PSS-78 définie par l'UNESCO en 1978. La salinité y est définie comme un rapport de conductivités sans dimension, numériquement assimilable à la salinité en g/kg, obtenu en comparant la conductivité d'un échantillon d'eau de mer à celle d'une solution étalon de chlorure de potassium (KCl)[13]. L'Échelle Absolue de Salinité TEOS-10, adoptée en 2010, a affiné cette définition en prenant en compte les variations régionales de la composition ionique de l'eau de mer.

Dans la pratique, la salinité est généralement déterminée indirectement à partir de grandeurs physiques corrélées à la salinité et mesurées in situ : la conductivité électrique de la solution, son indice de réfraction ou sa permittivité diélectrique.

1.5.2 Catégorie des capteurs de salinité

Les capteurs de salinité, c'est des petits trucs automatiques qui servent à attraper des infos sur la quantité de sel dans un endroit et à les envoyer à un système pour les traiter. Trois clans essentiels se démarquent :

A. Capteurs analogiques

En électrotechnique, la sortie dépend de façon continue de la salinité mesurée. La relation entre la sortie et la salinité est définie par une fonction mathématique qui mesure l'impact de la salinité sur cette grandeur électrique. Quand on parle d'une sortie infinie dans un intervalle donné, chaque valeur possible peut être produite en sortie. La gamme de valeurs potentielles est vaste, offrant une grande variété de résultats. Les signaux de sortie des capteurs de salinité peuvent varier : tensions électriques selon la concentration en sel, courants proportionnels à la salinité ou signaux de fréquence modulée en fonction de la teneur en sel.

- Sortie tension (0-5V ou 4-20mA) proportionnelle à la conductivité
- Sortie fréquence variant avec l'indice de réfraction
- Signal d'atténuation ou de déphasage hyperfréquence

B. Capteurs numériques

La sortie est un ensemble d'états logiques formant un nombre représentant la salinité mesurée. Les capteurs numériques de salinité intègrent généralement un convertisseur analogique-numérique (CAN) et transmettent les données via des protocoles de communication standards :

- Protocole I²C ou SPI pour les applications embarquées
- Interface RS-232 ou RS-485 pour les appareils industriels
- Protocoles sans fil (Bluetooth, LoRa, ZigBee) pour l'IoT et les réseaux de surveillance environnementale

C. Capteurs logiques (Tout ou Rien)

Ces capteurs détectent le franchissement d'un seuil de salinité prédéfini. La sortie prend l'une des deux valeurs : état bas (salinité en dessous du seuil) ou état haut (salinité au-dessus du seuil). Ils sont utilisés dans des applications d'alarme, de contrôle de procédés industriels ou de protection des équipements contre les eaux corrosives.

1.5.3 Applications des capteurs de salinité

Il existe de nombreuses applications nécessitant la mesure précise de la salinité [7, 8].

A. Océanographie et sciences marines

- Suivi de la circulation thermohaline des océans
- Étude des masses d'eau et des courants marins
- Profilage vertical de la salinité (CTD : Conductivité, Température, Profondeur)
- Surveillance des estuaires et des zones côtières

B. Aquaculture et pêche

- Gestion de la salinité au sein des bassins d'élevage de crevettes, de poissons et de mollusques
- Optimisation des conditions d'élevage pour maximiser la croissance

- Alerte précoce en cas de perturbation de la salinité (pluies, déversements)

C. Dessalement et traitement de l'eau

- Contrôle de la qualité de l'eau produite par osmose inverse
- Surveillance des membranes de nanofiltration
- Optimisation de l'efficacité énergétique dans les installations de dessalement.

D. Industrie agroalimentaire

- Contrôle de la teneur en sel dans les fromages, charcuteries et conserves
- Mesure de la salinité des saumures de fermentation
- Conformité aux normes alimentaires et de qualité

E. Environnement et agriculture

- Surveillance de la salinisation des sols agricoles
- Contrôle de la qualité des eaux d'irrigation
- Détection de la pollution saline des nappes phréatiques
- Gestion des zones humides et des mangroves

F. Médical et biologique

- Mesure de la concentration ionique dans les fluides biologiques (sang, urine, sueur)
- Contrôle des solutions de perfusion et de dialyse
- Surveillance des milieux de culture cellulaire

1.5.4 Caractéristiques d'un capteur de salinité

Pour définir un capteur de salinité, on évalue divers critères pour mesurer ses performances et son efficacité. Parmi les critères courants pour cette évaluation, on trouve les critères [8, 9, 10] :

A. Résolution

On peut décrire la résolution comme étant la plus minuscule différence de salinité capable d'être perçue et fournissant une indication significative. Pour les applis océanographiques, il est souvent nécessaire d'avoir une résolution d'environ 0,001 PSU (Practical Salinity Unit).

B. Sensibilité

Décris-moi la capacité du capteur à repérer la moindre fluctuation de salinité. Elle est déterminée en comparant la variation du signal de sortie à la variation correspondante de salinité. Un capteur haut fréquence affiche une sensibilité mesurée en mégahertz par gramme par litre ou en mégahertz par PSU.

C. Reproductibilité

Ce critère-là, c'est sans doute le plus crucial pour les capteurs de salinité. C'est la capacité du capteur à fournir, dans des conditions spécifiques, des réponses très similaires lorsqu'on applique à plusieurs reprises une même concentration saline.

D. Sélectivité

La sélectivité revêt une importance capitale lors de l'évaluation de la salinité, car divers autres facteurs tels que la température, le pH et la pression exercent une influence sur les caractéristiques mesurées de la solution. Le capteur parfait devrait être le moins sensible possible à ces facteurs perturbateurs.

E. Étendue de mesure

L'étendue de mesure définit la plage de salinité sur laquelle le capteur peut fonctionner correctement. Par exemple, un capteur pour l'eau de mer doit couvrir la plage 0-40 PSU, tandis qu'un capteur pour les saumures industrielles peut nécessiter une plage allant jusqu'à 300 g/L.

F. Stabilité et dérive

La stabilité dans le temps est particulièrement importante pour les capteurs déployés en milieu marin, où le biofouling (encrassement biologique) peut modifier significativement

les performances du capteur. La dérive est l'évolution lente du signal de sortie dans le temps à salinité constante.

G. Temps de réponse

Il s'agit du délai requis pour que le capteur émette un signal reflétant une nouvelle valeur de salinité suite à un changement soudain. Les capteurs haute fréquence ont souvent une réactivité très rapide (de l'ordre de la microseconde).

1.6 Conception et analyse des capteurs

La conductivité et la permittivité de l'eau de mer sont reconnues pour fluctuer selon les changements de salinité et de température. La température de surface de l'eau marine varie entre 10 et 30 °C, mais la température en dessous de la thermocline permanente demeure entre 10 et 15 °C. À température stable, la permittivité et la conductivité changent selon la salinité à un rythme constant. La salinité peut ainsi être évaluée grâce à la permittivité ou à la conductivité. Toutefois, les fluctuations de température peuvent provoquer des erreurs dans la mesure de la salinité. Pour mesurer avec précision la salinité, on utilise généralement un thermomètre à résistance de platine ou une thermistance pour déterminer la température et compenser l'effet de la température sur la salinité. L'expression du premier ordre approximative de la conductivité σ [23] peut être formulée de la manière suivante :

$$\sigma = 0.098S + 0.0716T - 0.348 \quad (01)$$

où S et T représentent respectivement la salinité et la température. De même, la permittivité basée sur l'équation de Wentz [24–25] peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{3.70886 \times 10^4 - 8.2168 \times 10T}{4.21854 \times 10^2 + T} \cdot \exp(b_0S + b_1S^2 + b_2TS) \quad (02)$$

Où b_0 , b_1 et b_2 sont des coefficients d'ajustement déterminés comme suit :

$$b_0 = -3,56417 \times 10^{-3} \quad (03)$$

$$b_1 = 4.74868 \times 10^{-6}$$

$$b_2 = 1.15574 \times 10^{-5}$$

En utilisant les équations (1) et (2), on peut déterminer les variations de la conductivité et de la permittivité en fonction de la température et de la salinité, tel qu'illustre la figure 1.6 et 1.7.

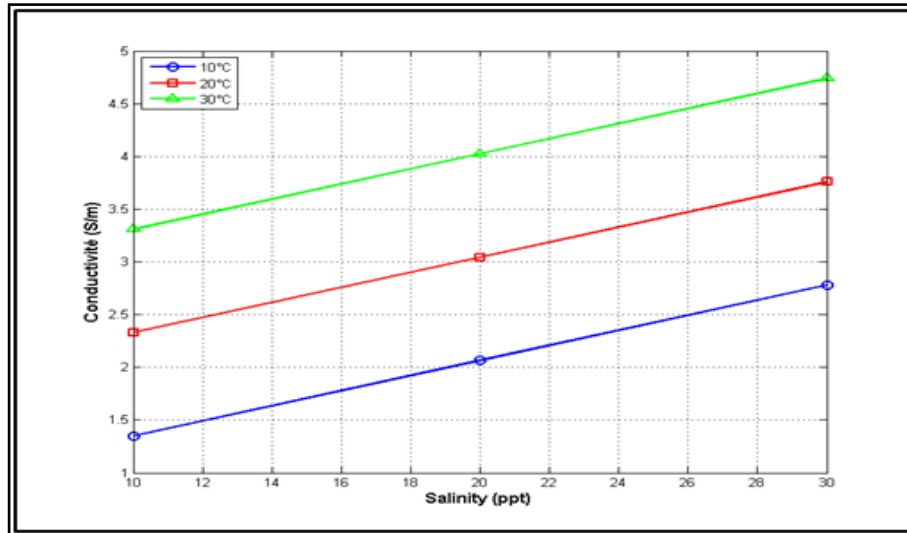


Figure 1.6. Conductivité de l'eau de mer en fonction de la salinité

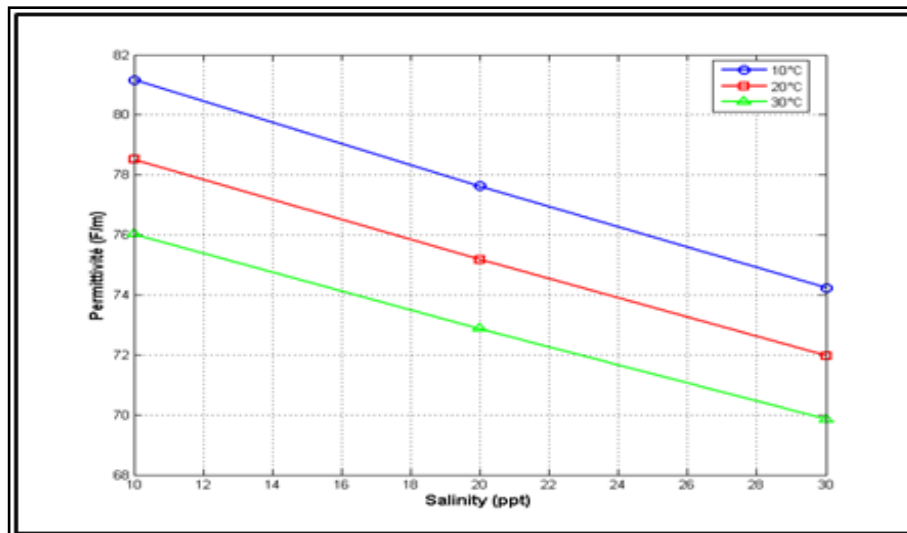


Figure 1.7. Permittivité de l'eau de mer en fonction de la salinité

On remarque que les pentes de la permittivité et de la conductivité à des températures constantes de 10 °C, 20 °C et 30 °C sont respectivement de 0,244 et 0,098. Les variations de conductivité et de permittivité à température constante sont respectivement de 1,47 et 3,67.

Ces résultats montrent que la variation de permittivité est 2,5 fois plus réactive que la variation de conductivité. À partir de cette observation, on peut anticiper une meilleure évaluation de la salinité en raison de l'emploi des fluctuations de permittivité.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre établit les fondations pour comprendre les capteurs, en particulier ceux de salinité. Il retrace l'évolution des capteurs depuis les instruments antiques jusqu'aux microsystèmes électromécaniques contemporains, en mettant en lumière des découvertes clés du XIXe siècle comme le thermocouple et la piézoélectricité, ainsi que l'avancée de l'électronique au XXe siècle. La définition des capteurs est accompagnée d'une différenciation entre capteurs passifs, nécessitant une alimentation externe et fonctionnant par changement d'impédance, et capteurs actifs, convertissant directement des phénomènes physiques en signaux électriques grâce à des effets comme la piézoélectricité ou l'effet Hall.

Par la suite, le chapitre aborde la salinité, en définissant concept et méthodes de mesure qui ont évolué au fil du temps. Il présente également divers types de capteurs de salinité — analogiques, numériques, et tout-ou-rien — et leurs applications dans des domaines tels que l'océanographie, l'aquaculture et la médecine. Les caractéristiques essentielles des capteurs de salinité comme la résolution, la sensibilité et la stabilité sont discutées. En conclusion, les propriétés électromagnétiques de l'eau de mer sont examinées, établissant le lien entre permittivité, conductivité, température et salinité. La variation de la permittivité, étant plus sensible que celle de la conductivité, démontre l'intérêt des capteurs hyperfréquences pour des mesures précises de salinité. Ce chapitre prépare ainsi le terrain pour les chapitres suivants, consacrés à la conception et à la modélisation des capteurs de salinité.

Chapitre 2

Guides d'ondes intégrés aux substrats SIW

2.1 Introduction

Les guides d'ondes SIW intégrés dans le substrat (Substrate Integrated Waveguide) représentent de tout nouveaux genres de lignes de transmission. Ils mettent en place des guides d'ondes sur une partie du circuit imprimé, en imitant les côtés du guide d'onde avec des rangées de vias métalliques. Ce procédé allie les bénéfices des techniques de micro-ruban pour leur compacité et leur facilité d'intégration, à ceux du guide d'ondes pour diminuer les pertes de radiations. Cela ouvre une nouvelle perspective pour la conception de circuits micro-ondes et d'antennes économiques [26].

En ce chapitre, nous allons vous dévoiler une méthode à la pointe et captivante pour élaborer de tout nouveaux genres de capteurs, spécialement des capteurs de salinité. Cette méthode est basée sur l'utilisation de guides d'ondes intégrés sur un substrat SIW (Substrate Integrated Waveguide).

2.2 Définition du guide d'onde

Un guide d'ondes, c'est juste un tube en métal vide, avec une forme rectangulaire ou circulaire, qui permet de diriger les micro-ondes. Les guides d'ondes, en général, sont utilisés pour les fréquences micro-ondes et optiques, tandis que les lignes de transmission sont préférées pour des fréquences plus basses.

Dans un manuel d'ondes, les ondes EM peuvent voyager à travers divers modes, tels que les modes Transverse Électrique (TE) et Transverse Magnétique (TM). La vague TE, elle a juste un champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction où elle avance (donc, les parties qui vont de haut en bas, $E_z = 0$ et $H_z \neq 0$). La vague TM se distingue par la présence de champ magnétique seulement dans le plan transversal (autrement dit, $H_z = 0$, et $E_z \neq 0$). Soit l'une, soit l'autre possibilité peut assurer une diminution minime des pertes et une performance maximale, pourvu que l'intérieur du guide d'ondes reste propre et sec. Ces spécificités font des guides d'ondes des éléments essentiels dans différentes utilisations, telles que les systèmes radar, les communications par satellite, les équipements micro-ondes et les capteurs électromagnétiques [27].

Pour bien marcher, un guide d'ondes doit avoir un diamètre qui correspond à la longueur d'onde du signal. Si le conduit d'ondes est trop serré ou si la fréquence est trop faible (ce

qui provoque une longueur d'onde trop grande), la diffusion des champs électromagnétiques devient impossible. À chaque fois que l'on dépasse la limite (la fréquence minimale à laquelle le guide d'ondes est assez large), la ligne d'alimentation marchera comme il faut, même si quelques aspects de son fonctionnement pourraient changer en fonction du nombre de longueurs d'onde dans la section transversale.

2.2.1 Guides d'ondes classiques

Dorés Clark Maxwell, à l'origine du champ de l'électromagnétisme moderne et des bases théoriques des micro-ondes, est le créateur des équations qui lui sont dédiées. Maxwell a posé ses équations dans son livre sur l'électricité et le magnétisme, c'était en 1873. Environ une quinzaine d'années plus tard, le savant Heinrich Hertz mettra en scène l'expérience de production et de détection des ondes électromagnétiques à une fréquence d'environ 1GHz. Ces vibrations sont baptisées du nom de ondes hertziennes. En l'an de grâce 1897, Lord Rayleigh a démontré la possibilité de faire voyager des ondes à travers des tubes métalliques vides de forme rectangulaire ou circulaire, communément appelés guides d'ondes [27].

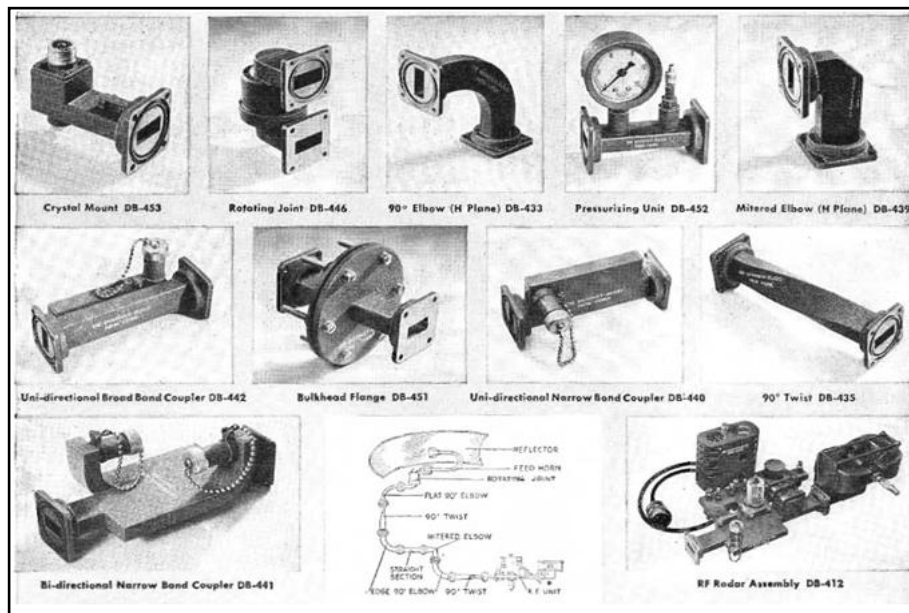


Figure 2.1. Collection de composants de guide d'ondes standard

2.2.2 Equations de Maxwell

Les formules de Maxwell forment un ensemble de quatre équations complexes qui décrivent le domaine de l'électromagnétisme [28]. Ces formules décrivent comment les

champs électriques et magnétiques se déplacent, interagissent entre eux et comment ils réagissent face aux objets.

L'expansion de la lumière, c'est un processus électromagnétique qui est régi par les équations de Maxwell. Ces formules revêtent une importance capitale en physique et leur simplicité leur confère une élégance majeure : seulement quatre équations sont nécessaires pour décrire l'immensité du domaine de l'électromagnétisme [29].

- Équation de Maxwell-Gauss :

$$\text{div } \vec{D} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (04)$$

- Équation de Maxwell-Faraday :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (05)$$

- Équation de Maxwell-Thomson :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (06)$$

- Équation de Maxwell- Ampère:

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (07)$$

Avec :

- ϵ : permittivité diélectrique du matériau.
- μ : la perméabilité magnétique du matériau.
- ρ : la densité volumique de charge électrique.
- j : la densité de courant de conducteur.
- $\vec{E}$: le vecteur d'intensité du champ électrique.
- $\vec{H}$: le vecteur d'intensité du champ magnétique.
- $\vec{D}$: est le déplacement électrique
- $\vec{B}$: est l'induction magnétique.

2.2.3 Modes de propagation

Les champs électromagnétiques capables de voyager à l'intérieur d'un guide doivent obéir aux équations de Maxwell et respecter les contraintes imposées par les parois du guide dans toutes les directions. En réalité, il existe plusieurs options envisageables pour E et B, qu'on appelle communément des "modes" pour ces catégories d'ondes [30].

Un mode de propagation est défini à partir de deux nombres entiers positifs n et m. Pour faire large, on peut diviser ces solutions en deux catégories :

- TE_{mn} (Transversal électrique) où m, n = 0, 1, 2, ... sont des entiers positifs ou nuls.
- TM_{mn} (Transversal magnétique) où m, n = 1, 2, 3, ... sont des entiers strictement positifs.

Puisque les conduits en métal n'acceptent pas le mode TEM (Mode Électromagnétique Transversal). Ils s'occupent des ondes de type TE et TM, mais on va se focaliser sur une seule forme, à savoir la TE 'solution fondamentale transverse électrique'.

A. Modes TE

Dans le mode TE, $E_z = 0$ et $H_z \neq 0$, l'ensemble des éléments du champ 0 (Figure 2.2). Ainsi, ces dernières sont perpendiculaires à la direction de propagation.

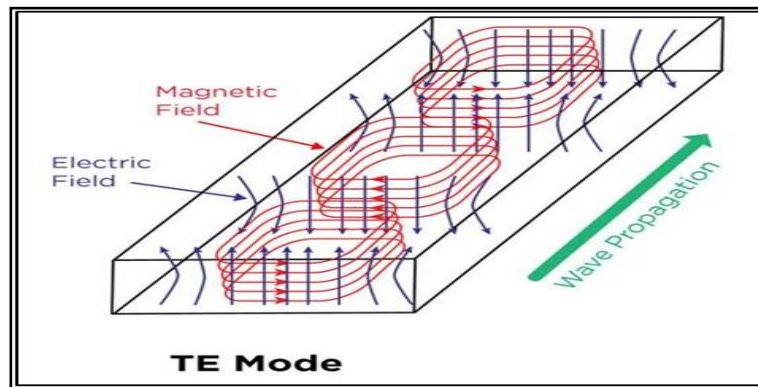


Figure 2.2. Distribution du champ $\vec{E}$ et $\vec{H}$ d'un mode TE dans un guide rectangulaire

En ce qui concerne la propagation des modes TE, l'utilisation des conditions aux limites nous aide à simplifier les équations de Maxwell de la manière suivante :

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (08)$$

$$K_c = \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \quad (09)$$

Où n et m sont des entiers.

Les ondes électromagnétiques de ces modes se manifestent de la manière suivante :

$$E_x(x, y) = H_0 \frac{j\omega\mu}{K_c^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a} y\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (10)$$

$$E_y(x, y) = -H_0 \frac{j\omega\mu}{K_c^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a} y\right) \quad (11)$$

B. Mode TM

Le mode TM se définit par $H_z = 0$ et $E_z \neq 0$. C'est uniquement le champ magnétique qui est perpendiculaire à la direction de propagation.

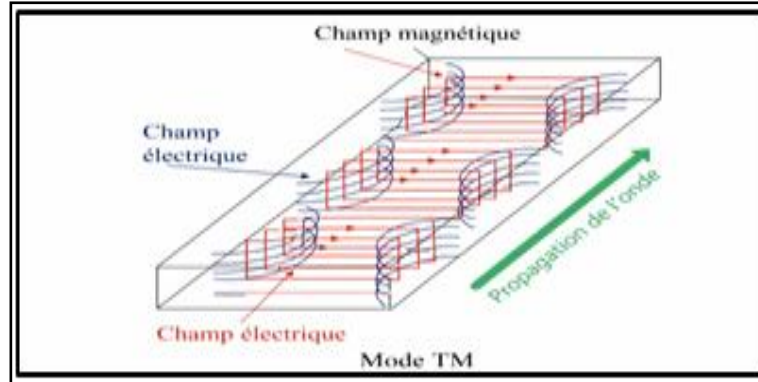


Figure 2.3. Distribution du champ $\vec{E}$ et $\vec{H}$ d'un mode TM dans un guide rectangulaire

C. Mode TEM

Quand les aspects longitudinaux du champ électrique et du champ magnétique sont nulles ($E_z = 0$ et $H_z = 0$), alors que les aspects transverses demeurent présents, on parle de mode de propagation Transverse ÉlectroMagnétique (TEM). Cette modalité se caractérise par sa capacité à se propager sans fréquence de coupure, autrement dit, dès la fréquence zéro, ce qui en fait un mode fondamental quand cela est possible.

Toutefois, le mode TEM ne peut exister que si une différence de potentiel ϕ est présente entre au moins deux conducteurs distincts. Effectivement, ce mode requiert une configuration avec deux conducteurs distincts pour permettre la création de champs

électromagnétiques strictement transverses. Ainsi, le mode TEM ne peut être présent dans un guide d'onde creux standard à conducteur unique.

2.2.4 Guides d'ondes rectangulaires

Le guide rectangulaire, c'est un des premiers modèles de lignes de transmission qu'on utilisait pour faire passer des signaux hyperfréquences. Différents éléments, tels que des coupleurs, des détecteurs ou des atténuateurs, sont disponibles sur le marché pour des fréquences allant de 1 GHz à plus de 220 GHz. Même si les circuits hyperfréquences sont de plus en plus miniaturisés, on continue d'utiliser les guides rectangulaires en raison de leur capacité à transporter des puissances importantes [31].

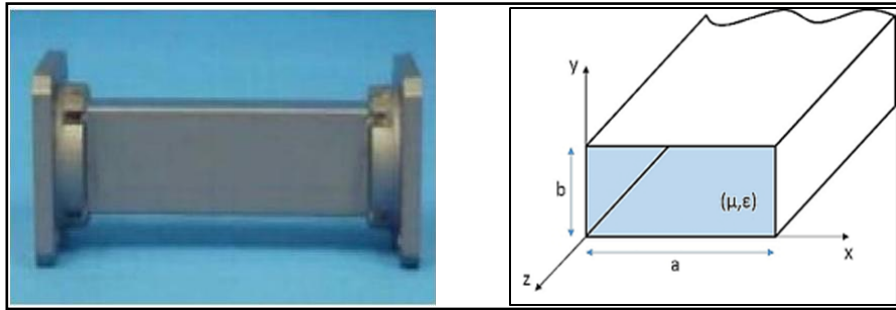


Figure 2.4. Guide d'ondes rectangulaires

Un guide d'onde rectangulaire, c'est comme un genre de tuyau en métal tout carré, tu vois ? C'est un truc pour guider des ondes, trop stylé (Figure 2.4).

Ces guides d'ondes peuvent accueillir les modes TE et TM. En mode, le champ électrique est perpendiculaire à la direction de propagation. En mode, le champ magnétique se trouve perpendiculaire à la direction de propagation.

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (12)$$

- TE_{00} n'existe pas.
- TE_{10} est le mode le plus dominant.

2.2.5 Guides d'ondes circulaires

Le guide d'onde circulaire est un tube en métal vide dont la section est de forme circulaire et possède un rayon a , dans lequel les ondes électromagnétiques se déplacent le long de l'axe z (figure 2.5).

Ce genre de guide est capable de supporter les modes de propagation TE et TM, similaire au guide d'onde rectangulaire, mais l'étude des champs se réalise en coordonnées cylindriques. Il offre des pertes minimales et autorise la transmission de deux signaux à polarisation orthogonale. Toutefois, son emploi demeure restreint à cause des défis liés à la stabilité de la polarisation et d'une bande monomode plus réduite comparée à celle du guide d'onde rectangulaire.

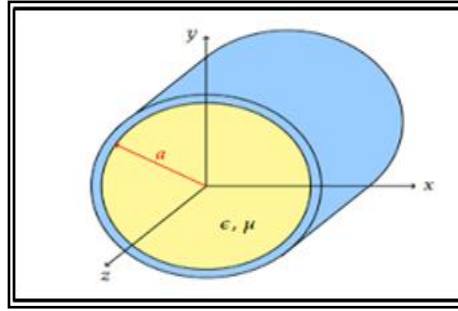


Figure 2.5. Guide d'onde circulaire

A. Pour le mode TE

$$f_{c_{mn}} = \frac{P'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (13)$$

- Le mode TE_{11} est le premier mode TE
- Le mode TE_{10} n'existe pas ,mais TE_{01} existe

B. Pour le mode TM

$$f_{c_{mn}} = \frac{P_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (14)$$

- Le mode TM_{01} est le premier mode TM
- Le mode TE_{10} n'existe pas

2.3 Guide d'ondes intégrée dans un substrat

Les puces intégrées qui emploient la technologie microstrip se révèlent être une solution efficace pour relever les défis de la conception et de la fabrication des circuits hyperfréquences. Ils proposent un équilibre parfait entre performance, dimension, prix et souplesse, ce qui facilite la conception de filtres, d'amplificateurs et d'autres composants hyperfréquences offrant des performances de premier plan [32].

La technologie des guides d'ondes intégrés au substrat (SIW) se distingue par son caractère novateur, car elle autorise l'intégration de guides d'ondes dans un substrat isolant tout en maintenant la compatibilité avec les circuits en plan horizontal. Plusieurs idées de schémas à plat reposent sur les structures SIW. La tech SIW, elle permet d'ajuster le guide d'ondes dans le substrat, un substrat après l'autre, avec des rangées de trous métallisés qui prennent la place des parois latérales métalliques [33]. Ces murs de métal verticaux sont faits de deux rangées de trous métallisés, connectés aux couches métalliques des surfaces supérieure et inférieure du substrat [34].

Ce procédé consiste à orienter un signal électromagnétique vers une zone spécifique en utilisant des surfaces réfléchissantes. De cette manière, l'énergie électromagnétique du signal est transmise avec une atténuation minimale. La configuration d'un guide d'ondes intégré au substrat est illustrée dans la Figure 2.6.

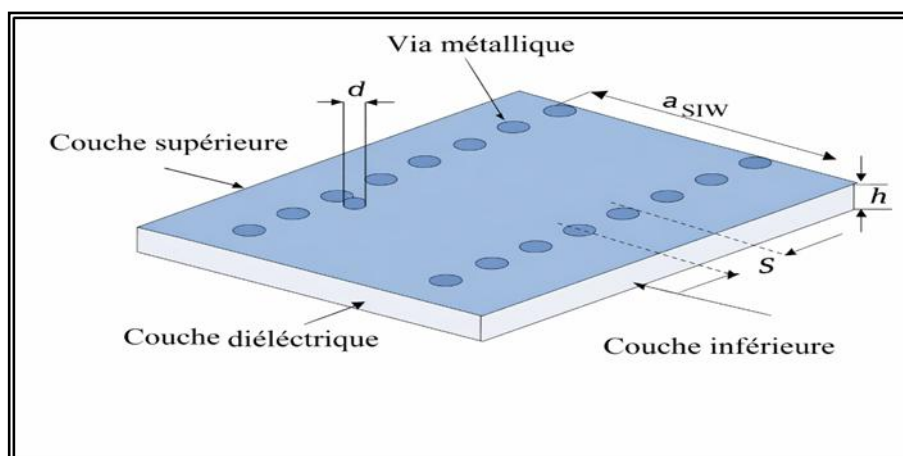


Figure 2.6. Guide d'ondes intégré dans un substrat

L'évolution d'une des premières structures intégrées, appelée guide d'ondes laminé, remonte à 1998 [35]. Par la suite, cette technologie a été utilisée dans différents

composants micro-ondes et ondes millimétriques, incluant des circuits actifs et passifs, ainsi que des antennes. Un brevet américain antérieur a évoqué un guide d'ondes utilisant la technologie LTCC (coextrusion de céramique à basse température), également connue sous le nom de structure diélectrique multicouche [36].

Toutefois, ce labeur n'a été pleinement reconnu que jusqu'à l'aube des années 2000, au moment où le schéma SIW a été incorporé dans le concept du CEI. Évidemment, une mouture précédente des résonateurs encastrés a également été exposée, mais il convient de se demander si nous devrions inclure ces structures dans les circuits intégrés du substrat.

2.3.1 Caractéristiques modales

Les structures SIW (Substrat Integrated Waveguide) possèdent des caractéristiques de propagation qui se rapprochent fortement de celles des guides d'ondes rectangulaires traditionnels. Effectivement, en omettant les pertes dues au rayonnement entre les vias métallisés, les modes de propagation dans une SIW se rattachent principalement aux modes transverses électriques (TE) du guide d'onde rectangulaire équivalent.

L'analyse de ces structures nécessite de résoudre les équations de Maxwell, qui sont utilisées pour identifier les divers modes de propagation possibles en relation avec la configuration du guide et les caractéristiques du substrat. On classe souvent ces modes en catégories TE, TM, TEM (rarement dans les guides creux) ou hybrides [37]. Cependant, en ce qui concerne les SIW, le soutien aux modes TM n'est pas optimal. Leur existence requiert des courants de surface constants sur les parois conductrices, ce qui est entravé par la présence de vias métallisés [38].

Le mode avec la fréquence de coupure la plus basse est appelé le mode principal du guide. Il est habituel de choisir la taille du guide de manière à ce que ce mode soit le seul à pouvoir exister dans la bande de fréquences opérationnelle. Dans les guides d'ondes rectangulaires et circulaires (tubes vides), on nomme les modes principaux TE_{10} et TE_{11} respectivement [38]. Ainsi, le mode fondamental prédominant dans une structure SIW est le mode TE_{10} . Ce dernier se distingue par une répartition particulière des champs électromagnétiques et des courants sur les plans métalliques supérieur et inférieur. Cette ressemblance avec le guide rectangulaire justifie l'efficacité du confinement du champ électromagnétique dans les SIW.

2.3.2 Dimension du guide d'onde SIW

La tech SIW est basée sur la création de guides d'ondes dans un substrat diélectrique. La configuration du guide d'ondes exploite les métallisations situées en haut et en bas du substrat comme des parois (plaques métalliques). Le substrat, tel qu'on peut le voir dans la Figure 2.6, comporte des lignes de vias métalliques reliées aux deux plaques afin d'assurer les parois latérales. La configuration actuelle affiche une silhouette lisse et assure une excellente efficacité en tant que conducteur d'ondes métalliques [39].

La conception d'un guide d'onde intégré au substrat (SIW) implique l'identification de plusieurs paramètres géométriques importants, comme le diamètre des vias métallisés d , leur distance p , la hauteur du substrat h , et les dimensions du guide déterminées par l'espace entre les rangées de vias et la largeur effective équivalente [36] tel que montré dans la figure 2.7. Ces réglages ont une influence directe sur les performances du manuel, surtout en ce qui concerne les pertes.

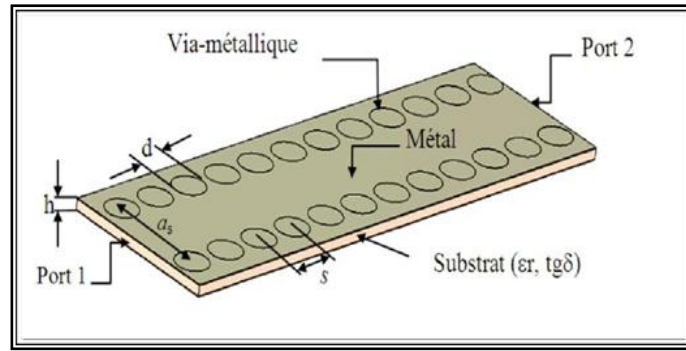


Figure 2.7. Paramètres d'un guide d'ondes SIW

Vu la similitude entre le guide d'onde rectangulaire et le SIW, on a établi des correspondances entre les dimensions géométriques du SIW et la largeur effective W_{eff} du guide d'onde rectangulaire qui ont des propriétés de propagation semblables.

Ces relations aident à déterminer les dimensions des paramètres ainsi qu'à élaborer la conception des composants SIW [34].

$$L_{eff} = L - \frac{d^2}{0.95p} \quad (15)$$

$$w_{eff} = w - \frac{d^2}{0.95p} \quad (16)$$

- d : est le diamètre des trous

- p : la distance entre deux trous consécutifs.
- w : est la distance transversale du SIW
- L : est la distance longitudinale du SIW

La formule numéro seize donne une bonne estimation entre un SIW et le guide d'ondes rectangulaire équivalent. Cependant, cette évaluation ne tient pas compte de l'impact de, ce qui peut causer de petites imprécisions lorsque d augmente. Pour obtenir une approximation plus précise, une équation améliorée pour calculer la largeur effective du SIW a été proposée dans.

$$w_{eff} = w - \frac{1.08d^2}{p} + \frac{0.1d^2}{w} \quad (17)$$

Il est crucial de bien choisir les dimensions du guide SIW afin d'assurer la performance du système. En remplaçant les cylindres par deux murs conducteurs parfaits, il faut rapprocher au maximum les cylindres pour obtenir une configuration de guide rectangulaire rempli de matériau diélectrique (DFW). La formule ci-après sert à calculer la fréquence de coupure du mode arbitraire dans un guide d'ondes rectangulaire :

Pour le mode TE_{10}

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (18)$$

La dimension a_d est donnée par :

$$a_d = \frac{a}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (19)$$

La distance a_s entre les deux rangées de via est donnée par la formule suivante :

$$a_s = a_d + \frac{d^2}{0.95p} \quad (20)$$

De nombreuses recherches ont été menées pour déterminer l'écartement et les dimensions des vias. L'adoption adéquate des paramètres d et p aide à minimiser les pertes de rayonnement, autrement dit, l'évasion du champ électromagnétique hors du guide.

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (21)$$

Et

$$p \leq 2d \quad (22)$$

Ou : λ_g est la longueur d'onde du guide

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi f^2 \varepsilon_r}{c^2} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (23)$$

2.3.3 Avantages du guide d'onde

Les guides d'ondes traditionnels posent un défi en termes d'intégration des éléments passifs (filtres, coupleurs, diviseurs), ce qui exige des transitions compliquées qui amplifient les pertes et la complexité. Cependant, la technologie SIW facilite l'incorporation directe de ces éléments dans le substrat, minimisant les pertes, optimisant les performances et simplifiant la conception des circuits micro-ondes.

La technologie SIW propose un ensemble d'avantages qui la rend attrayante pour une variété d'applications en haute fréquence et micro-ondes.

- Coût de production réduit : On peut fabriquer les structures SIW en utilisant des technologies de fabrication courantes à petit prix, ce qui en fait une option économique pour les applications liées à la communication sans fil et au radar.
- Petite taille : Les circuits SIW sont incrustés dans un substrat, ce qui favorise une intégration serrée des composants et réduit considérablement l'espace occupé par le circuit dans son ensemble.
- Excellente isolation : Les dispositifs SIW assurent une isolation efficace entre les éléments voisins en confinant les ondes électromagnétiques à l'intérieur du guide d'onde, réduisant ainsi les interférences et les pertes liées au couplage des composants du circuit.
- Pertes minimales : Les SIW, en général, ont des pertes de propagation faibles, ce qui permet une transmission efficace des signaux sur de grandes distances sans altération notable du signal.

- Large bande passante : Les guides d'ondes SIW peuvent être conçus pour gérer de larges bandes passantes, ce qui les rend adaptés aux applications à large bande comme les systèmes de communication haut débit.
- Simplicité de conception et simulation : Y'a plein d'outils pour modéliser et simuler des trucs SIW, c'est super pratique pour concevoir et améliorer des circuits SIW et répondre aux besoins spécifiques de l'appli.

2.3.4 Inconvénients du guide d'onde

Les guides d'ondes, ils peuvent avoir des problèmes avec le diélectrique à cause des ondes qui restent coincées, et les dimensions du guide d'ondes, elles limitent les basses fréquences des micro-ondes. La largeur du guide (section transversale) devrait être environ la moitié de la longueur d'onde de l'onde transportée. En outre, une hausse de la fréquence entraîne une réduction de la longueur d'onde, ce qui nécessite également des dimensions plus réduites pour le guide. À un moment donné, la conception des guides d'ondes se retrouve face à un défi technologique.

La paroi en métal à l'intérieur du guide est souvent recouverte d'argent ou d'or pour réduire les pertes causées par l'effet de peau. Toutefois, cette obligation fait grimper les prix et limite leur emploi [40].

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a balancé quelques principes sur les guides d'ondes. Ensuite, on a présenté les critères et la création d'une nouvelle technologie appelée SIW. Cette technologie a un énorme potentiel grâce à son coût de production réduit et à sa facilité d'intégration avec d'autres circuits intégrés. La décision d'opter pour cette technologie repose sur son coût de production réduit et sa compatibilité aisée avec d'autres circuits intégrés.

Dans le prochain chapitre, nous allons employer cette technologie pour élaborer notre capteur de mesure de salinité.

Chapitre 3

Simulation et résultats expérimentales

3.1 Introduction

Ce chapitre se consacre à la conception et à l'étude d'un capteur de salinité utilisant la technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide). Nous débutons par une analyse approfondie du logiciel de simulation HFSS, ainsi que des paramètres de conception de la structure SIW. Par la suite, nous exposons les diverses configurations suggérées pour le capteur ainsi que les phases de modélisation. L'évaluation de la salinité est basée sur l'examen du coefficient de réflexion (S_{11}) et du changement dans la fréquence de résonance en relation avec le niveau de concentration en sel. Pour finir, nous exposons les résultats obtenus, suivis d'une analyse du comportement du capteur et de ses performances.

3.2 Présentation du logiciel HFSS

Le HFSS (High Frequency Structure Simulator) représente un outil informatique qui permet d'analyser le fonctionnement électromagnétique d'une structure. Pour scruter à fond ce comportement, le logiciel offre des outils d'analyse post-traitement. Il s'attelle à une modélisation électromagnétique, en résolvant les équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. La technique utilisée consiste à diviser l'espace d'analyse en de nombreux petits domaines (tétraèdres), puis à évaluer localement le champ électromagnétique dans chaque élément. La Figure 3.1 dévoile les diverses étapes pour scruter le comportement électromagnétique d'une structure quelconque.

Ce travail utilise la version 15.0 du logiciel HFSS d'Ansoft pour réaliser différentes simulations. Ce logiciel permet de modéliser et de simuler le comportement des champs électromagnétiques dans des structures complexes comme les guides d'ondes, les antennes, les capteurs et les circuits micro-ondes.

HFSS se caractérise par une interface conviviale, une gestion efficace des géométries 3D complexes et des outils avancés d'optimisation et d'analyse. Il permet aussi de visualiser les champs électriques et magnétiques, rendant ainsi plus facile la compréhension du fonctionnement des dispositifs étudiés.

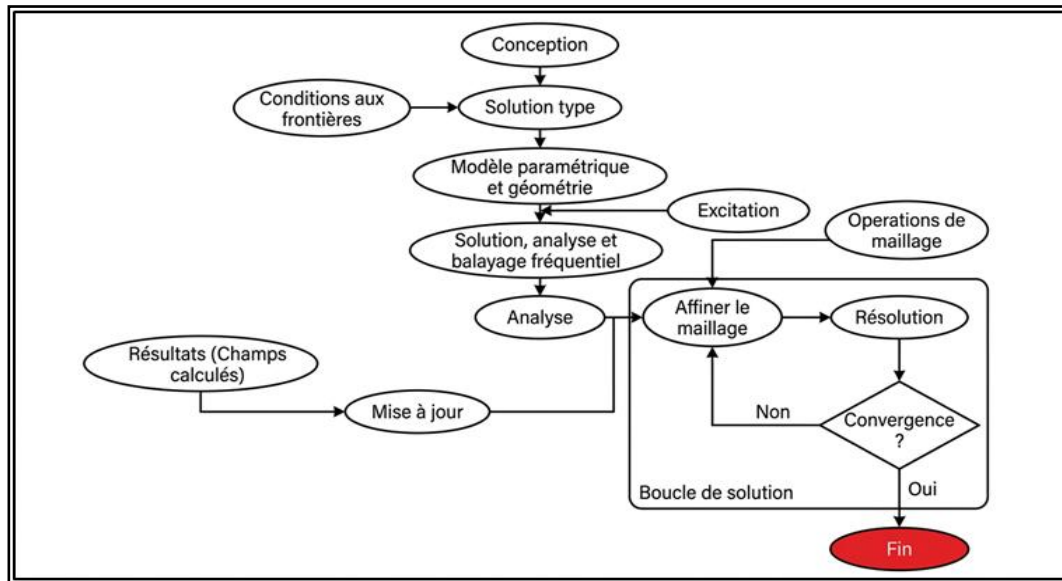


Figure 3.1. Fonctionnement du logiciel HFSS.

L'interface d'Ansys HFSS est conçue pour centraliser la modélisation 3D, la configuration électromagnétique et l'analyse des résultats.

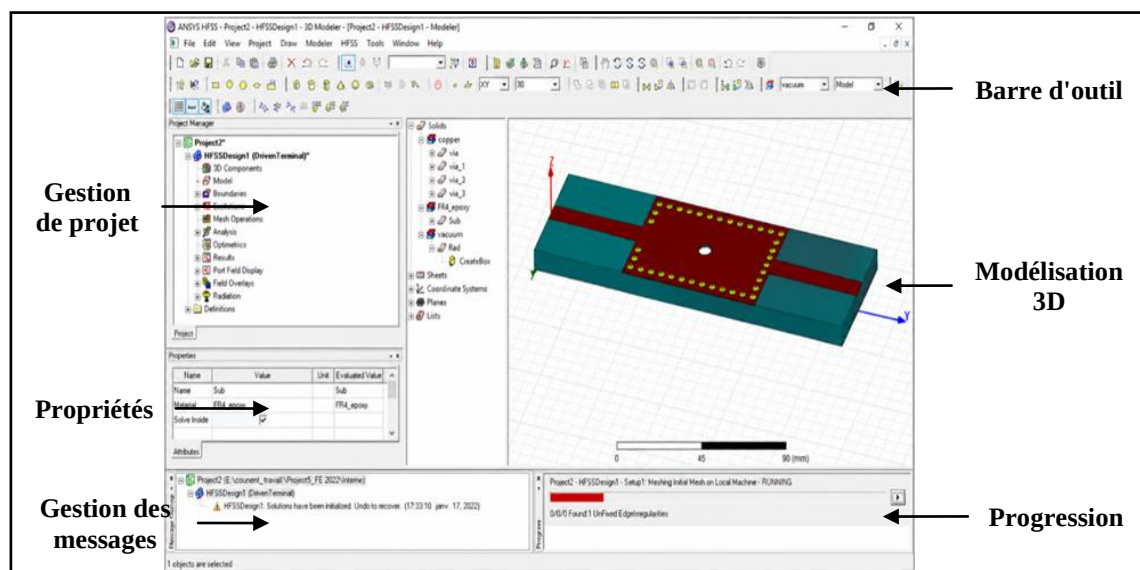


Figure 3.2. Fenêtre principale du logiciel HFSS.

La fenêtre principale de HFSS contient plusieurs panneaux optionnels (Figure 3.2):

- **Gestion de Project:** comprend un arbre de conception qui détaille la structure du projet.
- **Gestion de Messages :** offre la possibilité de visualiser toutes les erreurs avant le lancement de la simulation.

- **La fenêtre de Propriétés** : pour les visualisations et la modification des réglages concernant les attributs du modèle.
- **La fenêtre de progression** : montre les avancements de la solution.
- **La fenêtre de Modélisation 3D** : inclut le modèle ainsi que son arbre pour la conception en cours.

3.3 Conception d'une structure sous HFSS

Pour concevoir une structure sous HFSS il faut suivre certaines étapes nécessaires.

3.3.1 Création d'un nouveau projet

Au démarrage de HFSS, un projet vide nommé Projet1 est généralement créé automatiquement.

Le projet apparaît alors dans l'arborescence de gestion des projets. Il s'agit du conteneur principal qui accueillera les simulations, les matériaux et les résultats du projet.

3.3.2 Sauvegarder le projet

Dans le menu fichier, cliquer Save As, utiliser le navigateur de dossier pour trouver le dossier où l'on veut sauver le projet, par exemple `..\Desktop\Project1.hfssresults`, double-cliquer sur le nom du dossier, puis cliquer Save.

3.3.3 Insertion d'une conception sous HFSS

Sur le menu de projet, cliquez sur Insert HFSS Design. La nouvelle conception figure sur l'arbre de projet. Par défaut, elle porte le nom HFSS Design, où est l'ordre dans lequel la conception a été ajoutée. C'est à ce moment que l'espace de travail 3D (Modeler Window) s'active, vous permettant de commencer à dessiner.

3.3.4 Manipulation d'un projet

Manipuler un projet revient à effectuer diverses opérations : créer des objets géométriques, modifier les dimensions, affecter des matériaux, gérer les simulations et

exploiter les résultats. HFSS propose de nombreux outils pour faciliter la conception et l'analyse des structures micro-ondes.

A. Unités de mesure du Modèle

L'unité de mesure par défaut est le (mm), pour la changer à une autre unité il suffit de cliquer sur le menu "Modeler\Units". Une fenêtre de dialogue « Set Model Units » apparaît (Figure 3.3) qui nous permet de choisir l'unité convenable à partir d'une liste déroulante.

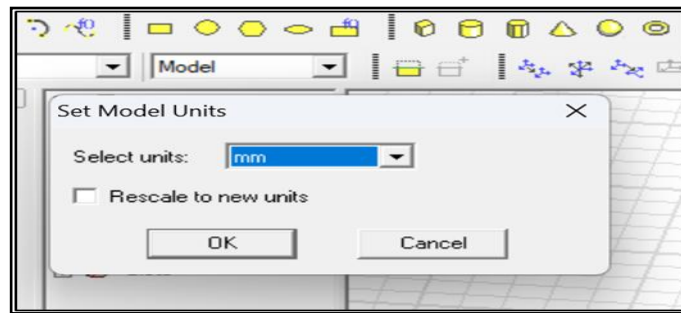


Figure 3.3. Choix d'unité du Modèle.

B. Choix du substrat

Pour dessiner le substrat, partir de la barre d'outils pour insérer un box (Draw Box) et fixer ses dimensions et sa position. Dans le logiciel HFSS, plusieurs substrats sont disponibles par défaut ; le choix du substrat s'effectue en cliquant sur le menu « **Modeler\AssignMaterial** » et en sélectionnant le matériau proposé (Figure 3.4).

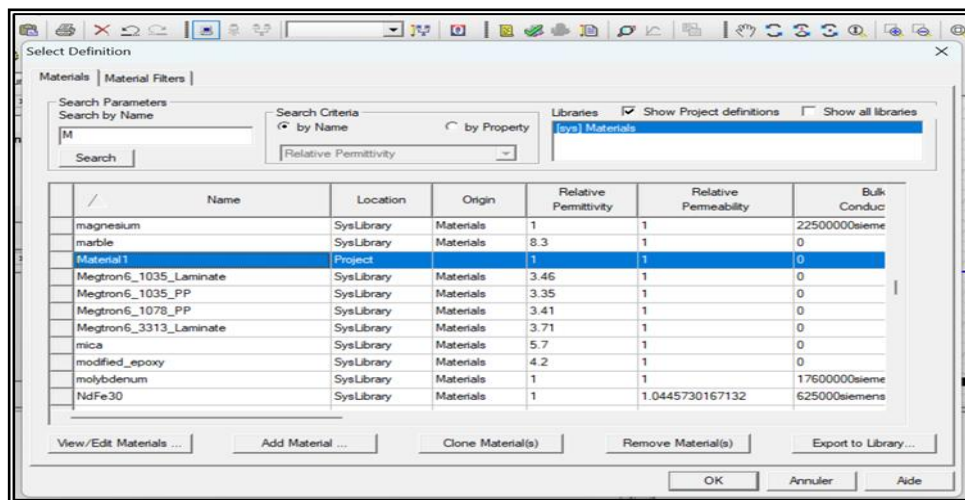


Figure 3.4. Choix du substrat

C. Configuration de la solution

Les résultats de simulation dépendent de la fréquence de travail et de la plage de fréquences choisie. La Figure 3.5 montre l'étape d'installation des paramètres nécessaires à la fréquence. En précisant la fréquence de travail et son intervalle de variation.

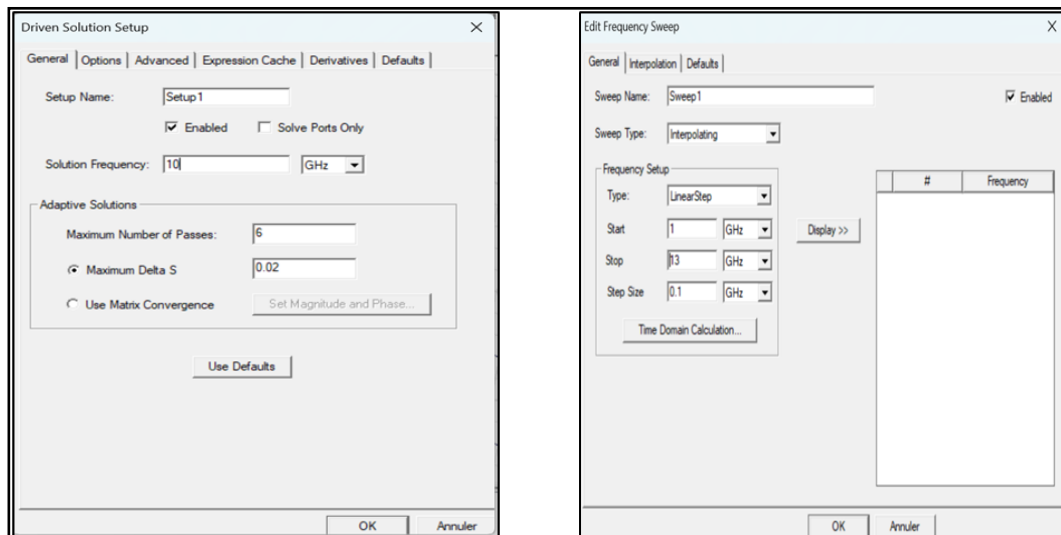


Figure 3.5. Choix de fréquence et de la solution

D. Types de solution dans HFSS

La première étape pour faire une simulation est de choisir le mode de solution que l'on veut réaliser. Le type de solution choisi détermine les types d'accès et les résultats obtenus.

Dans le menu de HFSS, cliquez alors sur Solution Type et la fenêtre de dialogue de type de solution s'affiche Figure 3.6.

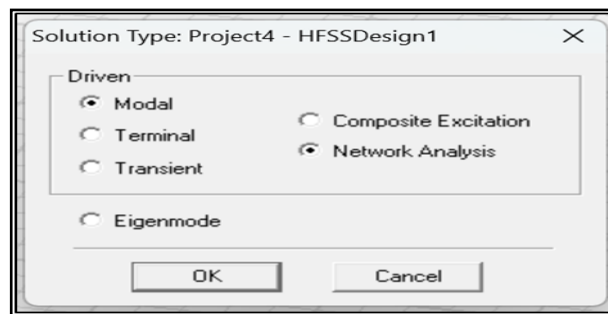


Figure 3.6. Sélection de type de solution.

la deuxième étape consiste à choisir le type du modèle dans les types de solution. HFSS propose trois types de solutions, chacune étant optimisée pour résoudre un problème particulier :

- **Driven Modal**

Ce type de solution sert à analyser les structures micro-ondes et les guides d'ondes. Il permet de déterminer les paramètres S (S_{11} , S_{21}), les modes de propagation et les fréquences de résonance.

- **Driven Terminal**

Cette solution est surtout employée pour les circuits à plusieurs conducteurs et les lignes de transmission. Elle permet d'étudier les tensions, les courants et les paramètres électriques des ports.

- **Eigenmode**

Le mode « Eigenmode » permet de calculer les fréquences de résonance propres ainsi que les distributions des champs électromagnétiques en l'absence d'excitation externe. On l'utilise souvent pour les cavités résonantes et

E. Excitation d'une structure

Dans HFSS, l'excitation d'une structure se fait en appliquant un signal électromagnétique à l'aide de ports (Wave Port ou Lumped Port), afin d'étudier la propagation des ondes et les paramètres S de la structure.

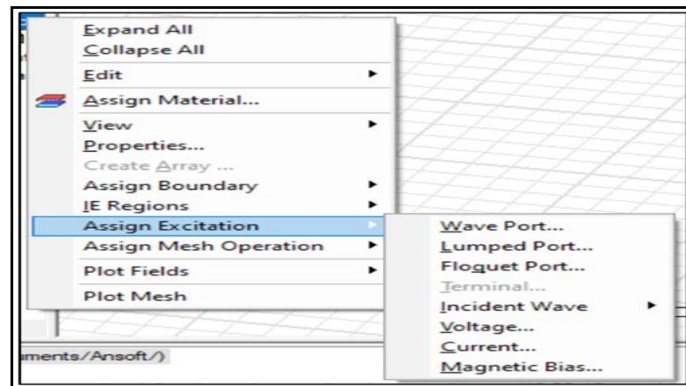


Figure 3.7. Assignment d'une excitation.

3.4 Conception et simulation de capteurs de salinité

Dans cette section, nous introduirons notre capteur de salinité basé sur la technologie SIW. Le capteur élaboré repose sur deux types de cavités : l'une rectangulaire et l'autre circulaire.

3.4.1 Guide d'ondes (10 GHz)

La figure 3.8 présente l'architecture tridimensionnelle d'un capteur de salinité conçu à l'aide de la technologie des guides d'ondes intégrés sur substrat (SIW). Le dispositif est fabriqué sur un substrat isolant FR4 recouvert d'une couche de cuivre conductrice (sur ses deux faces).

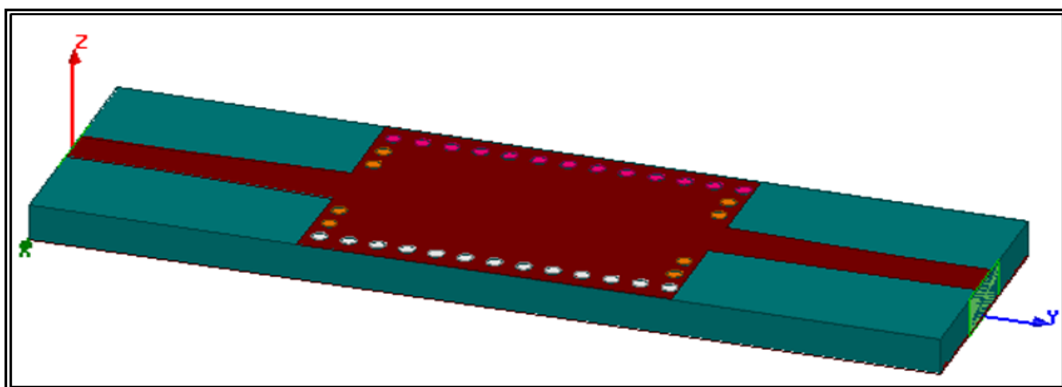


Figure 3.8. Cavité résonnante SIW.

Une ligne d'alimentation micro ruban, connectée à une cavité résonante située au centre de la structure, assure la propagation des ondes électromagnétiques. Des rangées de trous métalliques, disposées autour de la cavité, font office de parois conductrices, similaires à

celles d'un guide d'ondes métallique conventionnel. Ces trous confinent l'énergie électromagnétique à l'intérieur de la cavité et minimisent les pertes par rayonnement.

Les différents paramètres dimensionnels sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3.3: Paramètres dimensionnels du capteur simulé

Paramètres	Description	Valeur
f_c	Fréquence de travail	10GHz
ϵ_r	Permittivité relative	4.4
w_{siw}	Distance entre les 2 rangées de vias	14.8 mm
D_v	Diamètre du via	1mm
T	Epaisseur du cuivre	0.035 mm
L_M	Longueur du feed (microruban)	6.2 mm
L_T	Longueur du tapie de transition	11.7 mm
L_3	Emplacement du slot	25 mm
H	Epaisseur du substrat	3.2 mm
w_m	Largeur du feed (microruban)	3.06 mm
w_t	Largeur du tapie de transition	3.8 mm
S	Distance entre adjacentes vias	1.95 mm
L_g	Largeur du slot	8 mm

La figure 3.9 présente l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} (exprimé en dB) en fonction de la fréquence dans la bande [9-11 GHz]. On observe une réduction importante de la résonance autour de 10 GHz, avec une valeur de S_{11} de -10 dB. Le détecteur possède une résonance bien marquée à 10,6100 GHz, traduisant une réflexion d'énergie. Cette courbe confirme les bonnes performances du capteur SIW à 10 GHz ainsi que son efficacité de transfert d'énergie.

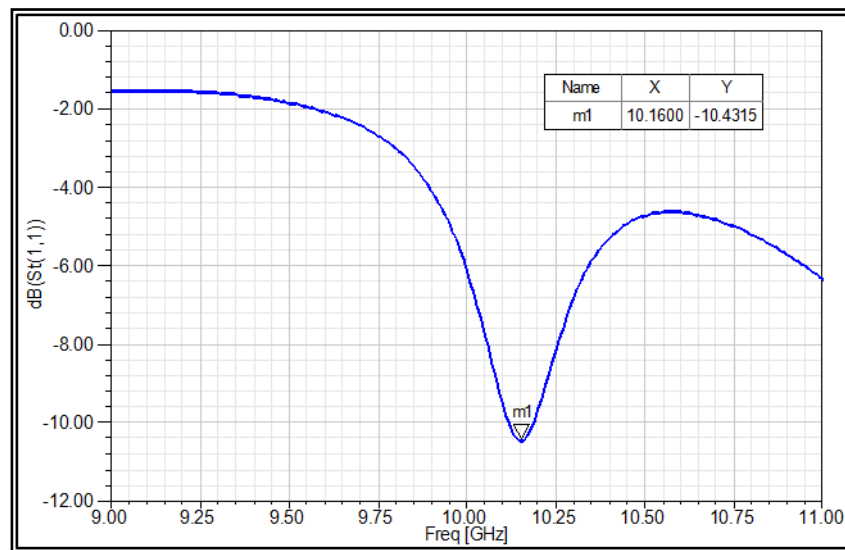


Figure 3.9. Paramètre S_{11} du capteur rectangulaire Fonctionnement du logiciel HFSS.

La figure 3.10 représente la répartition du champ électrique (E Field) dans la cavité SIW à la fréquence de résonance. On observe au centre géométrique de la cavité une forte concentration de l'énergie électromagnétique matérialisée par la zone rouge intense qui correspond parfaitement au profil du mode de propagation stationnaire fondamental.

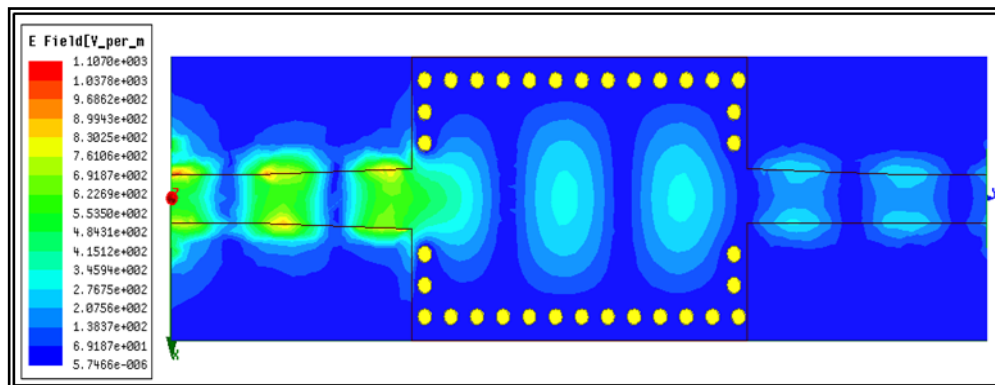


Figure 3.10. Distribution du champ électrique du capteur rectangulaire

Par ailleurs, la transition abrupte du champ qui s'annule (zone bleue) au-delà des rangées de trous métallisés vient conforter le rôle crucial des vias. Ces derniers jouent le rôle de parois électriques parfaites (PEC) garantissant un confinement optimal du champ au sein du guide intégré. Cette zone de forte concentration au centre sera le point idéal pour y placer plus tard la fente de détection et ainsi optimiser la sensibilité du capteur

3.4.2 Cavité rectangulaire (10GHz)

Pour faciliter l'analyse des données du capteur et nous concentrer sur l'étude de la fréquence de résonance, on omet le second port, comme indiqué sur la figure 3.11, et on alimente le dispositif avec un seul port d'entrée. Avec cette configuration, on peut mesurer directement le coefficient de réflexion (S_{11}), qui correspond à la quantité d'énergie qui est réfléchie vers la source.

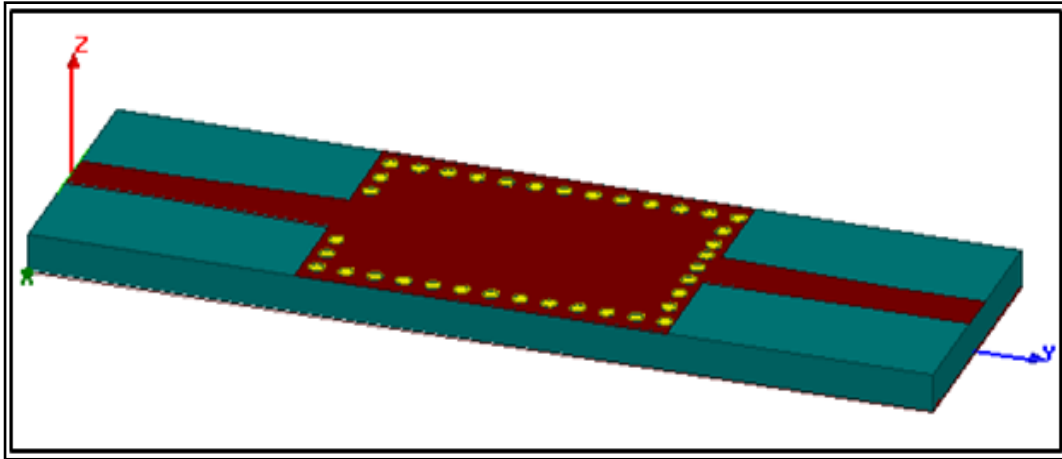
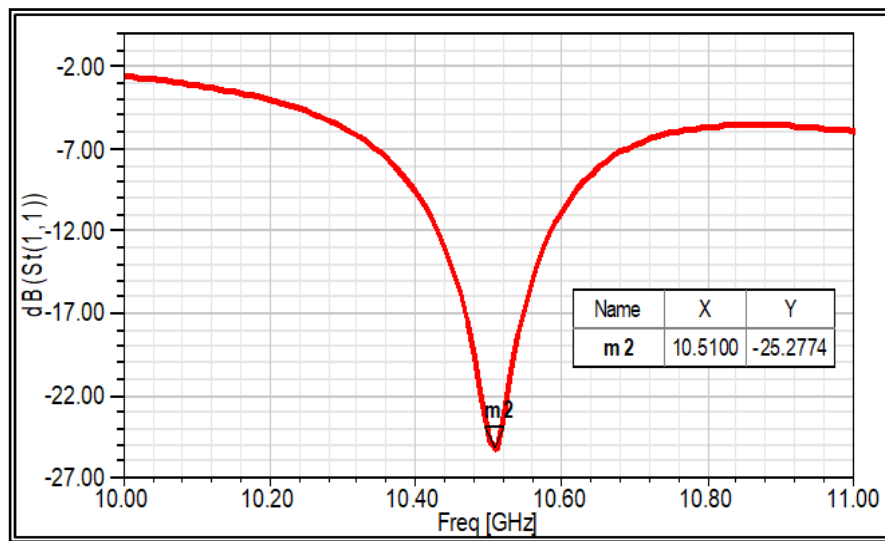


Figure 3.11. Cavité rectangulaire à port unique.

Au point de résonance, le coefficient S_{11} présente une valeur minimale ce qui signifie qu'une partie importante de l'énergie électromagnétique est transférée dans la cavité résonante. En suivant comment cette fréquence change en fonction de la salinité, on peut identifier les caractéristiques de différentes concentrations présentes dans la solution étudiée.

Figure 3.12. Paramètre S_{11} de la cavité rectangulaire.

Comme l'illustre la figure 3.12, le capteur présente une résonance nettement définie à 10,5100 GHz, ayant un niveau de réflexion S_{11} de -25,2774 dB. Ce résultat atteste du bon état structural du capteur et d'une transmission de puissance efficace.

Ce creux marqué représente l'absorption d'énergie maximale par la cavité à la fréquence de résonance du mode TE_{10} . La profondeur significative du pic (-25 dB) indique une excellente adaptation et un couplage efficace entre la ligne d'accès et la cavité. Cette conclusion confirme la décision d'utiliser une configuration à un seul port pour mesurer la fréquence de résonance du capteur.

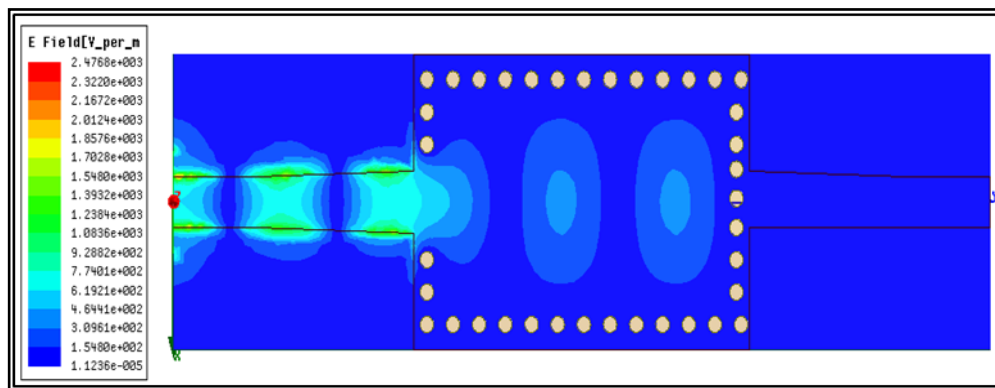


Figure 3.13. Distribution du champ électrique d'un Cavité rectangulaire à port unique.

La figure 3.13 suivante représente la répartition du champ électrique dans la cavité SIW rectangulaire lorsqu'elle est en état de résonance. On peut clairement observer la configuration habituelle du mode TE_{10} . Le domaine a culminé à $2,476 \times 10^3$ V/m, confirmant donc une importante concentration d'énergie au sein de la cavité. Ce capteur de salinité utilise directement cette distribution.

3.4.3 Capteur de salinité rectangulaire avec slot (10GHz)

Partant d'une cavité rectangulaire, nous avons développé un capteur de salinité en intégrant une fente à l'intérieur du dispositif. Cela offre la possibilité de modifier la fréquence de résonance de la cavité fondamentale, en fonction de la permittivité relative du composant au slot. La figure 3.14 présente un détecteur de permittivité de forme rectangulaire doté d'un emplacement.

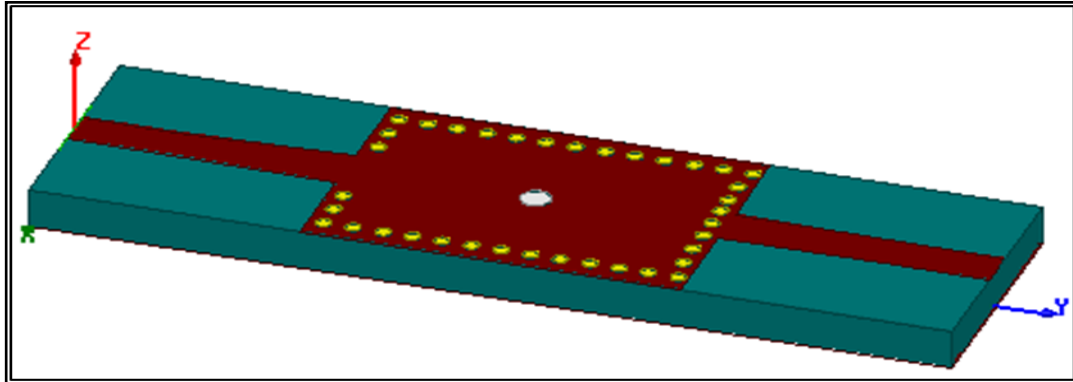


Figure 3.14. Capteur rectangulaire avec Slot sous HFSS.

Comme on peut le voir sur la figure 3.15, le capteur possède une résonance bien marquée à 10,6100 GHz avec un niveau de réflexion S_{11} de -20,7045 dB. Ce résultat confirme le bon fonctionnement structurel du capteur et une transmission optimale de la puissance.

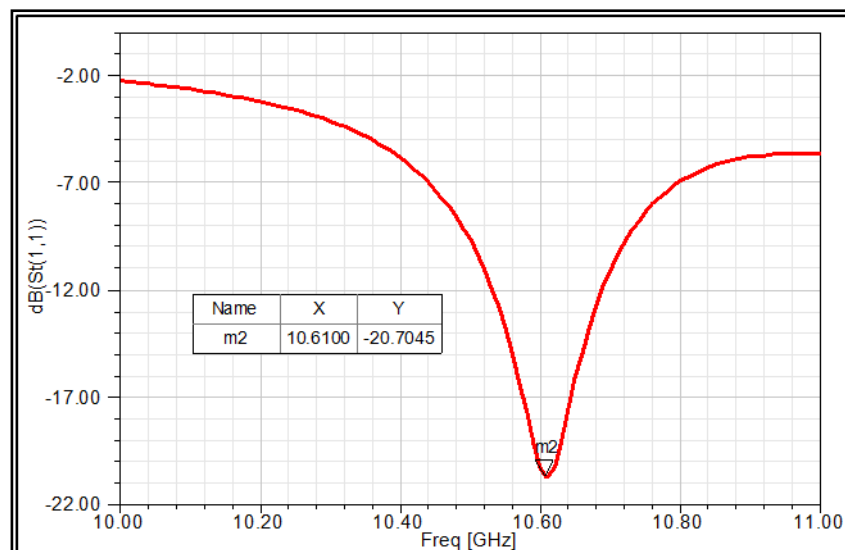


Figure 3.15. Paramètre S_{11} du capteur rectangulaire Avec Slot.

La figure 3.16 montre que la cartographie du champ électrique à 10,6100 GHz présente un très bon confinement de l'énergie dans le cœur du capteur. Cela montre que la structure

SIW est capable de guider l'onde électromagnétique de façon directionnelle et sans pertes latérales, ce qui est essentiel pour obtenir une sensibilité maximale du dispositif.

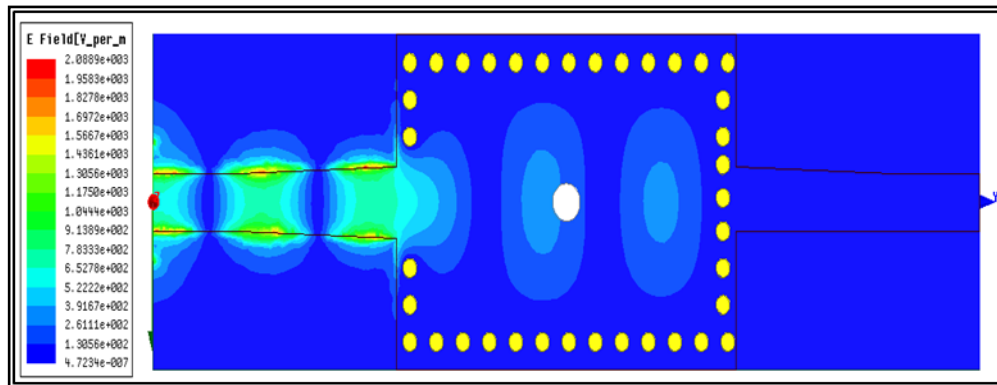


Figure 3.16. Distribution du champ électrique du capteur rectangulaire avec Slot.

3.4.4 Capteur de salinité circulaire (10GHz)

L'idée fondamentale est d'introduire un élément perturbateur au centre de la cavité circulaire résonnante. Cet élément perturbateur est essentiel pour contrôler et ajuster la fréquence de résonance du capteur initial. La figure 3.17 montre la configuration géométrique tridimensionnelle de ce dispositif modélisé dans le logiciel HFSS.

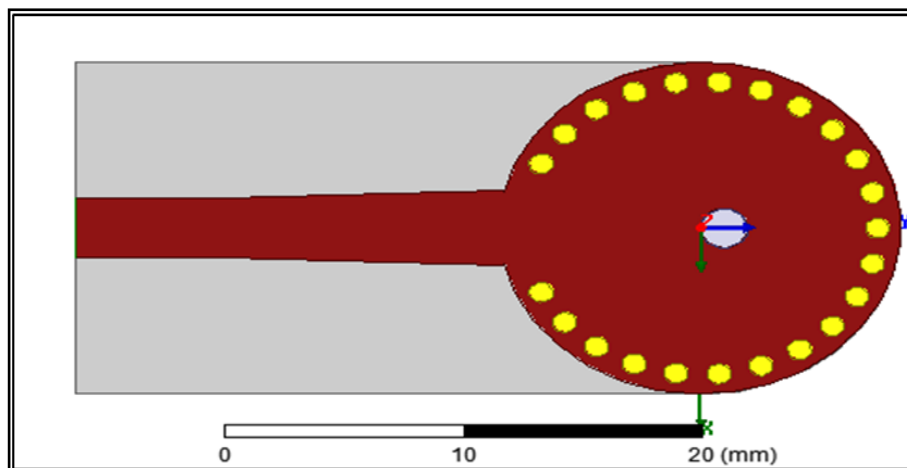


Figure 3.17. Capteur circulaire de salinité en technologie SIW.

Ce capteur résonateur basé sur la technologie SIW est dédié à la caractérisation de la salinité des milieux liquides. L'introduction du fluide salin à travers la fente centrale perturbe le champ électromagnétique confiné dans la cavité, et modifie ainsi sa permittivité complexe effective. La relation directe entre le décalage de la fréquence de résonance (Frequency shift), l'atténuation du pic de réflexion S_{11} , et la salinité de la solution rend

possible l'étalonnage du capteur et l'identification de la salinité d'un échantillon inconnu, sur une gamme allant de l'eau douce à l'eau de mer hautement salée.

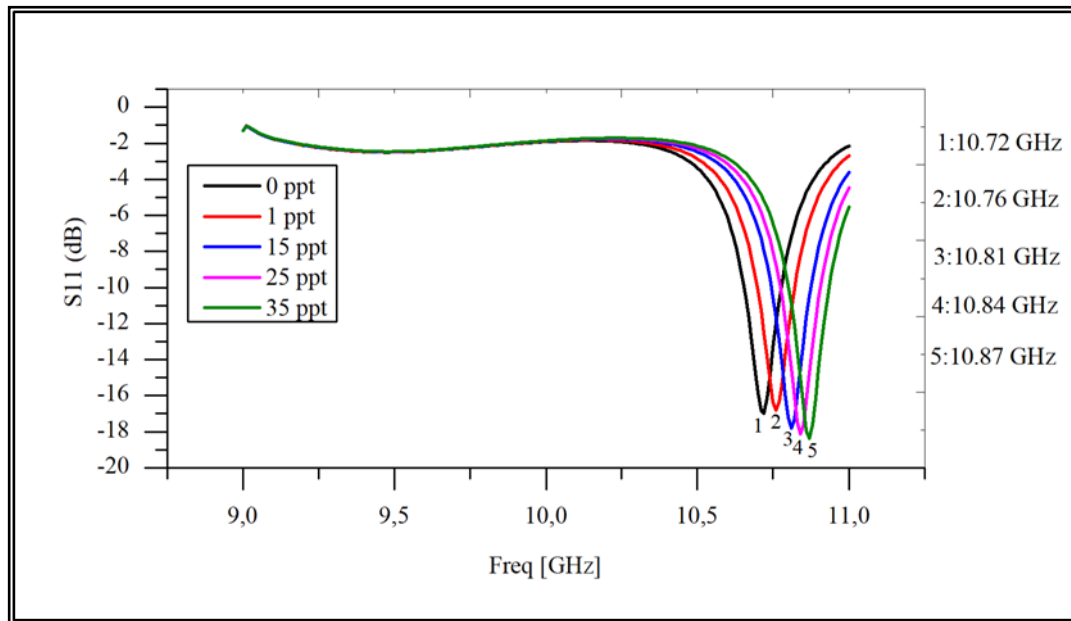


Figure 3.18. S_{11} en fonction du taux de salinité.

La figure 3.18 présente l'évolution coefficient de réflexion S_{11} du capteur SIW men fonction de différentes concentrations de salinité (0, 1, 15, 25 et 35 ppt). On remarque que l'accroissement de la salinité entraîne une mutation graduelle de la fréquence de résonance vers les fréquences supérieures, faisant passer la fréquence de 10,72 GHz à 10,87 GHz.

Cette différence est causée par les variations des propriétés électromagnétiques de l'échantillon, en particulier sa permittivité. Les baisses du coefficient S_{11} restent notables, affichant des valeurs sous -15 dB, ce qui témoigne d'une forte résonance et d'une réactivité adéquate du capteur face aux fluctuations de salinité.

Ces observations attestent de la compétence du capteur suggéré à identifier et à différencier diverses gradations de salinité avec une précision élevée.

3.5 Relation entre la fréquence de résonance et la salinité

La méthode d'interpolation de Newton a été employée pour définir une relation mathématique entre la fréquence de résonance et la salinité. Cette approche facilite l'élaboration d'un polynôme qui traverse exactement les points expérimentaux recueillis durant la simulation.

Le polynôme obtenu permet de calculer directement la salinité à partir de la fréquence mesurée par le capteur. Ainsi, toute nouvelle fréquence de résonance peut être convertie en valeur de salinité sans effectuer de nouvelles simulations.

x_i	10.72	10.76	10.81	10.84	10.87
y_i	0	1	15	25	35

Avec:

- x_i : représente la fréquence de résonance en [GHz].
- y_i : représente la salinité en [ppt].

Tableau 4: Différences divisées de Newton pour l'estimation de la salinité

x_i	$y_i = f(x_i)$	$f[x_i, x_{i+1}]$	$f[x_i, \dots, x_{i+2}]$	$f[x_i, \dots, x_{i+3}]$	$f[x_i, \dots, x_{i+4}]$
10.72	0	25	2833.333	-18055.556	79966.33
10.76	1	280	666.667	-6060.606	
10.81	15	333.333	0		
10.84	25	333.333			
10.87	35				

Les différences divisées sont données par :

$$f[x_i, x_{i+1}] = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (24)$$

$$f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] = \frac{f[x_{i+1}, x_{i+2}] - f[x_i, x_{i+1}]}{x_{i+2} - x_i} \quad (25)$$

$$f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}] = \frac{f[x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}] - f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}]}{x_{i+3} - x_i} \quad (26)$$

$$f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}, x_{i+4}] = \frac{f[x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}, x_{i+4}] - f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}]}{x_{i+4} - x_i} \quad (27)$$

Le polynôme de Newton final obtenu est de forme:

$$S(f) = (7.9966 f^4 - 1.8056 f^3 + 0.2833 f^2 - 0.0025 f) \times 10^4 \quad (28)$$

Cette équation constitue le modèle mathématique du capteur et permet d'estimer directement la salinité à partir de la fréquence de résonance obtenue par mesure ou simulation. La figure 3.19 montre l'évolution de la salinité en fonction de la variation de fréquence de résonance.

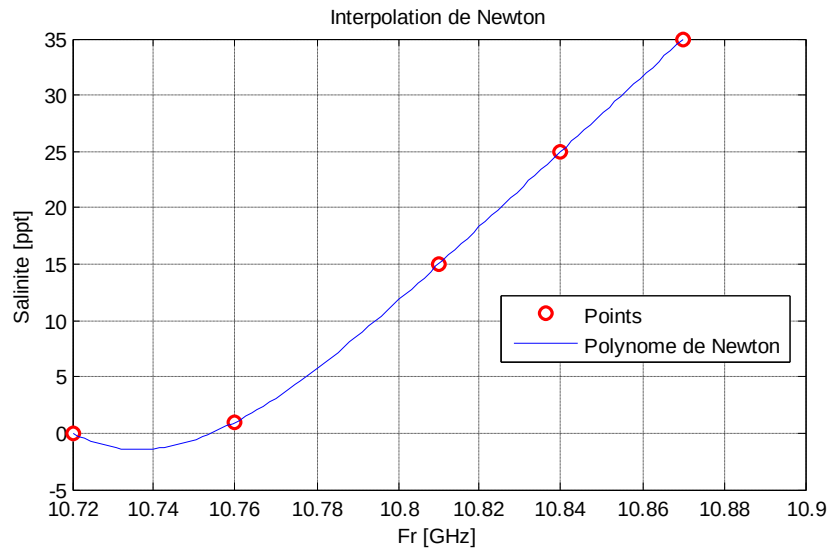


Figure 3.19. Salinité en fonction de la fréquence de résonance.

3.6 Validation expérimentale

Nous avons conçu un capteur de permittivité. Ce capteur a été spécialement développé en utilisant un substrat en FR4_Epoxy, un matériau reconnu pour ses propriétés électriques et mécaniques. La figure 3.20 présente la procédure de caractérisation du capteur conçu, permettant ainsi de mieux comprendre les différentes étapes et méthodes utilisées pour évaluer ses performances et ses capacités. Le capteur a été utilisé pour mesurer deux différentes concentrations de salinité, à savoir (25ppt) et (35ppt).



Figure 3.20. caractérisation du capteur de salinité

Le substrat en question se caractérise par une permittivité relative ϵ_r de 4.4, ce qui signifie qu'il a la capacité de stocker 4.4 fois plus d'énergie électrique que le vide. De plus, il possède une épaisseur h de 3.2 mm, ce qui indique la distance à laquelle les composants électroniques seront séparés les uns des autres sur ce substrat. Ces caractéristiques, par leur importance cruciale, ont joué un rôle déterminant dans le processus de développement du capteur, en contribuant de manière significative à son efficacité et à sa performance. La figure 3.21 montre le coefficient de réflexion obtenue en fonction de la salinité de l'eau.

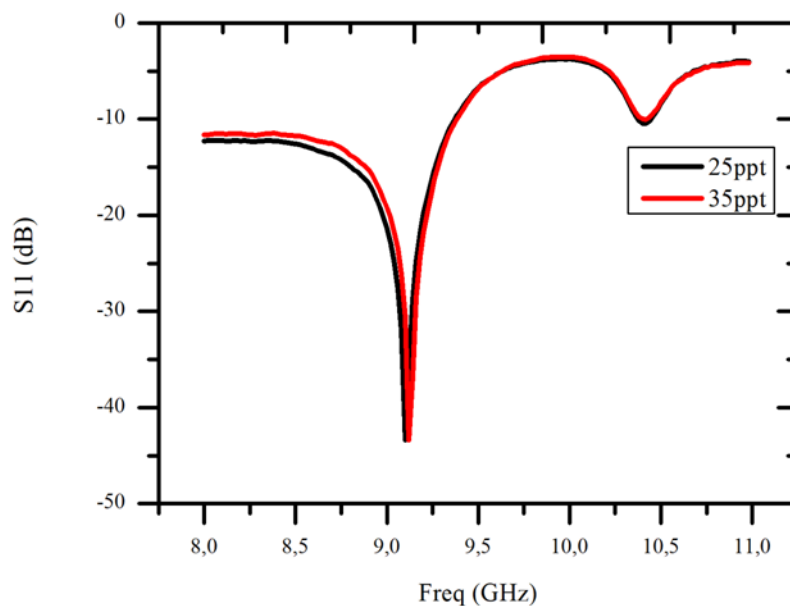


Figure 3.21. resultat expérimental pour la mesure de salinité

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons la conception et la simulation d'un capteur de salinité basé sur la technologie SIW (Guide d'onde intégré au substrat). Le principe repose sur l'influence de la concentration en sel sur les propriétés électromagnétiques du milieu et la variation des paramètres du capteur, en particulier la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion. Les caractéristiques de résonance du capteur sont influencées par les liquides à travers une fente ouverte sur le plan supérieur

Les résultats obtenus dans HFSS ont montré que le capteur est capable de détecter les variations de salinité avec une bonne sensibilité et une réponse stable. Avec ses faibles pertes, sa structure compacte et son faible coût de fabrication, le capteur proposé est une

solution prometteuse pour la surveillance de la qualité de l'eau dans les domaines environnementaux, industriels et agricoles

Conclusion Générale

Ce travail a permis d'explorer, de concevoir et de valider un capteur de salinité innovant reposant sur la technologie des guides d'ondes intégrés au substrat (SIW). Après avoir présenté les principes fondamentaux des capteurs, leurs évolutions historiques et leurs différentes applications, l'étude s'est concentrée sur les avantages uniques offerts par la technologie SIW en termes de compacité, de faible coût, de facilité d'intégration et de performances électromagnétiques.

La modélisation et la simulation du capteur sous HFSS ont démontré la capacité du dispositif à détecter avec précision les variations de salinité grâce à l'analyse de la fréquence de résonance et du coefficient de réflexion. L'introduction d'une fente sur la cavité SIW permet un couplage efficace avec les milieux liquides, rendant ainsi possible la mesure fine de la salinité via les propriétés électromagnétiques du système.

L'exploitation de la méthode d'interpolation de Newton a permis d'établir une relation mathématique fiable entre la fréquence de résonance et la salinité, facilitant l'étalonnage du capteur et l'estimation rapide de la salinité à partir des mesures expérimentales.

En résumé, le capteur proposé se distingue par sa sensibilité, sa stabilité, sa simplicité de fabrication et son potentiel d'intégration dans des systèmes de surveillance environnementale, industrielle ou agricole. Ce travail ouvre ainsi la voie au développement de solutions compactes et économiques pour le contrôle de la qualité de l'eau, tout en offrant des perspectives d'optimisation et d'applications futures dans des contextes variés.

Références Bibliographiques

- [1] K.W. Lee and K.Wise., "SENSIM : A Simulation Program for Solid-state Pressure Sensors", IEEE. 1982.
- [2] Liwei Lin , "A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors", IEEE. 1999.
- [3] S.P. Timochenko, S.Woiniowsky-Krieger, "Theory of plates and shells", New York : Mc Graw-hill, p.580, 1959.
- [4] Fouad Kerrou, "Etude et Modélisation de Capteur de Pression Piezorésistifs et Capacitifs au Silicium" ,Thèse Doctorat de l'université Mentouri Constantine, 2008.
- [5] Bourcerie-Savary, É., &Bourcerie, M. (2019). Le temps: Aspects scientifiques et historiques. ISTE Group.
- [6] Christophe Pijolat, "Etude des capteurs microélectroniques : actifs et passifs", Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004.
- [7] Georges Asch, "Les capteurs en instrumentation industrielle", Dunod (ISBN 2100057774)
- [8] P. Fabry, C. Gondran, "Capteurs électrochimiques", Ellipses, Paris, 2008.
- [9] F. Baudoin, M. Lavabre, "Capteurs : principes et utilisation cours et exercices résolus", Editions Casteilla, Paris, 2007.
- [10] L.G Blum, P.R. Coulet, "Biosensors principles and applications", Ed Marcel Dekker, New York, 1991.
- [11] A.Moliton, "Applications de l'électromagnétisme dans les milieux matériels", Hermes Sciens, 2004.
- [12] Isabelle Zdanevitch, "Veille technologique capteurs de gaz", Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), France (2000).
- [13] Drake, S. (2003). Galileo at work: His scientific biography. Courier Corporation.

- [14] Seebeck, T. J. (1895). *Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz* (Vol. 70). Engelmann
- [15] Curie, J., & Curie, P. (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de minéralogie*, 3(4), 90-93.
- [16] Cady, W. G. (1946). *Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals*. McGraw-Hill.
- [17] Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical review*, 74(2), 230
- [18] Madou, M. J. (2018). *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*. CRC press.
- [19] Kovacs, G. T. (1998). *Micromachined transducers sourcebook* (Vol. 2, pp. 242-245). New York: WCB/McGraw-Hill.
- [20] Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York, NY: Springer New York.
- [21] Norton, H. (1989). *Transducer fundamentals*. Handbook of Transducers.
- [22] Tompkins, W. J., & Webster, J. G. (1988). *Interfacing Sensors to the IBM PC*. Prentice-Hall, Inc..
- [23] Lide, D.R.; Haynes, W.M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2009.
- [24] Wentz, F.J.; Meissner, T. AMSR OCEAN Algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document. RemoteSens.Syst. Tech. Rep. 1998, 110398, 65.
- [25] Stogryn, A.P.; Bull, H.T.; Rubayi, K.; Iravanchy, S. *The Microwave Permittivity of Sea and Fresh Water*; GenCorp Aerojet: Azusa, CA, USA, 1995.
- [26] Alhzzoury, A. (2013). *Contribution à la modélisation des structures SIW et SINRD pour application micro-ondes et télécommunication*. Institut National Polytechnique de Toulouse. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-04287208/>
- [27] Pozar, D. (2012). *Microwave engineering* (éd. 4). New York: John Wiley & Sons.

- [28] Cadiz, F., & Couairon, A. (2025). Maxwell's Equations, Electromagnetic Waves and Light. Dans F. Cadiz, & C. Arnaud, *Classical Electrodynamics: Fundamentals and Applications* (pp. 475–510).
- [29] MacGorman, D., & Rust, .(1998). *The electrical nature of storms*. New York: Oxford University Press.
- [30] Ellingson, S. (2020). *Electromagnetics* (Vol. 2). Récupéré sur <https://dlib.phenikaa-uni.edu.vn/handle/PNK/6756>
- [31] Garreau, P.,(2012), "Variation spatio-temporelle de la température et de la salinité. Sous-région marine Méditerranée occidentale. Evaluation initiale DCSMM.", *Expertises*, url = "https://archimer.ifremer.fr/doc/00330/44110/",
- [32] Gao, Y., Zhang, F., Lv, X., Guo, C., Shang, X., Li, L., Liu, J., Liu, Y., Wang, Y., & Lancaster, M. J. (2020). "Substrate Integrated Waveguide Filter–Amplifier Design Using Active Coupling Matrix Technique". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(5), 1706–1716. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2972390>
- [33] D. Deslandes and K. Wu, (2001), "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 68-70, Feb. 2001, doi: 10.1109/7260.914305.
- [34] Aparna, E., Ram, G., & Arun Kumar, G. (2022). Review on Substrate Integrated Waveguide Cavity Backed Slot Antennas. 10, 133504 - 133525.

doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3231984>
- [35] Uchimura, H., Takenoshita, T., & Fujii, M. (1998). "Development of a "laminated waveguide". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(12), 2438-2443.

doi:<https://doi.org/10.1109/22.739232>
- [36] Wu, K., Deslandes, D., & Cassivi, Y. (2003). The Substrate Integrated Circuits - A New Concept for High-Frequency Electronics and Optoelectronics. 6th International Conference on

Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. Nis, Yugoslavia: IEEE. doi:<https://doi.org/10.1109/TELSKS.2003.1246173>.

- [37] Nwajana, A., & Obi, E. (2022). "A review on SIW and its applications to microwave components". *Electronics*, 11(7). doi:<https://doi.org/10.3390/electronics11071160>
- [38] Akkader, ., Baghdad, n., Bouyghf, h., &Khobzi, I. (2025). "Non-standard SIW techniques for modern applications: State of the art". *Results in Engineering*, 28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108322>
- [39] Kumar, A., & Raghavan, S. (2017). "Design of a broadband planar cavity-backed circular patch antenna". *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 82, 413-419. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.10.015>
- [40] Rajo-Iglesias, E., Sipus, Z., Zaman, A., & Kildal, P.-S. (2019). "Gap Waveguide Technology". Dans F. Yang, & Y. Rahmat-Samii, *surface electromagnetics with applications in antenna, microwave, and optical engineering* (pp. 198-222).