

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département D'électronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications
Domaine : Science et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux Télécommunications
Thème

**Détection de la corrosion à l'aide d'une nouvelle
méthode basée sur des capteurs et antennes inspirée
de la technologie RFID**

Présenté Par :

- 1) Mr BENBABOUCHE Mohammed El Amine
- 2) Mr BENFATAH Nasreddine

Devant le jury composé de :

Dr SOUIKI Sihem	MCA	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Présidente
Dr MOULESSEHOUL Wassila	MCB	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examinatrice
Dr DEBBAL Mohammed	MCA	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant
Dr EL BOUSLEMTI Rahmouna	MCA	ENP.M.A (Oran)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2021/2022



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عين تموشنت- بلحاج بوشعيب-
Université Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib -
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Formulaire de déclaration sur l'honneur

Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigné,

Etudiant, M. ou M^{elle} **BENFATAH Nasreddine**

Détenteur d'une carte d'étudiant N° :....., délivrée le :à

Inscrit à la faculté : **Sciences et de Technologie**

Département : **D'électronique et des Télécommunications**

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'études Master 2 en **Réseaux et Télécommunications**

Intitulé : **Détection de la corrosion à l'aide d'une nouvelle méthode basée sur des capteurs et antennes inspirée de la technologie RFID**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscité.

À Ain Temouchent, le : ../../....

Signature de l'étudiant



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عين تموشنت- بلحاج بوشعيب-
Université Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib -
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Formulaire de déclaration sur l'honneur

Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigné,

Etudiant, M. ou M^{elle} **BENBABOUCHE Mohammed El Amine**

Détenteur d'une carte d'étudiant N° :....., délivrée le :à

Inscrit à la faculté : **Sciences et de Technologie**

Département : **D'électronique et des Télécommunications**

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'études Master 2 en **Réseaux et Télécommunications**

intitulé : **Détection de la corrosion à l'aide d'une nouvelle méthode basée sur des capteurs et antennes inspirée de la technologie RFID**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscité.

À Ain Temouchent, le : ../../....

Signature de l'étudiant

Attestation de Stage 1



شركة كهرباء الجزائر
SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR

Direction de la Centrale de Terga

N° 82 / AS /DCT/SKE/2022

ATTESTATION DE STAGE PRATIQUE

Nous attestons SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR « SKE.Spa », Direction de la Centrale de TERGA que Monsieur **BENFATAH NASREDDINE**, né le **31/07/1997** à **Ain Témouchent**, étudiant MASTER 2 en « **TELECOMMUNICATION** » spécialité « **RESEAUX ET TELECOMMUNICATION** » à l'Université BELHADJ BOUCHAIB-Ain Témouchent, a suivi un stage pratique de 15 jours au sein de la Direction de La Centrale électrique de Terga –Commune de Ouled Boudjemaa du **17/04/2022** au **02/05/2022** dans la spécialité « **RESEAUX ET TELECOMMUNICATION** ».

DIRECTION DE LA CENTRALE DE TERGA



D. ROUBA

Attestation de stage 2



شركة كهرباء الجزائر
SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR

Direction de la Centrale de Terga

N° 83 / AS /DCT/SKE/2022

ATTESTATION DE STAGE PRATIQUE

Nous attestons SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR « SKE.Spa », Direction de la Centrale de TERGA que Monsieur **BENBABOUCHE MOHAMMED**, né le **10/05/1994** à **Remchi**, étudiant MASTER 2 en « **TELECOMMUNICATION** » spécialité « **RESEAUX ET TELECOMMUNICATION** » à l'Université BELHADJ BOUCHAIB-Ain Témouchent, a suivi un stage pratique de 15 jours au sein de la Direction de La Centrale électrique de Terga –Commune de Ouled Boudjema du **17/04/2022** au **02/05/2022** dans la spécialité « **RESEAUX ET TELECOMMUNICATION** ».

DIRECTION DE LA CENTRALE DE TERGA



Remerciements

Au terme de la rédaction de ce mémoire grâce à **Dieu** le Tout Puissant et le Miséricordieux, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que nous devons à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici nos vifs respects et notre profonde gratitude.

Nous présentons nos profonds respects et nos reconnaissances à **Mr DEBBAL Mohammed** pour son encadrement fructueux, sa générosité, son suivi et ses orientations judicieuses, qui nous ont facilité ce travail.

Par la même volonté et la même chaleur, nous tenons à remercier **Mme EL BOUSLEMTI Rahmouna** Dr de l'Ecole national polytechnique d'Oran Maurice Audin qui a suivi ce travail dans tous ces détails avec une rigueur scientifique exceptionnelle, ce qui nous avons donné le courage pour poursuivre la réalisation de ce projet. Elle a su nous faire partager son expérience et son intérêt pour la recherche à travers de conseils et d'échanges amicaux.

Nous exprimons notre gratitude au corps professoral et administratif de la faculté du Sciences et Technologies département d'électronique et des Télécommunications de l'université de Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts et une grande technique pédagogique pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury **Dr SOUIKI Sihem** et **Dr MOULESSEHOUL Wassila** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre thème en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons encore à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous n'oublions pas nos parents qui nous ont soutenus durant toutes ses années et qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, nous remercions tous nos camarades de promotion pour la solidarité et la collaboration durant ces trois ans de formation.

Dédicace

Je dédie ce petit travail à mes très chers parents, à tous mes amis, mon binôme Nasro qui m'ont toujours aidé et soutenu durant mes années d'études, à tous qui m'ont aidé au cours de ce travail.

Puisse Allah vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

BENBAOUCHE Mohammed El Amine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à

Ma mère HOUARIA, mon père HACEN pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué ; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance.

A mes chères frères et sœurs MOHAMMED, AMEL, FADELA, SOUHILA et AMINA en leurs souhaitant beaucoup de réussite dans leurs vies et la vie de leurs enfants.

A mon binôme Amine et aux plus proches amis, collègues qui m'ont soutenu.

BENFATAH Nasreddine

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception d'un capteur de corrosion passif, sans contact. L'objectif de ce travail s'agit de concevoir des antennes patchs et un capteur qui constituent un démonstrateur inspiré de la technologie RFID. Ce type de capteur est très sensible aux paramètres environnementaux, basé sur une fonction hyperfréquence dont une variation de fréquence de l'onde émise qui permet de suivre le processus de la corrosion. L'utilisation des antennes permettent d'envisager la propagation classique des ondes RF pour une communication à distance. Le démonstrateur réalisé permet de détecter et de suivre le processus de la corrosion.

Mots clés : Capteur, Corrosion, Passif, Antennes, RFID, Démonstrateur.

Abstract

This thesis deals with the design of a passive, non-contact corrosion sensor. The objective of this work is to design patch antennas and a sensor that constitute a demonstrator inspired by RFID technology. This type of sensor is very sensitive to environmental parameters, based on a microwave function whose frequency variation of the emitted wave allows to follow the corrosion process. The use of antennas allows to consider the classical propagation of RF waves for a remote communication. The realized demonstrator makes it possible to detect and follow the process of corrosion.

Keywords : Sensor, Corrosion, Passive, Antennas, RFID, Demonstrator.

المخلص

تركز هذه المذكرة على تصميم مستشعر تآكل غير ملامس. الهدف من هذا العمل هو تصميم هوائيات التصحيح و مستشعر مستوحى من تكنولوجيا تحديد تردد الراديو RFID. هذا النوع من المستشعرات حساس جدا للمعايير البيئية، بناء إلى وظيفة الميكروويف بما في ذلك تباين الموجة المنبعثة الذي يسمح بمتابعة عملية التآكل. يسمح استخدام الهوائيات بالانتشار التقليدي لموجات التردد اللاسلكي للإتصال عن بعد. ويتيح الموضح إمكانية الكشف عن عملية التآكل ومتابعتها.

الكلمات المفتاحية : مستشعر، تآكل ، هوائيات، تكنولوجيا تحديد تردد الراديو، الموضح

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	IV
Table des matières	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition de la corrosion	3
1.3 Facteurs affectant la corrosion	5
1.4 Types de corrosion	5
1.4.1 Corrosion par crevasse	5
1.4.2 Corrosion fissurante sous contrainte	6
1.4.3 Corrosion intergranulaire	6
1.4.4 Corrosion galvanique	7
1.4.5 Corrosion par piqûres	7
1.4.6 Corrosion uniforme	8
1.4.7 Rainurage par l'hydrogène	8
1.4.8 Poussière métallique	8
1.4.9 Corrosion microbienne	9
1.4.10 Corrosion à haute température	9
1.5 Effet de corrosion	10
1.6 Prévention de la corrosion	10
1.7 Conclusion	11
Chapitre 2 : Les capteurs de corrosion	12
2.1 Introduction	13
2.2 Les capteurs	13
2.2.1 Capteurs actifs	13
2.2.2 Capteurs passifs	14
2.3 Les effets physiques dans les capteurs	14
2.4 Les différents types de capteur de corrosion	15
2.4.1 Coupon de corrosion	15
2.4.2 Sonde de résistance électrique	16

Liste des matières

2.4.3	Capteurs électrochimiques	17
2.4.4	Capteur de contrôle par ultrasons	18
2.4.5	Méthode de fuite de flux magnétique	19
2.4.6	Capteurs électromagnétiques multifréquences	19
2.5	Capteur sans fils passif	20
2.5.1	Capteurs passifs d'identification par radiofréquence RFID	21
2.5.2	Capteurs à ondes acoustiques de surface SAW	21
2.6	Conclusion	23
Chapitre 3 : Antennes microstrip et technologie RFID		24
3.1	Introduction	25
3.2	Antenne microstrip 'patch'	25
3.2.1	Description d'une antenne patch	25
3.2.2	Les avantages et les inconvénients des antennes microstrip	26
3.2.3	Rayonnement de l'antenne patch	26
3.2.4	Bande passante de l'antenne patch	27
3.2.5	Les techniques d'alimentation d'antennes patch	28
3.2.6	Applications	30
3.3	Technologie RFID	30
3.3.1	Définition	30
3.3.2	Principe de fonctionnement	31
3.3.3	Composition d'un système RFID	32
3.3.4	Applications et utilisations	33
3.4	Conclusion	34
Chapitre 4 : Modélisation numérique et réalisation.....		35
4.1	Introduction	36
4.2	Partie simulation	36
4.2.1	Modélisation numérique	36
4.2.2	Présentation de la structure étudiée	36
4.2.3	Dimensionnement géométrique des structures proposées	39
4.2.4	Résultat de la modélisation numérique	42
4.3	Partie réalisation	43
4.3.1	Matériels utilisés	43
4.3.2	Les étapes de la réalisation	48
4.3.3	Mesure hyperfréquence	53
4.4	Conclusion	55

Liste des matières

Conclusion Générale.....	57
Bibliographie	58
Annexe A.....	61
Annexe B.....	64

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion

Figure 1 1: La corrosion entre l'environnement et le matériau.....	4
Figure 1 2: La corrosion du métal.....	4
Figure 1 3: corrosion par crevasse.....	6
Figure 1 4: corrosion intergranulaire.....	6
Figure 1 5: corrosion galvanique.....	7
Figure 1 6: corrosion par piqûres.....	8
Figure 1 7: La corrosion du cuivre.....	10

Chapitre 2 : Les capteurs de corrosion

Figure 2 1: Principe de fonctionnement d'un capteur.....	13
Figure 2 2 : La classes de capteurs (passifs / actifs).....	14
Figure 2 3: Coupons de corrosion installés dans les canalisations.....	16
Figure 2 4: Éléments de détection de résistance électrique (ER) commerciaux avec différentes formes.....	17
Figure 2 5: (a) Capteurs de corrosion commerciaux à résistance de polarisation linéaire (b) Capteurs de corrosion à réseau multi-électrodes couplés ; (c) Capteur électrochimique avancé.....	18
Figure 2 6: Schéma des mesures d'épaisseur de paroi par test par ultrasons (UT).....	18
Figure 2 7: Principe de la fuite de flux magnétique.....	19
Figure 2 8: (a) Schéma des courants de Foucault induits dans un tube en acier (b) Schéma des courants de Foucault induits circulant autour d'un défaut (c) Schéma d'un outil électromagnétique multifréquence (EM).....	20
Figure 2 9: Schéma d'un système de capteur passif à antenne d'identification par radiofréquence comprenant une étiquette RFID, un lecteur et des antennes.....	21
Figure 2 10: Schéma (a) d'un capteur à ondes acoustiques de surface (SAW) avec une couche de détection revêtue sur la ligne à retard et (b) d'un capteur SAW fonctionnalisé interrogé sans fil.....	22

Chapitre 3 : Antennes microstrip et technologie RFID

Figure 3 1: présentation d'une antenne imprimée.....	25
Figure 3 2: différentes formes d'élément rayonnant.....	26
Figure 3 3: distribution de charge.....	27
Figure 3 4: distribution du champ électrique vertical.....	27
Figure 3 5: alimentation par ligne micro-ruban.....	28
Figure 3 6: alimentation coaxiale.....	29
Figure 3 7: alimentation couplée par proximité.....	29
Figure 3 8: alimentation couplée par ouverture.....	30
Figure 3 9: Schéma illustrant un système RFID.....	31
Figure 3 10: Principe de fonctionnement de la RFID.....	31
Figure 3 11: Lecteur RFID.....	32
Figure 3 12: Tag RFID.....	33
Figure 3 13: Exemples d'utilisations de la RFID.....	33

Chapitre 4 : Modélisation numérique et réalisation

Figure 4 1: Modélisation de la structure en 3D à l'aide le simulateur Ansoft HFSS.....	37
Figure 4 2: Modélisation de l'antenne en 3D à l'aide le simulateur Ansoft HFSS.....	37
Figure 4 3: Wave-port : Configuration du signal électrique.....	38
Figure 4 4: signal transmis du port 1 au port 2	39
Figure 4 5: Lignes de champ électrique.....	39
Figure 4 6: Dimensions de l'antenne patch rectangulaire.....	40
Figure 4 7: Schéma de la structure en 2D.....	40
Figure 4 8: Les paramètres S en fonction de la fréquence.....	42
Figure 4 9: Simulation HFSS du fonctionnement de l'antenne imprimée.....	43
Figure 4 10: Des feuilles transparentes.....	43
Figure 4 11: Une plaque de circuit imprimé époxy FR4	44
Figure 4 12: Une insoleuse.....	44
Figure 4 13: Le découpeur des circuits imprimés.....	45
Figure 4 14: des gants de protection.....	45
Figure 4 15: Le révélateur.....	46
Figure 4 16: Le perchlorure de fer.....	47
Figure 4 17: Les connecteurs SMA.....	47
Figure 4 18: Un analyseur de réseau.....	48
Figure 4 19: découpage de la plaque présensibilisé.....	49
Figure 4 20: la préparation du typon sur la plaque présensibilisée.....	49
Figure 4 21: la révélation de plaques.....	50
Figure 4 22: la gravure de la carte.....	51
Figure 4 23: le capteur imprimé.....	51
Figure 4 24: les composants finals.....	52
Figure 4 25: capteur corrodé.....	52
Figure 4 26: l'antenne sous test.....	53
Figure 4 27: Architecture inspirée de la technologie RFID sans puce.....	53
Figure 4 28: démonstrateur de la technologie RFID.....	54
Figure 4 29: la réponse du démonstrateur.....	55

Liste des tableaux

Tableau 4 1: Paramètres physique du matériau magnétique le cuivre.....	38
Tableau 4 2: les paramètres géométriques de la structure.....	41
Tableau 4 3: les paramètres physiques de la structure.....	41

Introduction générale

La corrosion et la dégradation des matériaux constituent des problèmes majeurs qui a un impact important sur des nombreuses activités comme l'industrie de l'automobile, la pétrochimie ou encore le génie civil. Les processus physico-chimiques responsables de cette dégradation sont nombreux et complexes. Ils dépendent de divers paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, les polluants, les contraintes mécaniques.... Dans ce cadre, le suivi de la dégradation des matériaux est primordial car il permet d'améliorer les opérations de maintenance et de réduire significativement les coûts d'entretien des structures ou infrastructures. Le suivi rentre dans le cadre des techniques de maintenances prédictives qui sont, de nos jours, de plus en plus étudiées et développées au niveau industriel.

Il existe plusieurs techniques de détection de la corrosion, ces techniques ont de nombreux inconvénients : équipements chers, difficultés d'analyse des résultats, mesures en contact, limitation à une durée d'exposition relativement courte et/ou des zones faciles d'accès. En effet, les capteurs utilisés par ces techniques sont dans la plupart du temps énergétiquement actifs et nécessitent ainsi une source d'alimentation permanente, ce qui présente un inconvénient majeur, compte tenu de la longue durée de vie des infrastructures exposées à la corrosion (plusieurs années). Ainsi, il existe un réel intérêt dans la conception des dispositifs pour la détection et la surveillance de la corrosion qui soient passifs et sans contact, afin de pouvoir les détecter à distance.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les différents types de corrosion et les moyens qui affectent ce phénomène.

Le deuxième chapitre présente les différents types de capteurs de corrosion disponible sur le marché et ses principaux de fonctionnement.

Le troisième chapitre porte sur les antennes microstrip et traite des généralités sur la technologie RFID notamment son évolution et ses principaux mécanisme de fonctionnement, et la façon avec laquelle les informations d'identification transitent.

Introduction générale

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique des composants en utilisant le logiciel HFSS de simulation et présentera ; le matériel utilisé dans cette réalisation ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion

1.1 Introduction :

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénierie, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité publique en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement. [1]

1.2 Définition de la corrosion :

La corrosion est définie comme un processus naturel qui provoque la transformation des métaux purs en substances indésirables lorsqu'ils réagissent avec des substances telles que l'eau ou l'air. Cette réaction endommage et désintègre le métal en commençant par la partie du métal exposée à l'environnement et en s'étendant à l'ensemble du métal.

La corrosion est généralement un phénomène indésirable car elle affecte négativement les propriétés souhaitables du métal. Par exemple, le fer est connu pour avoir une bonne résistance à la traction et une bonne rigidité (surtout allié à quelques autres éléments). Cependant, lorsqu'ils sont soumis à la rouille, les objets en fer deviennent cassants, écaillés, et leur structure n'est pas solide. D'autre part, la corrosion est un processus contrôlé par diffusion et elle se produit principalement sur les surfaces exposées. Par conséquent, dans certains cas, on tente de réduire l'activité de la surface exposée et d'augmenter la résistance à la corrosion d'un matériau. Des procédés tels que la passivation et la conversion au chromate sont utilisés. Cependant, certains mécanismes de corrosion ne sont pas toujours visibles et ils sont encore moins prévisibles.

Par ailleurs, la corrosion peut être classée comme un processus électrochimique car elle implique généralement des réactions d'oxydoréduction entre le métal et certains agents atmosphériques tels que l'eau, l'oxygène, le dioxyde de soufre, etc.

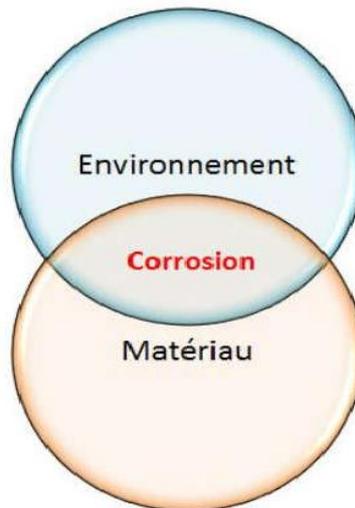


Figure 1 1: La corrosion entre l'environnement et le matériau. [2]

Les métaux situés plus haut dans la série de la réactivité, comme le fer, le zinc, etc., se corrodent très facilement, tandis que les métaux situés plus bas dans la série de la réactivité, comme l'or, le platine et le palladium, ne se corrodent pas. L'explication réside dans le fait que la corrosion implique l'oxydation des métaux. Plus on descend dans la série de réactivité, plus la tendance à s'oxyder est faible (les potentiels d'oxydation sont très bas).

Il est intéressant de noter que l'aluminium ne se corrode pas, contrairement aux autres métaux, même s'il est réactif. Cela est dû au fait que l'aluminium est déjà recouvert d'une couche d'oxyde d'aluminium. Cette couche d'oxyde d'aluminium le protège de toute corrosion supplémentaire. [2]



Figure 1 2: La corrosion du métal. [2]

1.3 Facteurs affectant la corrosion :

1. Exposition des métaux à l'air contenant des gaz comme le CO₂, le SO₂, le SO₃, etc.
2. L'exposition des métaux à l'humidité, en particulier à l'eau salée (qui augmente le taux de corrosion).
3. Présence d'impuretés comme le sel (ex : NaCl).
4. La température : Une diminution de la température accroît la corrosion.
5. Nature de la première couche d'oxyde formée : certains oxydes comme Al₂O₃ forment une couche protectrice insoluble qui peut empêcher toute corrosion ultérieure. D'autres, comme la rouille, s'effritent facilement et exposent le reste du métal.
6. Présence d'acide dans l'atmosphère : les acides peuvent facilement accélérer le processus de corrosion. [3]

1.4 Types de corrosion :

Parmi les types de corrosion, on peut citer :

1.4.1 Corrosion par crevasse :

Chaque fois qu'il y a une différence de concentration ionique entre deux zones locales d'un métal, une forme de corrosion localisée, appelée corrosion par crevasses, peut se produire. Dans un exemple simple, cette forme de corrosion se produit principalement dans des espaces confinés (crevasses). Les joints d'étanchéité, la surface inférieure des rondelles et les têtes de boulons sont des exemples de zones où la corrosion par fissuration peut se produire. Toutes les catégories d'alliages d'aluminium et d'aciers inoxydables subissent également une corrosion en fissure. Cela est principalement dû à la formation d'une cellule d'aération différentielle qui entraîne la formation de corrosion à l'intérieur des crevasses. [4]



Figure 1 3: corrosion par crevasse. [4]

1.4.2 Corrosion fissurante sous contrainte :

La fissuration par corrosion sous contrainte peut être abrégée en "CSC" et désigne la fissuration du métal sous l'effet de l'environnement corrosif et de la contrainte de traction exercée sur le métal. Elle se produit souvent à des températures élevées.

Exemple : Fissuration par corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable austénitique dans une solution de chlorure. [4]

1.4.3 Corrosion intergranulaire :

La corrosion intergranulaire est due à la présence d'impuretés dans les joints de grains qui séparent les grains formés pendant la solidification de l'alliage métallique. Elle peut également se produire par l'appauvrissement ou l'enrichissement de l'alliage à ces joints de grains.

Exemple : Les alliages à base d'aluminium sont affectés par la CIG.



Figure 1 4: corrosion intergranulaire. [4]

1.4.4 Corrosion galvanique :

Lorsqu'il existe un contact électrique entre deux métaux dissemblables sur le plan électrochimique et se trouvant dans un environnement électrolytique, une corrosion galvanique peut apparaître. Elle désigne la dégradation de l'un de ces métaux au niveau d'un joint ou d'une jonction. Un bon exemple de ce type de corrosion serait la dégradation qui se produit lorsque le cuivre, dans un environnement d'eau salée, entre en contact avec l'acier.

Exemple : Lorsque l'aluminium et l'acier au carbone sont reliés et immergés dans l'eau de mer, l'aluminium se corrode plus rapidement et l'acier est protégé. [4]



Figure 1 5: corrosion galvanique. [4]

1.4.5 Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres est très imprévisible et donc difficile à détecter. Elle est considérée comme l'un des types de corrosion les plus dangereux. Elle se produit à un endroit précis et se traduit par la formation d'une cellule de corrosion entourée par la surface métallique normale. Une fois que ce « puits » est formé, il continue de croître et peut prendre différentes formes. La fosse pénètre lentement le métal à partir de la surface dans une direction verticale, ce qui peut entraîner une défaillance structurelle si rien n'est fait.

Exemple : Prenons l'exemple d'une gouttelette d'eau sur une surface en acier, la piqûre commencera au centre de la gouttelette d'eau (site anodique). [4]



Figure 1 6: corrosion par piqûres. [4]

1.4.6 Corrosion uniforme :

Il s'agit de la forme la plus courante de corrosion, dans laquelle l'atmosphère attaque la surface du métal. L'étendue de la corrosion est facilement discernable. Ce type de corrosion a un impact relativement faible sur les performances du matériau.

Exemple : Un morceau de zinc et d'acier immergé dans de l'acide sulfurique dilué se dissout généralement sur toute sa surface à une vitesse constante. [4]

1.4.7 Rainurage par l'hydrogène :

Il s'agit d'une corrosion de la tuyauterie par des rainures qui se forment en raison de l'interaction d'un agent corrosif, des constituants corrodés de la tuyauterie et des bulles de gaz d'hydrogène. Les bulles enlèvent généralement le revêtement protecteur dès qu'il entre en contact avec le matériau. [4]

1.4.8 Poussière métallique :

La poussière métallique est une forme dommageable de corrosion qui se produit lorsque des matériaux vulnérables sont exposés à certains environnements à forte teneur en carbone, notamment le gaz de synthèse. La corrosion se traduit par la décomposition du métal en poudre. La corrosion se produit lorsqu'une couche de graphite est déposée sur la surface des métaux à partir du monoxyde de carbone (CO) en phase vapeur. Cette couche de graphite forme ensuite des espèces M₃C métastables (où M est le métal) qui s'éloignent généralement de la surface du métal. Dans certains cas, aucune espèce M₃C ne peut être observée. Cela signifie que les atomes de métal ont été directement transférés dans la couche de graphite. [4]

1.4.9 Corrosion microbienne :

La corrosion microbienne, également connue sous le nom de corrosion sous influence microbiologique (MIC), est un type de corrosion causé par des micro-organismes. Le plus courant est celui des chimioautotrophes. Les matériaux métalliques et non métalliques, en présence ou en l'absence d'oxygène, peuvent être affectés par cette corrosion. [4]

1.4.10 Corrosion à haute température :

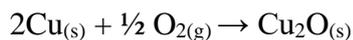
La corrosion à haute température, comme son nom l'indique, est un type de corrosion des matériaux (principalement des métaux) due à la chaleur. La détérioration chimique du métal peut se produire en raison d'une atmosphère chaude qui contient des gaz tels que l'oxygène, le soufre ou d'autres composés. Ces composés sont capables d'oxyder facilement les matériaux (les métaux dans ce cas). Par exemple, les matériaux utilisés dans les moteurs de voitures doivent résister à des périodes prolongées à des températures élevées pendant lesquelles ils peuvent être affectés par une atmosphère contenant des produits de combustion corrosifs.

Exemples, réactions et effets de la corrosion.

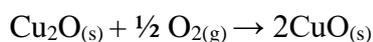
Voici quelques exemples typiques de corrosion que l'on observe principalement dans les métaux. [4]

- **Corrosion du cuivre :**

Lorsque le cuivre métallique est exposé à l'environnement, il réagit avec l'oxygène de l'atmosphère pour former de l'oxyde de cuivre (I) de couleur rouge.



Cu_2O est ensuite oxydé pour former CuO qui est de couleur noire.



Ce CuO réagit avec le CO_2 , le SO_3 et le H_2O (présents dans l'atmosphère) pour former du $\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{s})$ (Malachite) qui est de couleur bleue et du $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6(\text{s})$ (Brochantite) qui est de couleur verte.

C'est pourquoi nous observons que le cuivre prend une couleur bleu-vert.

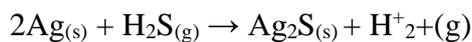
Un exemple typique de ce phénomène est la couleur de la statue de la liberté, dont la couche de cuivre prend une couleur bleu-vert. [4]



Figure 1 7: La corrosion du cuivre. [4]

- **Ternissement de l'argent :**

L'argent réagit avec le soufre et les composés sulfurés présents dans l'air pour donner du sulfure d'argent Ag_2S de couleur noire. L'argent exposé forme Ag_2S lorsqu'il réagit avec le $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ présent dans l'atmosphère en raison de certains processus industriels.



D'autres exemples incluent,

La corrosion du zinc lorsqu'il réagit avec l'oxygène et le HCl pour former du ZnCl_2 de couleur blanche.

La corrosion de l'étain qui forme du $\text{Na}_2[\text{Sn}(\text{OH})_2]$ de couleur noire. [4]

1.5 Effet de corrosion :

La corrosion peut avoir un effet plus ou moins important sur beaucoup de choses. Ainsi, elle entraîne principalement un gaspillage des ressources naturelles. En outre, elle peut provoquer des situations dangereuses telles que des structures de bâtiments qui deviennent faibles et instables, des accidents causés par des pièces corrodées ainsi que d'autres défaillances indésirables telles que des pipelines fissurés, des ponts qui s'effondrent, des accidents de véhicules de transport ou d'autres catastrophes. Il est donc important de contrôler et de prévenir la corrosion à tout prix. [5]

1.6 Prévention de la corrosion :

La prévention de la corrosion est très importante afin d'éviter des pertes énormes. La majorité des structures que nous voyons et utilisons sont faites de métaux. Il s'agit notamment des ponts, des automobiles, des machines, des articles ménagers tels que les grilles de fenêtres, les

Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion

portes, les lignes ferroviaires, etc. Bien que ce problème soit préoccupant, plusieurs traitements sont utilisés pour ralentir ou prévenir les dommages causés par la corrosion aux objets métalliques. Ce problème est préoccupant, mais plusieurs traitements sont utilisés pour ralentir ou prévenir les dommages causés par la corrosion aux objets métalliques, en particulier aux matériaux fréquemment exposés aux intempéries, à l'eau salée, aux acides ou à d'autres environnements hostiles. Voici quelques-unes des méthodes populaires pour prévenir la corrosion :

- Utiliser des métaux non corrosifs, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- Veillez à ce que la surface métallique reste propre et sèche
- Utilisez des agents de séchage
- Utilisez un revêtement ou un produit barrière tel que de la graisse, de l'huile, de la peinture ou un revêtement en fibre de carbone.
- Posez une couche de remblai, par exemple du calcaire, avec les canalisations souterraines.
- Utilisez une anode sacrificielle pour assurer un système de protection cathodique. [6]

1.7 Conclusion :

Après avoir défini la corrosion, nous avons décrit les facteurs affectant la corrosion, cité ses différentes formes et son effet, et à la fin nous avons mentionné les méthodes de prévenir la corrosion.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter les différents types de capteurs de corrosion et leur champ d'application.

Chapitre 2 : Les capteurs de corrosion

2.1 Introduction :

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

Le suivi de la dégradation des matériaux est primordial car il permet d'améliorer les opérations de maintenance et de réduire les coûts d'entretien des structures ou infrastructure. Ce suivi rentre dans le cadre des techniques de maintenance prédictives qui sont dans nos jours de plus en plus étudiées et développées au niveau industriel.

Plusieurs méthode et capteurs existent déjà pour effectuer le suivi de la corrosion des matériaux c'est ce qu'on va voir dans ce chapitre. [7]

2.2 Les capteurs :

Un capteur est un dispositif qui convertit l'état d'une quantité physique observée en une quantité utilisable, telle que la tension, la hauteur de mercure et l'intensité. La différence entre un capteur et un instrument de mesure est qu'il s'agit simplement d'une simple interface entre un processus physique et des informations exploitables.

En revanche, un instrument de mesure est lui-même un appareil autonome avec un système d'affichage ou de stockage de données. Les capteurs sont les éléments de base d'un système d'acquisition de données. Leur mise en œuvre relève du domaine de l'instrumentation. Il existe en fait deux types de capteurs, les capteurs actifs et les capteurs passifs. [7]

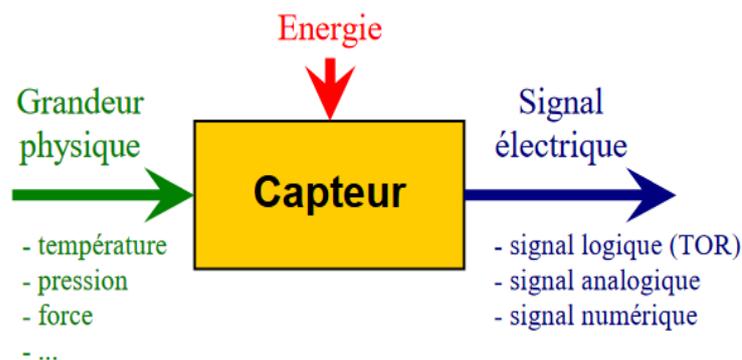


Figure 2 1: Principe de fonctionnement d'un capteur. [7]

2.2.1 Capteurs actifs :

Un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur effet physique qui assure la conversion l'énergie physique prélevée sur le mesurande en une énergie électrique qui constitue le signal de sortie. Ce signal est un courant, une tension ou une quantité d'électricité. Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de faible puissance. Ils sont dits de

bas niveau et doivent être amplifiés pour pouvoir être ensuite transmis à distance. [7]

2.2.2 Capteurs passifs :

Les capteurs passifs sont des dispositifs qui ne possèdent pas de source d'énergie embarquée et présentent l'avantage d'être facilement intégrables. Ce type de capteur est utilisé dans des applications spécifiques (surveillance environnementale, des instruments de suivis spatial et aéronautique, des applications liées à la santé) qui nécessitent des unités de mesure miniatures, passives, de grande précision et fiables.

Dans ce type de capteurs c'est l'impédance du capteur qui est sensible aux variations du mesurande. Ces variations d'impédance ne sont mesurables que par l'intermédiaire d'un circuit électronique de pré-conditionnement.

Ces capteurs ont besoin d'un circuit d'adaptation pour fournir un signal électrique de mesure utilisable. [7]

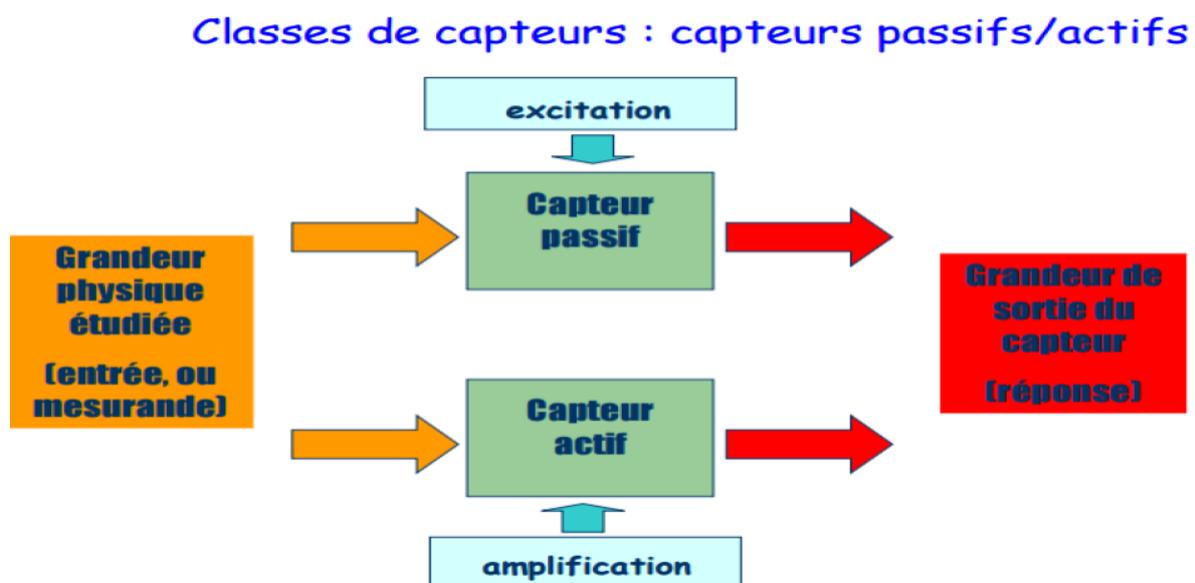


Figure 2 2 : La classes de capteurs (passifs / actifs). [7]

2.3 Les effets physiques dans les capteurs :

- **Effet thermoélectrique** : la thermoélectricité est un phénomène physique qui consiste en la conversion directe d'une énergie thermique en électricité, et inversement, dans des matériaux appropriés. Il existe trois effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre les phénomènes de conduction électrique et thermique : les effets Seebeck, Peltier et Thomson [8]

- **Effet piézo-électrique** : décrit la capacité de certains corps solides à générer une charge électrique en cas de contrainte mécanique. La force appliquée modifie la structure microscopique du corps ; des dipôles se forment entre lesquels une tension se crée. [9]
- **Effet d'induction électromagnétique** : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique). [10]
- **Effet photo-électrique** : désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Par extension, il regroupe parfois l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière. [11]
- **Effet Hall** : lorsqu'un courant électrique traversant un matériau baignant dans un champ magnétique, engendre une tension perpendiculaire au matériau. [12]

2.4 Les différents types de capteur de corrosion :

Les capteurs dédiés pour la suivie de la corrosion diffèrent dans le principe de fonctionnement de qui dépend généralement du domaine d'utilisation. [13]

2.4.1 Coupon de corrosion :

La mesure de la perte de poids des coupons de corrosion est la méthode la mieux établie et la plus utilisée dans l'industrie pour mesurer les taux de corrosion. La mesure de la perte de poids est toujours considérée comme l'étalon-or pour évaluer les taux de corrosion avant une variété de technologies de surveillance de la corrosion. Son principe de fonctionnement est le suivant: un coupon de corrosion, fait d'un matériau d'intérêt avec un poids et une forme conçus, est installé et exposé à l'environnement corrosif pendant un certain temps, puis récupéré pour mesurer le poids après corrosion et inspecter le coupon corrodé. La méthode du coupon de corrosion est couramment utilisée en raison de son principe de fonctionnement simple, de sa facilité d'utilisation et de la polyvalence de ses matériaux et de sa forme (*Figure 2 2*).

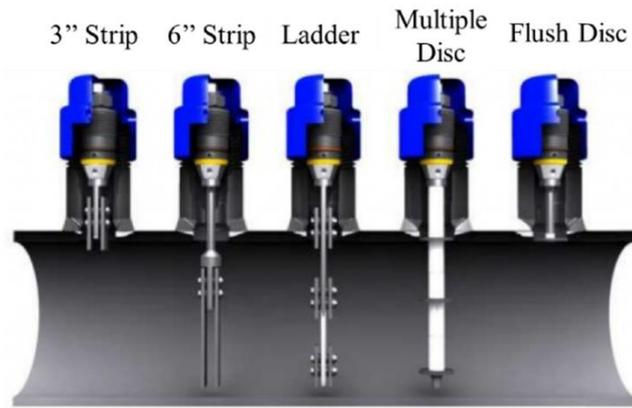


Figure 2 3: Coupons de corrosion installés dans les canalisations. [13]

2.4.2 Sonde de résistance électrique :

Une sonde de résistance électrique (ER) est une approche couramment utilisée pour la surveillance en ligne du taux de corrosion, avec la possibilité d'enregistrer automatiquement et à distance les données dans certaines versions avancées. Elle peut être considérée comme le coupon de corrosion "électrique" qui peut être surveillé en temps réel par résistance électrique. La perte de masse dans les matériaux métalliques exposés entraîne une augmentation de la résistance électrique. L'élément de détection exposé peut être personnalisé en termes de matériau et de forme pour chaque application spécifique. Les sondes ER fonctionnent à la fois pour les milieux conducteurs (par exemple, les systèmes d'eau ou d'huile avec des coupures d'eau élevées) et les milieux non conducteurs (par exemple, l'huile, le gaz et l'atmosphère). Certaines sondes ER commerciales sont présentées à la (*Figure2 3*)

Les sondes ER restent des capteurs ponctuels capables de surveiller uniquement certains endroits. Une augmentation des emplacements de détection signifie une augmentation du coût total. Comme pour les coupons de corrosion, les emplacements d'installation doivent être choisis spécifiquement pour maximiser l'efficacité des sondes ER. Le choix des emplacements est généralement basé sur l'expérience et certains emplacements peu courants peuvent être facilement omis même en cas de corrosion importante. La mesure électrique permet la collecte et l'enregistrement électroniques des données, mais elle rend les sondes ER sujettes aux problèmes électroniques courants, qui nécessitent une maintenance et un remplacement réguliers. Il est important de noter que les sondes à base électrique doivent respecter les exigences de sécurité électrique intrinsèque en présence de pétrole et de gaz naturel inflammables.

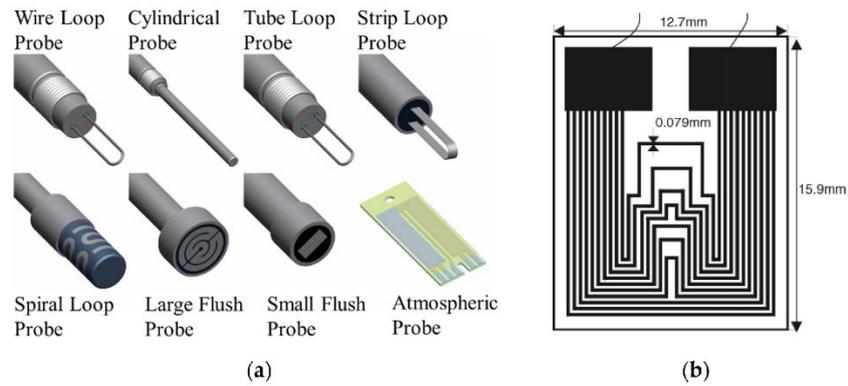


Figure 2 4: Éléments de détection de résistance électrique (ER) commerciaux avec différentes formes. [13]

2.4.3 Capteurs électrochimiques :

Les capteurs électrochimiques exploitent les caractéristiques électrochimiques intrinsèques de la corrosion et utilisent des techniques électrochimiques telles que la mesure du courant galvanique, la résistance de polarisation linéaire (LPR), la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) et le bruit électrochimique. Les avantages des capteurs électrochimiques incluent la quantification directe des taux de corrosion électrochimique et la possibilité d'étudier le mécanisme de corrosion avec une variété de techniques électrochimiques. La détection de la corrosion basée sur le LPR est la méthode la plus commercialisée parmi les capteurs électrochimiques en raison de son fonctionnement et de l'interprétation des données relativement simples.

Pour la plupart des sondes LPR commerciales (**Figure 2 4-a**), les électrodes (2 ou 3) sont souvent faites du même matériau au lieu de suivre strictement un système électrochimique classique à trois électrodes. L'inconvénient des capteurs électrochimiques est qu'un potentiel ou un courant imposé de l'extérieur peut entraîner une accélération de la vitesse de corrosion par rapport à la valeur réelle, de sorte que les réglages appropriés des paramètres électrochimiques (par exemple, le surpotentiel, la vitesse de balayage et les pentes de Tafel) et la conception du système d'électrodes doivent être choisis avec soin. En outre, les capteurs électrochimiques nécessitent généralement un électrolyte conducteur d'ions, par exemple des solutions aqueuses, et ils ne sont pas facilement adaptés aux environnements non conducteurs sans modifications spéciales.

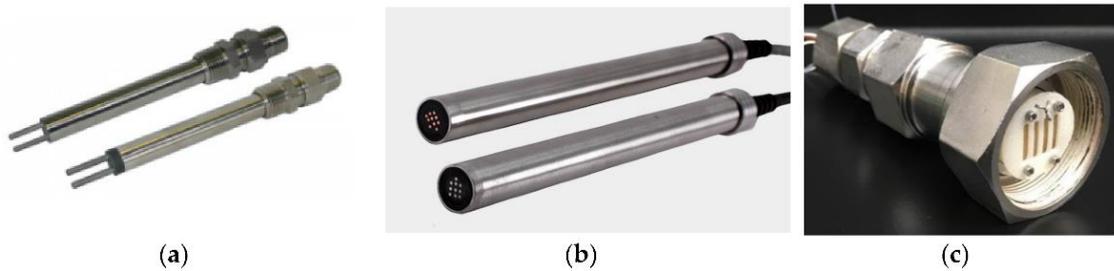


Figure 2 5: (a) Capteurs de corrosion commerciaux à résistance de polarisation linéaire (b) Capteurs de corrosion à réseau multi-électrodes couplés ; (c) Capteur électrochimique avancé. [13]

2.4.4 Capteur de contrôle par ultrasons :

La mesure de l'épaisseur de la paroi par ultrasons (UT) est l'une des méthodes non destructives les plus populaires pour surveiller la corrosion et la santé structurelle des tuyaux. Un transducteur piézoélectrique génère des ondes acoustiques haute fréquence (MHz) contrôlées par des impulsions électriques, et ces ondes ultrasonores sont émises perpendiculairement à la paroi du tuyau. Les ondes sont réfléchies par la surface externe, la surface interne et les irrégularités géométriques, et sont reçues par le transducteur. L'outil mesure l'intervalle de temps entre les arrivées des échos réfléchis par les surfaces internes et externes pour calculer l'épaisseur de la paroi.

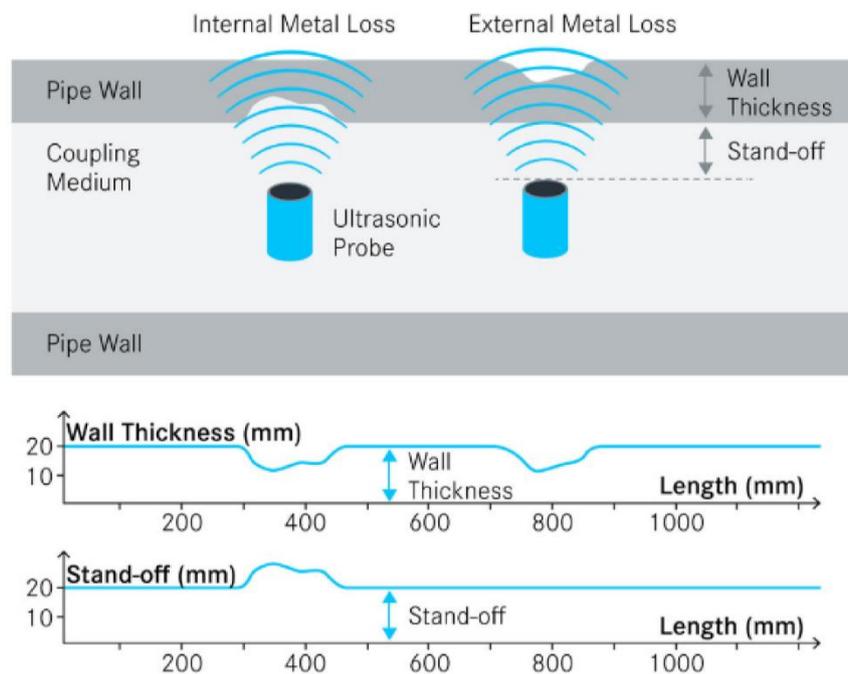


Figure 2 6: Schéma des mesures d'épaisseur de paroi par test par ultrasons (UT)

Comme le montre la figure II-4, les informations sur l'épaisseur de la paroi combinées au signal de distance peuvent différencier la perte de masse/le défaut interne et externe le long de la conduite.

Les capteurs de corrosion UT sont portables ou fixes et peuvent également être intégrés aux dispositifs d'inspection en ligne. La méthode UT permet de réaliser des inspections avec un seul côté accessible. La résolution géométrique est liée aux fréquences ultrasonores et n'est souvent pas assez sensible aux petites caractéristiques telles que la corrosion par piqûre ou les dépôts minces. Les capteurs acoustiques peuvent être affectés par des boues denses très atténuantes et des écailles de tubage. [13]

2.4.5 Méthode de fuite de flux magnétique :

La méthode de fuite de flux magnétique (MFL) est une technologie non destructive largement utilisée pour détecter les anomalies dans les pipelines. Le principe de détection est basé sur les propriétés magnétiques des aciers. Lorsque le matériau ferromagnétique est magnétisé à un niveau proche de la saturation sous l'effet d'un champ magnétique appliqué, les lignes de flux magnétique traversent principalement l'intérieur du matériau lorsqu'il n'y a pas de défaut, tandis que les sites de défaut ou de corrosion entraînent une courbure et une fuite des lignes de flux magnétique. Le champ magnétique est généralement généré par un électroaimant, et un capteur à effet Hall est utilisé pour détecter la fuite de flux magnétique (*Figure 2 6*). La méthode MFL est efficace pour l'inspection de grandes surfaces, mais elle est limitée pour la détection de la surface du matériau et des surfaces proches. Des améliorations sont nécessaires pour déterminer les formes des défauts et distinguer les défauts internes et externes.

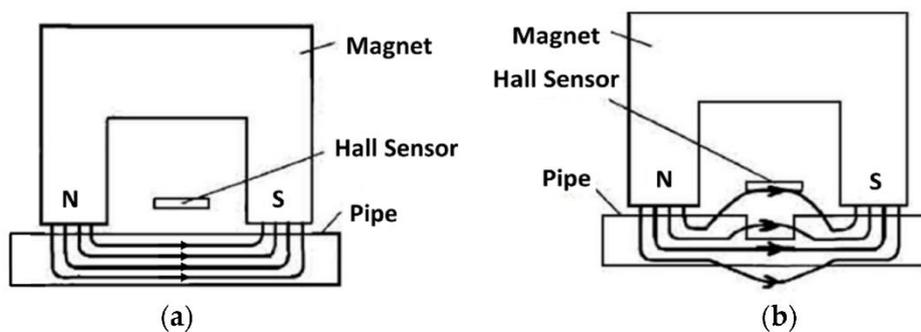


Figure 2 7: Principe de la fuite de flux magnétique. [13]

2.4.6 Capteurs électromagnétiques multifréquences :

La détection électromagnétique (EM) est une autre technique de contrôle non destructif de la corrosion couramment utilisée. Cette méthode est basée sur la loi d'induction de Faraday avec de nombreuses variations disponibles. Un exemple est le capteur d'inspection EM multifréquence pour détecter la corrosion et l'intégrité des pipelines.

Le capteur se compose d'une bobine d'émission et d'une bobine de réception. La bobine de l'émetteur est excitée par un courant alternatif, et le champ magnétique alternatif généré induit des courants de Foucault dans les tuyaux conducteurs environnants (**Figure 2 7-a**). Le champ électromagnétique primaire de l'émetteur combiné au champ secondaire des courants de Foucault dans les tuyaux induit une tension dans la bobine réceptrice séparée avec un déphasage par rapport au champ électromagnétique primaire. Le déphasage et la variation d'amplitude sont liés à la conductivité électrique du matériau, à sa perméabilité magnétique et à la présence de défauts (**Figure 2 7-b**). L'épaisseur du métal de la conduite peut être calculée à partir du balayage EM basse fréquence, et les balayages EM haute fréquence peuvent distinguer les caractéristiques de la paroi interne en raison de l'effet de peau (**Figure 2 7-c**).

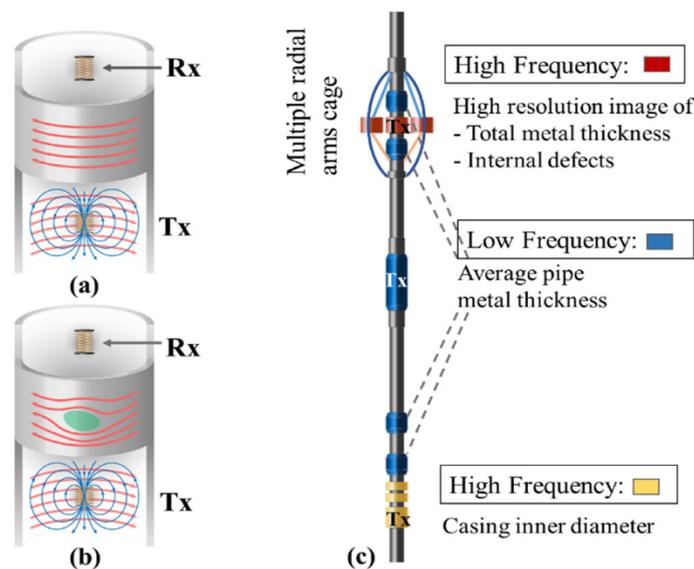


Figure 2 8: (a) Schéma des courants de Foucault induits dans un tube en acier (b) Schéma des courants de Foucault induits circulant autour d'un défaut (c) Schéma d'un outil électromagnétique multifréquence (EM). [13]

2.5 Capteur sans fils passif :

Les capteurs passifs sans fil constituent une autre technologie émergente pour la surveillance de l'état des structures. Ils ne nécessitent pas de source d'énergie active ou d'électronique active à l'emplacement de la détection et peuvent transférer de l'énergie et des signaux sans fil. L'élimination des batteries locales, de l'électronique active et du câblage électrique est essentielle pour améliorer la stabilité et la durabilité des capteurs dans les environnements difficiles et pour rendre les capteurs plus compatibles avec les pièces mobiles. La fonction sans fil rend également possible la surveillance dans des zones inaccessibles. En raison de leur petite taille et de leur faible coût, les capteurs passifs sans fil peuvent être déployés de manière omniprésente dans le système concerné.

Les capteurs passifs sans fil pour la corrosion et la gestion des déchets solides sont principalement basés sur les techniques d'identification passive par radiofréquence (RFID) et d'ondes acoustiques de surface (SAW). [14]

2.5.1 Capteurs passifs d'identification par radiofréquence RFID :

Les capteurs RFID passifs forment un large groupe de capteurs passifs sans fil pour la corrosion, en particulier les capteurs RFID sans puce, et ils présentent les avantages d'un faible coût, d'un poids léger, d'une petite taille et de la télédétection sans fil. La technologie RFID se compose généralement de trois éléments : une petite unité d'étiquetage (ou transpondeur), un lecteur (ou émetteur-récepteur) et des antennes. La figure II.8 montre un exemple de système de capteur à antenne RFID passive. Les étiquettes RFID passives reçoivent des signaux RF du lecteur et répondent par des signaux d'identité et de détection via les antennes. Contrairement aux étiquettes RFID à puce, les étiquettes RFID sans puce n'ont pas de puce de silicium embarquée sur le circuit. Il existe trois types de capteurs RFID sans puce : les capteurs RFID sans puce basés sur la réflectométrie dans le domaine temporel (TDR), la modulation de fréquence et les capteurs RFID sans puce à codage de phase. Les dispositifs SAW peuvent également être conçus comme des étiquettes RFID [14].

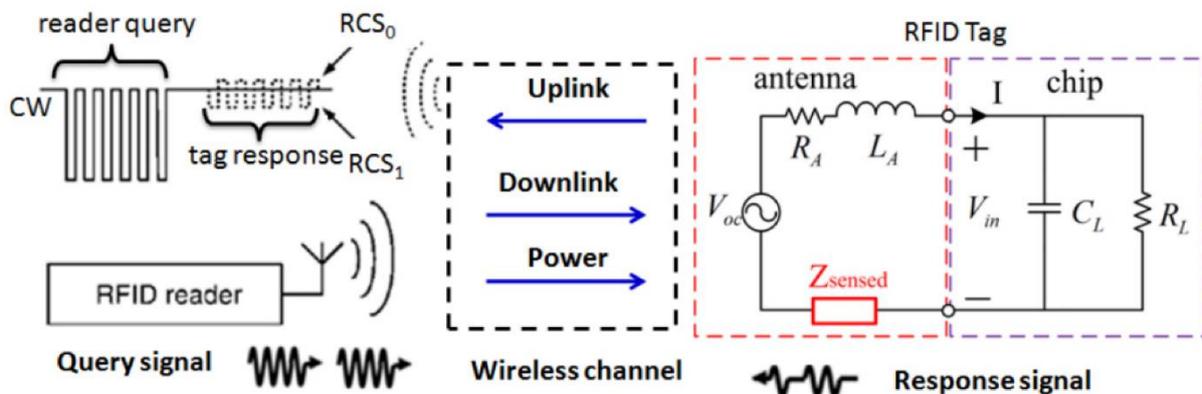


Figure 2 9: Schéma d'un système de capteur passif à antenne d'identification par radiofréquence comprenant une étiquette RFID, un lecteur et des antennes. [14]

2.5.2 Capteurs à ondes acoustiques de surface SAW :

Les capteurs SAW présentent un intérêt particulier en tant que capteurs passifs sans fil en raison de leur petite taille, de leur rentabilité, de leur facilité de fabrication, de leur compatibilité avec la télémétrie sans fil et de leur adaptabilité à de nombreuses applications. Les dispositifs SAW sont constitués de transducteurs interdigités (IDT) fabriqués sur un substrat piézoélectrique.

Chapitre 2 : Les capteurs de corrosion

Les IDT sont des électrodes métalliques périodiques (doigts) sous la forme de deux peignes se croisant à partir de côtés opposés, et ils peuvent convertir le signal RF en SAW sur des surfaces piézoélectriques et vice versa. Il existe des variantes d'ondes acoustiques de surface telles que les ondes de Rayleigh, de cisaillement horizontal (SH-SAW), de Love, de Stoneley, de Lamb et de Leaky qui peuvent être excitées sur des substrats piézoélectriques. Lorsque l'IDT émetteur est excité par un signal RF externe, des SAW sont lancées sur le substrat piézoélectrique et se propagent sur la surface du substrat et perpendiculairement à l'ouverture de l'IDT. Lorsque les SAW atteignent un deuxième IDT, les ondes peuvent être converties en signaux RF de sortie (**Figure 2 9-a**) ou certaines ondes sont réfléchies vers l'IDT émetteur pour des signaux RF de sortie. Alternativement, lorsque les SAW atteignent des réflecteurs à réseau, elles sont réfléchies vers l'IDT émetteur pour le traitement du signal RF (**Figure 2 9-b**). La détection basée sur les SAW est réalisée en mesurant les changements de vitesse de phase et/ou d'amplitude des ondes causés par des changements de propriété dans le chemin de propagation tels que la température, la masse, les changements électriques et mécaniques ; par conséquent, les capteurs SAW peuvent être utilisés pour surveiller de nombreux paramètres physiques (par exemple, la température, la pression et la déformation) ainsi que les espèces chimiques dans les phases gazeuses et aqueuses. Des examens détaillés des principes fondamentaux des mécanismes de détection et des applications peuvent être trouvés dans les références [15].

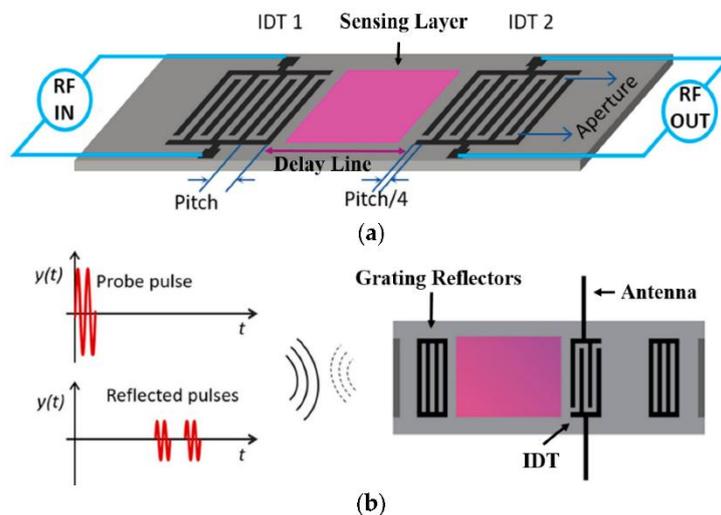


Figure 2 10: Schéma (a) d'un capteur à ondes acoustiques de surface (SAW) avec une couche de détection revêtue sur la ligne à retard et (b) d'un capteur SAW fonctionnalisé interrogé sans fil.

2.6 Conclusion :

Après avoir présenté les différents types de capteurs de corrosion classique,

Nous pouvons constater que leur champ d'application est limité par deux facteurs, autonomie énergétique et porté. Un des objectifs de ce mémoire est d'élaborer un capteur de corrosion passif et sans contact inspiré de la technologie RFID.

Dans le prochain chapitre, nous allons exprimer les antennes patch et leurs caractéristiques. Ainsi la technologie RFID.

Chapitre 3 : Antennes microstrip et technologie RFID

3.1 Introduction :

Parmi tous les types d'antennes, l'antenne patch est l'une des plus importante dans le domaine des télécommunications, en raison du rôle de la structure micro-ruban dans les réseaux ; elle permet la réalisation de fonctions particuliers et améliore considérablement ses performances. La technologie actuelle qui vise de plus en plus la miniaturisation des composants a permis de mettre en évidence l'importance des antennes imprimées et leur utilité dans la radiocommunication [15].

Dans ce chapitre nous allons exprimer la structure simplifiée des antennes imprimées (antennes patch), leurs caractéristiques, en suite on se penche sur les différents types d'alimentation et leurs domaines d'application ainsi la nouvelle technologie RFID.

3.2 Antenne microstrip 'patch' :

3.2.1 Description d'une antenne patch :

Une plaque métallique 'élément rayonnant' imprimée sur la face supérieure d'un substrat diélectrique. Le plan de masse est généralement une plaque métallisée couvre la surface inférieure du substrat. (*Figure 3 1*) [16]

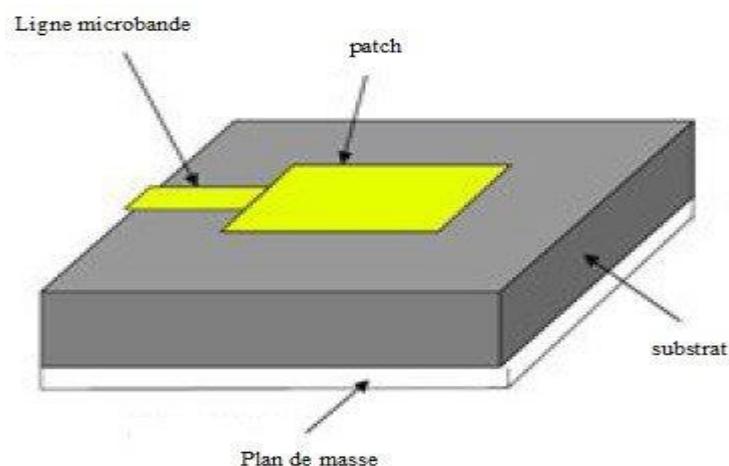


Figure 3 1: présentation d'une antenne imprimée [16]

L'élément rayonnant peut être rectangle, carré, disque circulaire, pentagone, anneau ou encore un triangle (*Figure 3 2*). Le rectangle représente la forme la plus courante d'élément rayonnant car il est le plus facile pour comprendre les mécanismes du rayonnement d'antenne patch. Ce dernier est facile à intégrer et largement utilisée. [17]

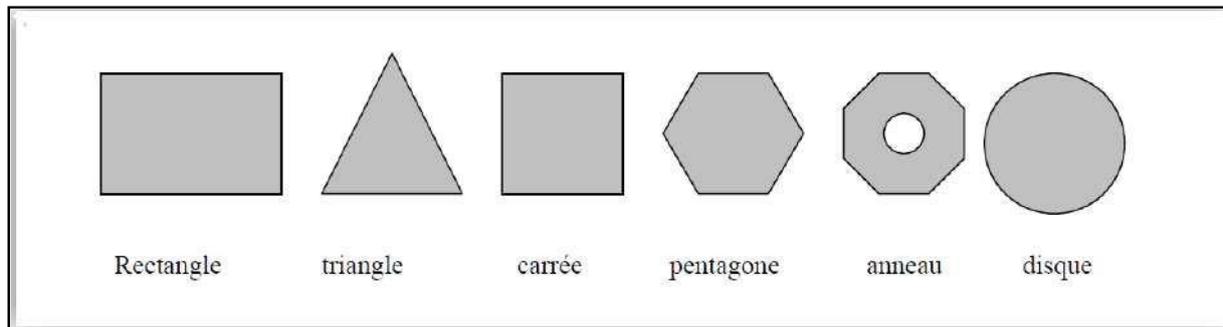


Figure 3 2: différentes formes d'élément rayonnant. [17]

3.2.2 Les avantages et les inconvénients des antennes microstrip :

Les antennes microstrip ont beaucoup d'avantages:

- Faible coût et facile à fabriquer.
- Faible poids, masse, épaisseur et volume.
- Simple, robuste et plus petit, adapté aux surfaces planes et non planes.
- Possibilité d'intégration dans des appareils électroniques portables.
- Possibilité de transmettre sur deux ou trois fréquences. [18] [19]

Cependant, ces antennes présentent des limites, à savoir :

- Faible efficacité, puissance d'émission (<100W) et faible gain (6 dB).
- Facteur de qualité Q trop élevé (50 à 75)
- Bande passante étroite.
- Pureté de polarisation faible.
- Les pertes du rayonnement dues aux ondes de surface dans les substrats diélectriques. [20] [21]

3.2.3 Rayonnement de l'antenne patch :

Le rayonnement d'une antenne imprimée est basé sur sa géométrie, lorsqu'une ligne électrique est excitée par une source radiofréquence, l'onde électromagnétique se propage sur la ligne vers l'élément rayonnant. La répartition des charges représentée sur la *Figure 3 3* s'accumule entre le plan de masse et le substrat et va créer donc un champ électrique vertical comme représenté sur la *Figure 3 4*. [22]

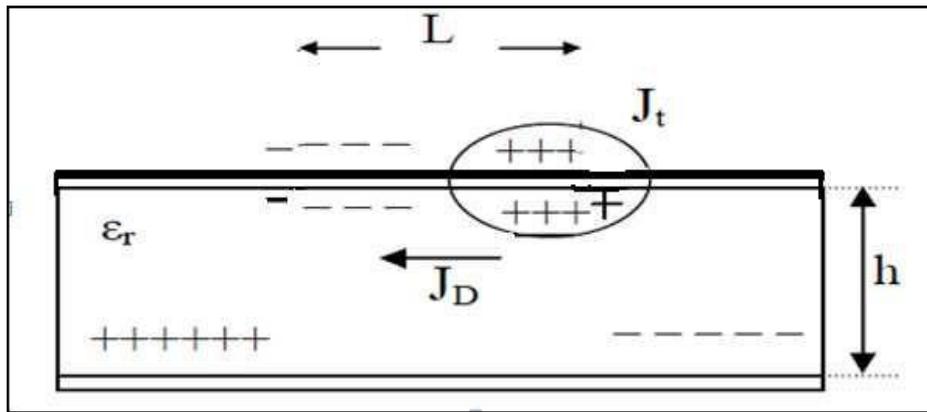


Figure 3 3: distribution de charge. [22]

(J_D : courant de déplacement ; J_t : Courant de surface.)

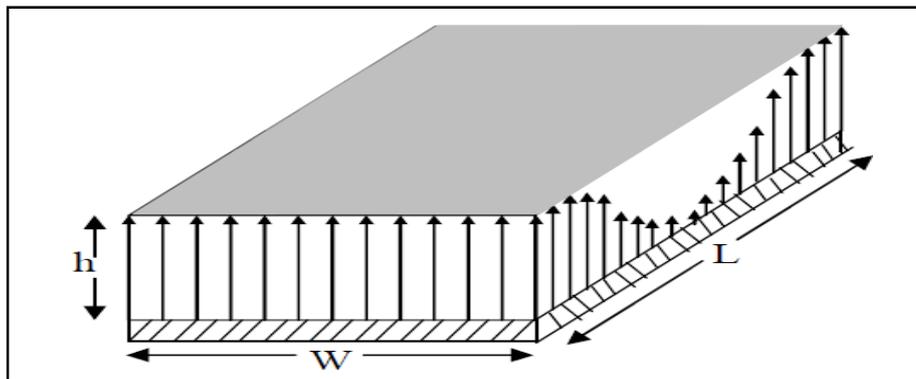


Figure 3 4: distribution du champ électrique vertical. [22]

3.2.4 Bande passante de l'antenne patch :

On définit la bande passante d'une antenne microstrip comme la gamme de fréquence dont le patch est adapté à sa ligne d'alimentation, elle est relativement faible. La bande passante peut être étendue en augmentant l'épaisseur du substrat. Elle est donnée par la relation :

$$BP (\%) = [(fr2 - fr1)/fr] \cdot 100 \quad (2.1) \text{ Avec :}$$

fr : la fréquence à la résonance, $fr1$ et $fr2$: les deux fréquences minimale et maximale.

Il y a d'autres paramètres qui sont considérés pour la caractérisation des antennes imprimées comme le coefficient de réflexion (S_{11}), la directivité, le gain, l'impédance d'entrée et le rendement [23].

3.2.5 Les techniques d'alimentation d'antennes patch :

Lors de l'étude d'antenne micro-ruban, il est très important de prendre en considération la technique d'excitation.

Il y a deux catégories de méthodes d'alimentation des antennes patch :

- L'alimentation par contact (via sonde ou ligne micro-ruban).
- L'alimentation par proximité (couplage électromagnétique via ligne ou fente).

▪ Alimentation par ligne micro-ruban :

-Dans ce type d'alimentation, le principe est que la ligne micro-ruban se connecte directement au patch comme montré sur la **Figure 3 5**. La ligne micro-ruban est moins large par rapport au patch. Ce type d'alimentation a l'inconvénient des parasites, par contre l'avantage de cette alimentation est que la ligne micro-ruban peut être graver sur la même face du substrat, simple à réaliser et facile pour adapter l'impédance. [24]

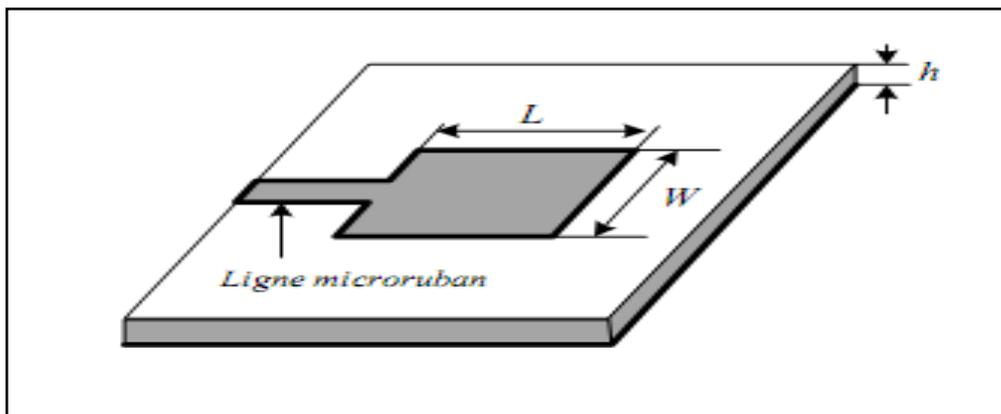


Figure 3 5: alimentation par ligne micro-ruban [24]

▪ Alimentation coaxiale :

Cette technique est très utilisée, le patch est relié au conducteur interne du connecteur coaxial par l'intermédiaire d'un diélectrique. Le conducteur externe est soudé directement au plan de masse comme montré sur la **Figure 3 6**. L'alimentation de sonde (coaxiale) peut être employée à n'importe quelle surface choisie sur le patch. Par contre cette technique présente des inconvénients qui apparaissent sur le diagramme de rayonnement. [25]

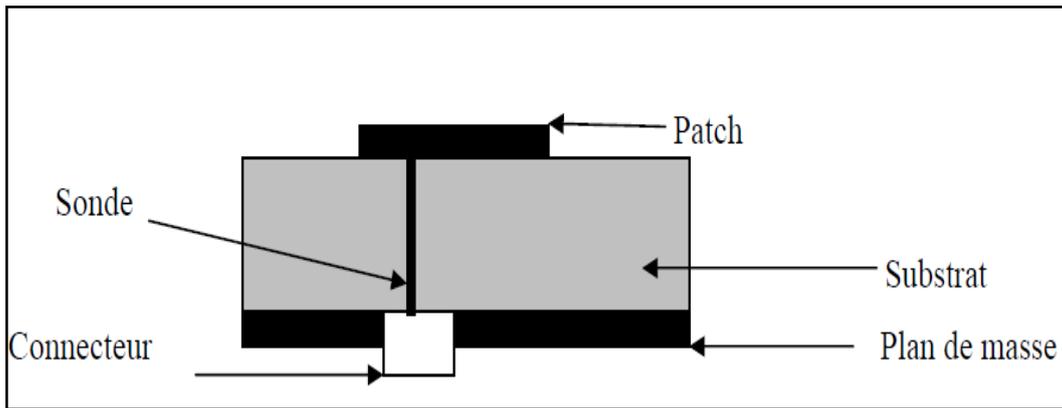


Figure 3 6: alimentation coaxiale. [25]

▪ **Alimentation couplée par proximité :**

Dans cette technique, la ligne d'alimentation est entre les deux substrats utilisés et le patch se trouve sur le substrat supérieur comme montré sur la *Figure 3 7*. L'un des avantages de l'alimentation couplée par proximité est l'élargissement de la bande passante grâce à l'augmentation de l'épaisseur de l'antenne ainsi que l'élimination des parasites. En revanche, elle présente l'inconvénient de complexités de fabrication dues aux deux substrats qui nécessitent un alignement précis. [26] [27]

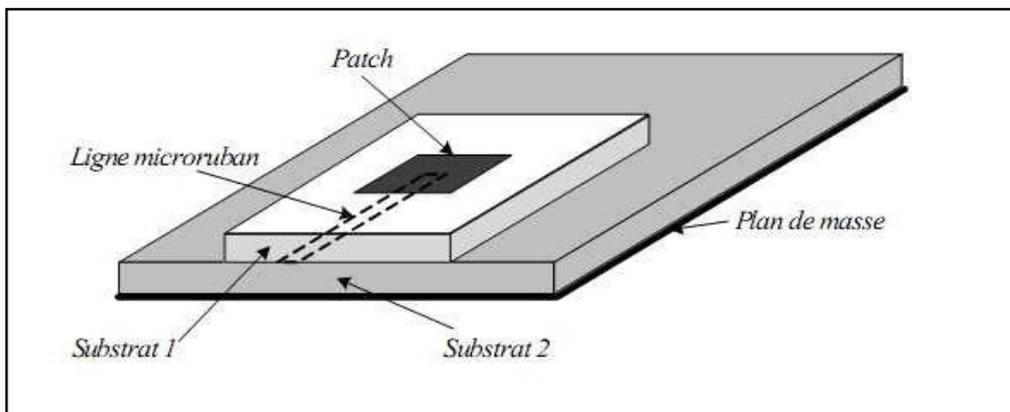


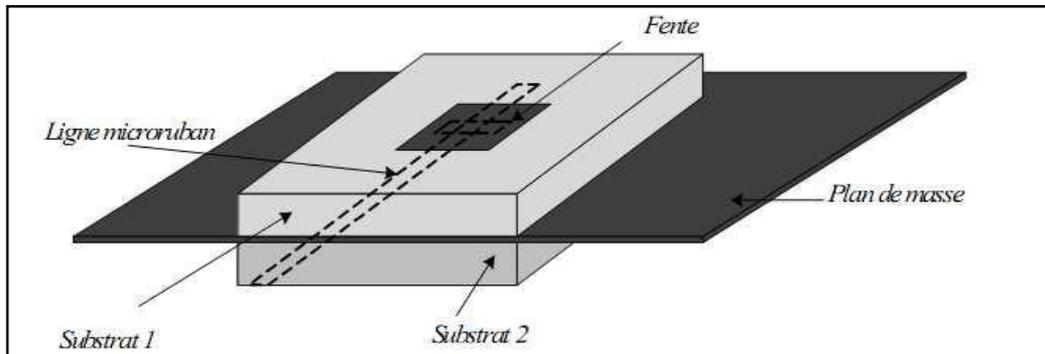
Figure 3 7: alimentation couplée par proximité. [27] [28]

▪ **Alimentation couplée par ouverture :**

Une autre méthode d'alimentation des antennes micro-ruban est l'alimentation par ouverture. Dans cette technique, le circuit d'alimentation (ligne de transmission) est protégé de l'antenne par un plan conducteur avec un trou (ouverture) pour transmettre l'énergie à l'antenne, comme le montre la *Figure 3 8*.

Le substrat supérieur peut être fabriqué avec une permittivité plus faible pour produire des champs marginaux peu contraignants, ce qui donne un meilleur rayonnement.

Le substrat inférieur peut être fabriqué indépendamment avec une valeur élevée de permittivité pour des champs à couplage serré qui ne produisent pas de rayonnement parasite.



L'inconvénient de cette méthode est la difficulté accrue de fabrication. [29]

Figure 3 8: alimentation couplée par ouverture. [29]

3.2.6 Applications :

En raison de la multiplicité des exigences dans le domaine des télécommunications, il est devenu nécessaire d'utiliser l'antenne patch dans la plupart des applications. Parmi ces applications :

- La commande et contrôle.
- Les antennes d'émission à usage médicale.
- La télémétrie de missile.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes. [30]

3.3 Technologie RFID :

3.3.1 Définition :

L'identification par radiofréquence (RFID) est une technologie sans fil capable d'identifier automatiquement et sans ambiguïté, sans visibilité directe, en extrayant un identifiant unique des étiquettes microélectroniques fixées aux objets.

La RFID est une technologie qui utilise des ondes radio pour transférer des données d'une étiquette électronique, appelée étiquette RFID, fixée à un objet, à travers un lecteur dans le but d'identifier et de suivre l'objet (*Figure 3 9*). La RFID est déjà utilisée pour suivre et retrouver les victimes d'une catastrophe.

Les données peuvent être collectées en temps réel et être immédiatement disponibles pour le personnel d'urgence, ce qui permet de gagner du temps grâce à la RFID.

Les équipes de gestion de crise, les hôpitaux et le personnel d'urgence ont accès aux données par le biais d'une base de données informatique. [31]

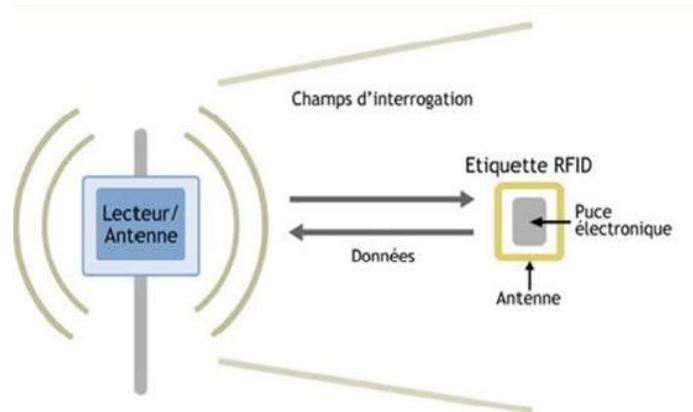


Figure 3 9: Schéma illustrant un système RFID. [31]

3.3.2 Principe de fonctionnement :

La plupart des systèmes RFID se composent d'étiquettes qui sont fixées aux objets à identifier. Chaque étiquette possède sa propre mémoire interne "en lecture seule" ou "en réécriture", selon le type et l'application. La configuration typique de cette mémoire est le stockage d'informations sur le produit, telles que la date de fabrication de l'identifiant unique de l'objet, etc.

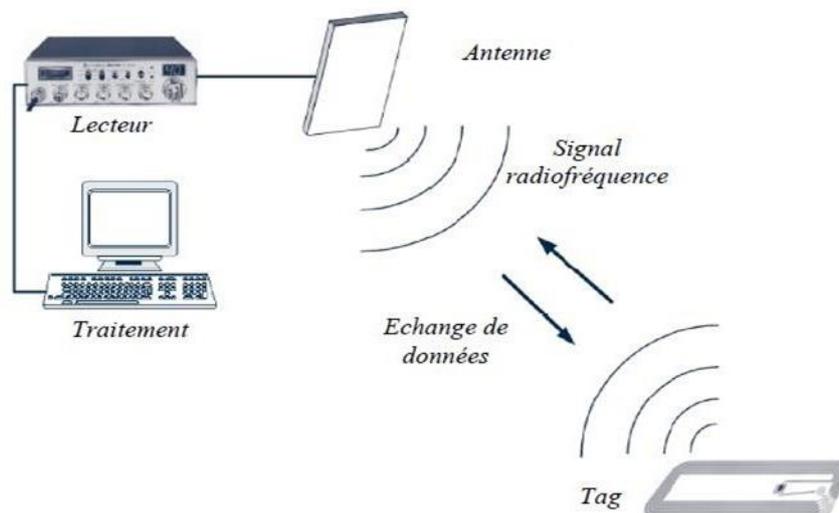


Figure 3 10: Principe de fonctionnement de la RFID. [31]

Le lecteur RFID génère des champs magnétiques qui permettent au système RFID de localiser les objets (via les étiquettes) qui se trouvent dans sa portée. L'énergie électromagnétique haute fréquence et le signal d'interrogation générés par le lecteur déclenchent la réponse des étiquettes à l'interrogation ; la fréquence d'interrogation peut atteindre 50 fois par seconde.

La communication entre les principaux composants du système, c'est-à-dire les étiquettes et le lecteur, est ainsi établie. De grandes quantités de données sont ainsi générées. Les industries de la chaîne d'approvisionnement contrôlent ce problème en utilisant des filtres qui sont acheminés vers les systèmes d'information dorsaux. En d'autres termes, pour contrôler ce problème, on utilise un logiciel tel que Savant. Ce logiciel fait office de tampon entre l'informatique et le lecteur RFID. [31]

3.3.3 Composition d'un système RFID :

(RFID) désigne un système sans fil composé de deux éléments : les étiquettes et les lecteurs. [32]

- **Les lecteurs RFID :**

Le lecteur est un dispositif doté d'une ou plusieurs antennes qui émettent des ondes radio et reçoivent des signaux en retour de l'étiquette RFID. Les étiquettes, qui utilisent des ondes radio pour communiquer leur identité et d'autres informations à des lecteurs proches, peuvent être passives ou actives. Les étiquettes RFID passives sont alimentées par le lecteur et ne possèdent pas de batterie. Les étiquettes RFID actives sont alimentées par des piles. [32]

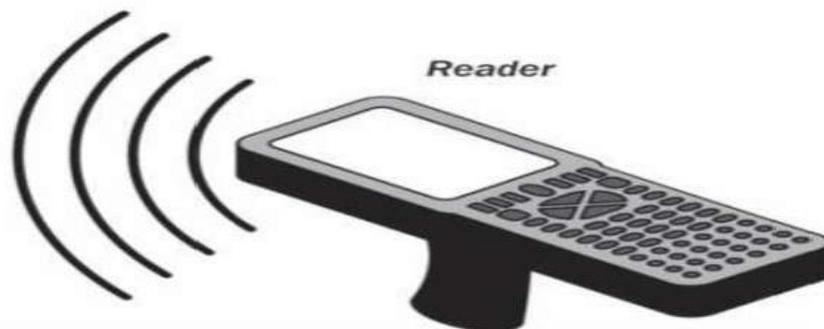


Figure 3 11: Lecteur RFID. [32]

- **Tag RFID :**

Les étiquettes RFID peuvent stocker une gamme d'informations allant d'un numéro de série à plusieurs pages de données. Les lecteurs peuvent être mobiles afin d'être portés à la main, ou bien ils peuvent être fixés sur un poteau ou en hauteur. Les systèmes de lecture peuvent également être intégrés à l'architecture d'une armoire, d'une pièce ou d'un bâtiment. [32]

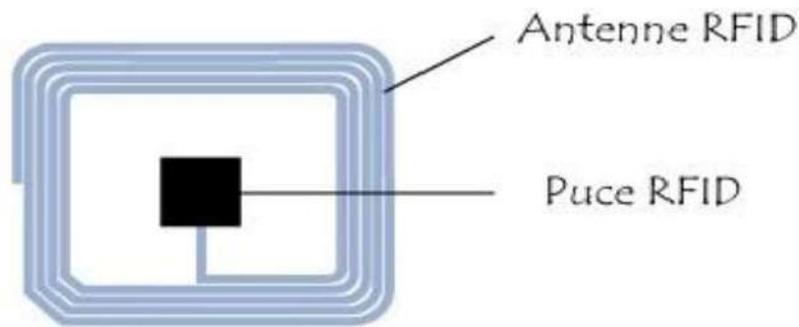


Figure 3 12: Tag RFID. [32]

3.3.4 Applications et utilisations :

La technologie RFID a de nombreuses d'applications :

- Les systèmes de contrôle d'accès, tels que l'entrée sans clé et le dispositif d'identification des employés.
- Les applications de suivi des caisses et des palettes de la chaîne d'approvisionnement.
- applications de point de vente.
- Les systèmes de péage automatique, tels que ceux que l'on trouve de plus en plus souvent à l'entrée des ponts, des tunnels et des autoroutes.
- Les dispositifs de suivi des animaux, qui sont utilisés depuis longtemps dans les systèmes de gestion du bétail et sont de plus en plus utilisés pour les animaux de compagnie.
- Les dispositifs de localisation et d'immobilisation des véhicules.
- Les bracelets de poignet et de cheville pour l'identification et la sécurité des enfants. [33]



Figure 3 13: Exemples d'utilisations de la RFID [33]

3.4 Conclusion :

Après avoir décrit et présenté l'antenne patch où nous avons présenté ses caractéristiques, son alimentation, ses applications et la technologie RFID.

Dans le prochain chapitre, nous allons modéliser et simuler les composants en utilisant le logiciel d'Ansoft HFSS ; ensuite, nous allons présenter les étapes de la réalisation de ces composants.

Chapitre 4 : Modélisation numérique et réalisation

4.1 Introduction :

Notre projet se base sur la conception et la réalisation d'un capteur optique et des antennes patch imprimées. Dans ce chapitre, on va présenter les différentes étapes effectuées pour modéliser les composants et les simuler en utilisant le logiciel d'Ansoft HFSS pour voir leurs comportements électromagnétiques et assurer la transmission. Ensuite, on va présenter les étapes de la réalisation de ces composants en détails.

La réalisation est effectuée au sein du laboratoire des circuits imprimés à l'École Nationale Polytechnique d'Oran, Maurice Audin (ENPO) et les mesures sont effectués au Laboratoire de Télécommunications et Traitement Numérique du Signal (LTTNS) de l'université de Sidi Bel Abbès.

Les résultats de simulations et de mesure seront présentés pour faire une comparaison et prouver le bon fonctionnement de démonstrateur qui va être bien présenté à la fin du chapitre.

4.2 Partie simulation :

4.2.1 Modélisation numérique :

La modélisation numérique a été effectuée à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique d'Ansoft HFSS (**High Frequency Structure Simulation**) (voir sa représentation détaillée dans l'**Annexe A**).

Il s'agit d'un outil de simulation électromagnétique qui est dédié à la simulation haute fréquence des composants micro-ondes. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D.

Son principe de calcul est fondé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle). C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Il fournit les champs électriques E et magnétiques H , les courants, les fréquences de résonance et les paramètres S qui seront présentés dans l'**Annexe B**. C'est un outil de conception d'ingénierie où les utilisateurs n'ont qu'à concevoir la géométrie, les propriétés des matériaux et les paramètres de sortie désirés.

4.2.2 Présentation de la structure étudiée :

Le capteur est structuré par une ligne micro-ruban dont la fréquence de résonance est autour de 1.3 GHz.

Le capteur étudié est représenté sur la **Figure 4 1** ; et l'antenne est présentée sur la **Figure 4 2**

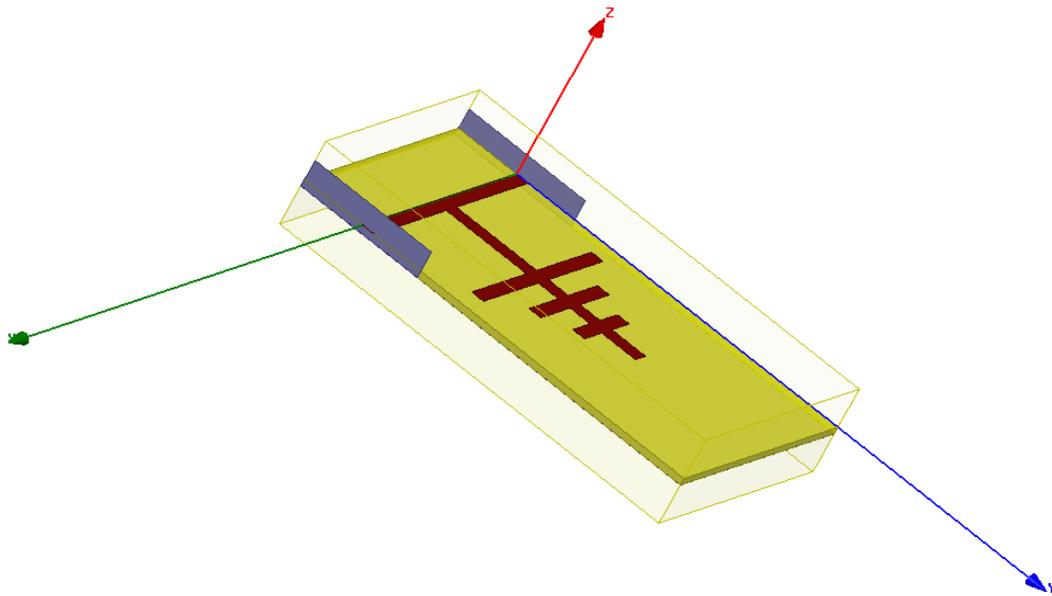


Figure 4 1: Modélisation de la structure en 3D à l'aide le simulateur Ansoft HFSS

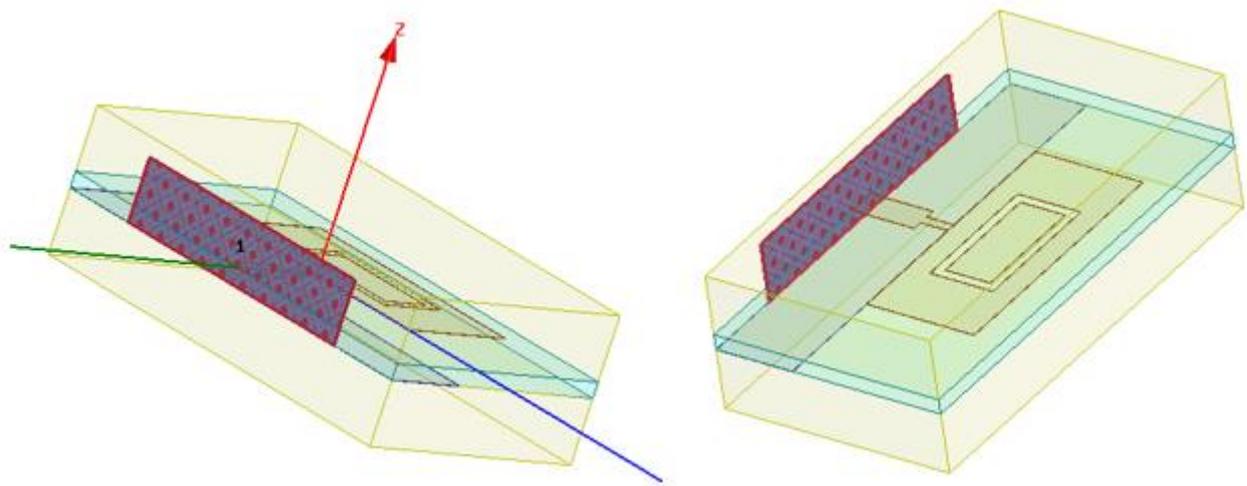


Figure 4 2: Modélisation de l'antenne en 3D à l'aide le simulateur Ansoft HFSS

Cahier de charge et spécification :

La conception des lignes microruban nécessite tout d'abord la définition des propriétés du capteur (les performances souhaitées), ainsi que les propriétés des matériaux constituant le capteur en fonction de l'application envisagée.

Le plan conducteur :

Le plan conducteur est en cuivre, les propriétés magnétiques typiques de cuivre sont listées dans le *Tableau 4 1*.

$\epsilon_r=1$	La permittivité relative
$\mu_r=0.999991$	Perméabilité relative
$\sigma = 58000000$ simens/m	Conductivité

Tableau 4 1: Paramètres physique du matériau magnétique le cuivre.

Pour commencer la simulation, il faut exciter la structure.

Nous avons utilisé des Wave-Ports qui est un port d'ondes qui indique l'énergie entre et sort du conducteur comme mentionné sur la figure 4.3 de dimensions :

La largeur $D=10*W = 29$ mm, Et de hauteur $H=4*h = 6.4$ mm.

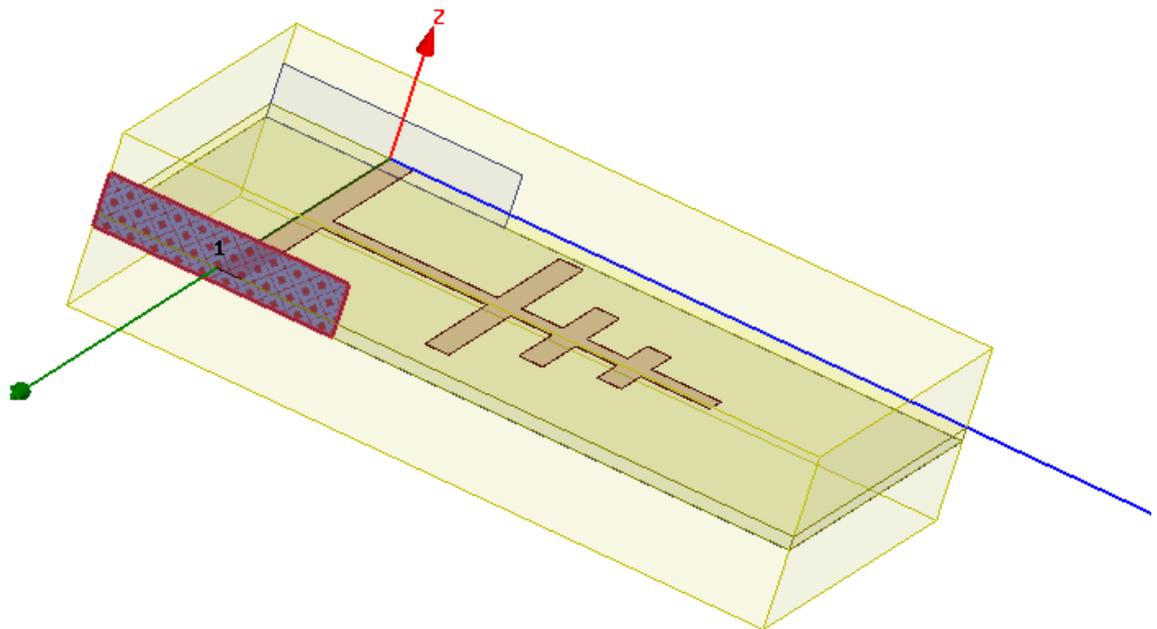


Figure 4 3: Wave-port : Configuration du signal électrique.

Le signal n'est pas entièrement enfermé dans le conducteur et s'étend dans l'air au-dessus du conducteur.

Le capteur est simulé entouré par une boîte d'air à distance suffisante de la ligne de hauteur $h1=9.6$ mm pour l'air supérieur et de hauteur $h2= 11.204$ mm pour l'air inférieure.

En addition, la configuration électromagnétique montre la distribution des champs électriques et magnétiques du capteur (le phénomène de l'emplacement de champ).

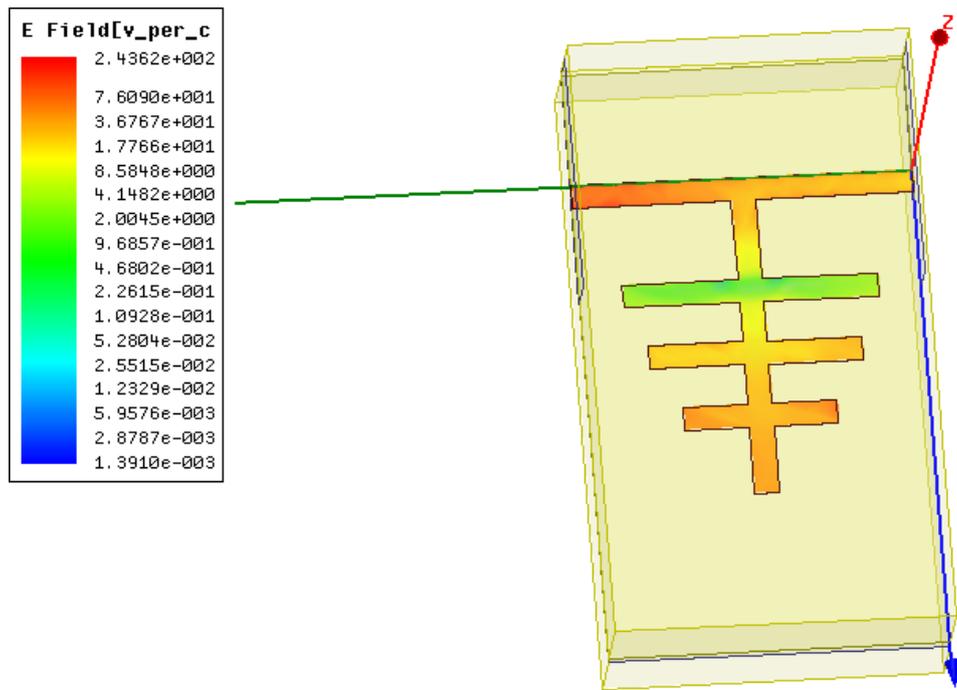


Figure 4 4: signal transmis du port 1 au port 2.

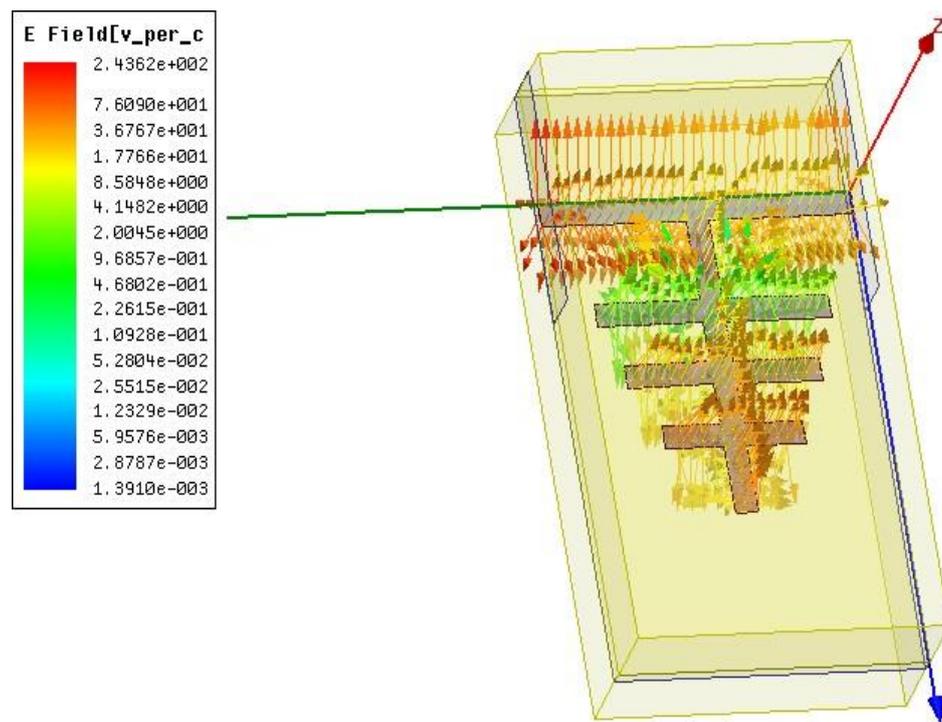


Figure 4 5: Lignes de champ électrique.

4.2.3 Dimensionnement géométrique des structures proposées :

- Les dimensions de l'antenne :

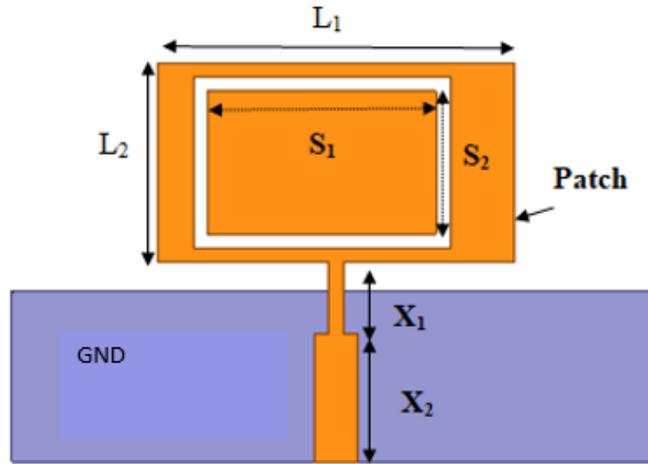


Figure 4 6: Dimensions de l'antenne patch rectangulaire.

Les dimensions de l'antenne patch rectangulaire sont : $w = 2.9$ mm, $L_1 = 23$ mm, $L_2 = 12$ mm, $S_1 = 14$ mm, $S_2 = 10$ mm, $X_1 = 5$ mm and $X_2 = 7$ mm.

- Les dimensions du capteur :

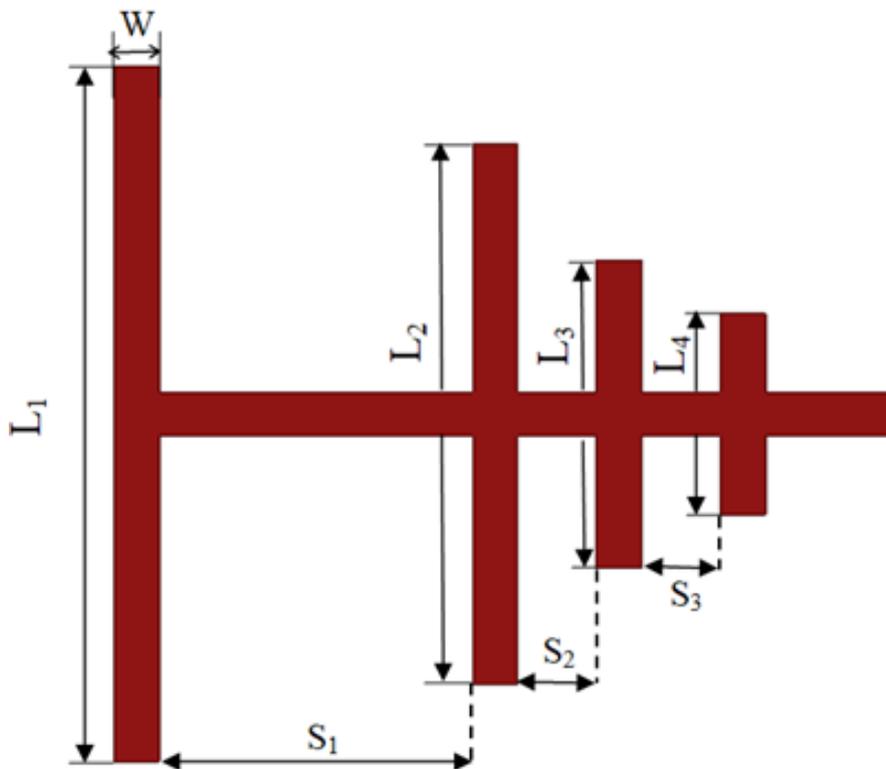


Figure 4 7: Schéma de la structure en 2D.

Le conducteur principal du capteur est composé d'une ligne principale pour la transmission hyperfréquence et des barres pour la détection de corrosion.

Chapitre 4 : Modélisation numérique et réalisation

Les dimensions géométriques de la structure présentée ci-haut sont résumées dans le tableau suivant :

Dimensions	Valeurs
Largeur du conducteur de la ligne d'accès et des barres «W »	2.9 mm
La longueur de la ligne principale « L ₁ »	4.5 cm
La longueur de la première barre «L ₂ »	3.5 cm
La longueur de la deuxième barre «L ₃ »	2 cm
La longueur de la troisième barre «L ₄ »	1.3 cm
La distance entre la ligne principale et la 1 ^{ère} barre « S ₁ »	2 cm
La distance entre la 1 ^{ère} barre et la 2 ^{ème} barre S ₂	0.5 cm
La distance entre la 2 ^{ème} et la 3 ^{ème} barre S ₃	0.5 cm
L'épaisseur du conducteur	35 µm

Tableau 4 2: les paramètres géométriques de la structure.

Notons que ces valeurs sont bien choisies après une réalisation d'une série de simulations sous HFSS.

Le diélectrique ou l'isolant :

Nous avons choisi le FR4-differ comme substrat pour notre structure, qui a aussi des paramètres physiques présentés dans le tableau suivant :

$\epsilon_r=4.7$	La permittivité relative
$\mu_r=1$	Perméabilité relative
$\tan\delta=0.0197$	La tangente de perte diélectrique
$\sigma=0$ simens/m	Conductivité

Tableau 4 3: les paramètres physiques de la structure

L'épaisseur de substrat est $h = 1.6$ mm.

Le plan de masse :

Le plan de masse de notre structure est de cuivre donc il a les mêmes paramètres physiques que le conducteur, il est d'une épaisseur de $35 \mu m$ et il a la même forme que le substrat.

4.2.4 Résultat de la modélisation numérique :

A. capteur

Le capteur fonctionne en transmettant le signal du port 1 au port 2 et la simulation en trois dimensions donne les paramètres S en fonction de la fréquence, présentés sur la **Figure 4 8**.

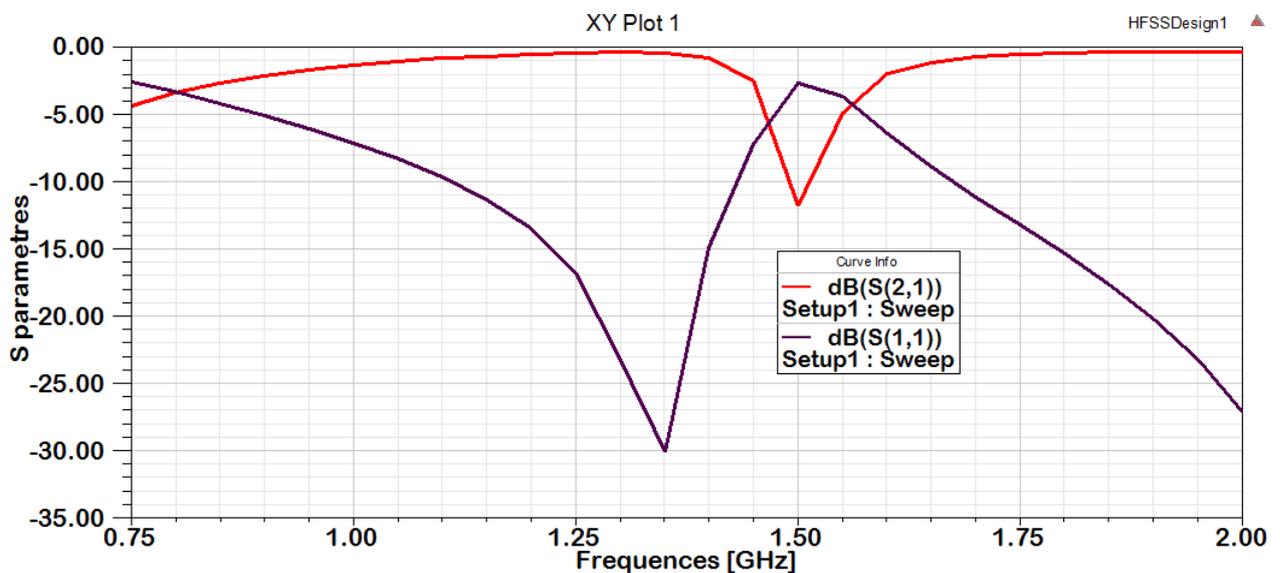


Figure 4 8: Les paramètres S en fonction de la fréquence.

Les paramètres S montrent le bon fonctionnement de ce capteur à la fréquence de 1.3 GHz, Les résultats de modélisation numérique obtenus montre que $S_{21} = -0.5 \text{ dB}$ donné par la courbe rouge prouve qu'il y a une transmission du port 1 vers le port 2, $S_{11} = -30 \text{ dB}$ qui est donné par la courbe violette, montre que la réflexion dans le port 1 est faible. Ce qui montre que notre capteur a un bon fonctionnement.

B. antenne

Le résultat consiste à savoir si les antennes fonctionnent dans la fréquence souhaitée.

La figure ci-dessous montre que nos antennes fonctionnent à la fréquence 1.35 GHz.

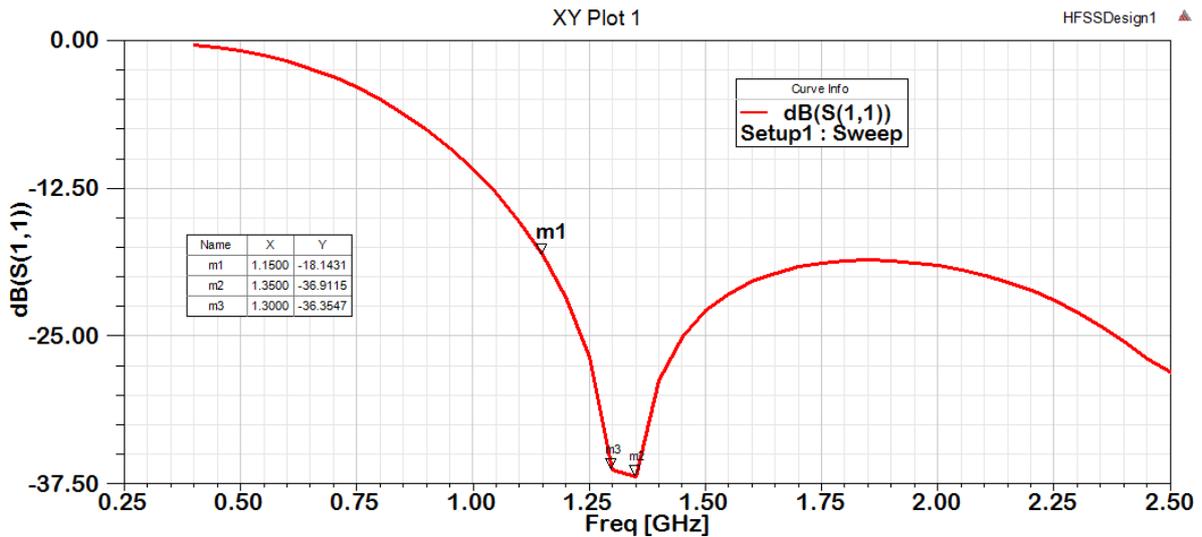


Figure 4 9: Simulation HFSS du fonctionnement de l'antenne imprimée.

4.3 Partie réalisation :

4.3.1 Matériels utilisés :

Afin de réaliser ce travail, on est besoin de matériels et d'outils que nous allons présenter comme suit :

- **Les feuilles transparentes**

On est besoin des feuilles transparentes disponibles dans le marché pour imprimer le circuit du capteur sur ces feuilles.

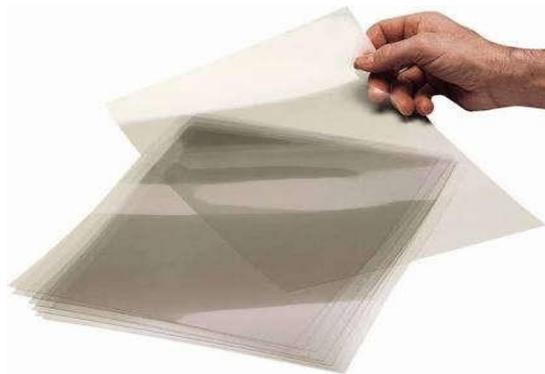


Figure 4 10: Des feuilles transparentes.

- **Plaque de circuit imprimé pré sensibilisée**

Une plaque de circuit imprimé pré sensibilisé est une plaque de circuit imprimé standard (en bakélite ou en époxy) qui a été recouverte d'une couche de produit chimique sensible aux UV (ultraviolets). Pour ne pas être exposé aux rayonnements UV naturels du soleil, ce type de plaque est livré avec un film protecteur anti-UV, qu'il convient de retirer au dernier moment.

Il existe différentes qualités de plaque de circuit imprimé, et différentes épaisseurs de cuivre. Un circuit imprimé utilisé en haute fréquence, dans la gamme des GHz par exemple, devra être de très bonne qualité diélectrique (un circuit de type FR4).

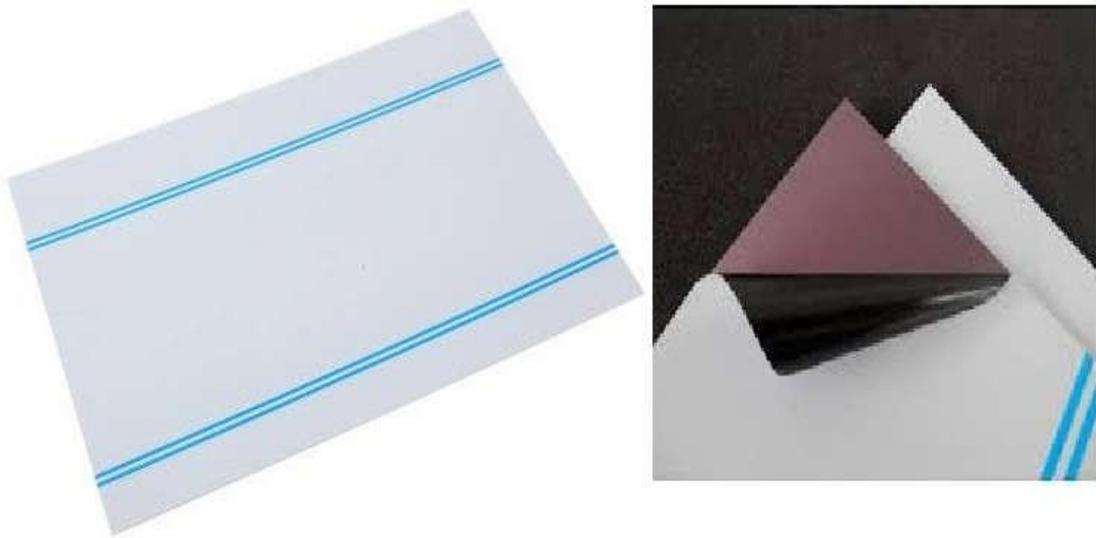


Figure 4 11: Une plaque de circuit imprimé époxy FR4.

- **Insoleuse**

Une insoleuse est un appareil fort simple, doté de très peu de composants, que l'on peut parfaitement fabriquer soi-même si l'on est un minimum soigneux. Ce type d'appareil est doté de 1 à 4 tubes rayonnant des UV, et est destiné à insoler des plaques de circuit imprimé pré sensibilisées (sous-entendu sensible aux UV). Il est aussi possible d'utiliser une ampoule spéciale, mais les temps d'insolation sont bien plus longs et la régularité de l'insolation n'est pas excellente, surtout pour les grands circuits.



Figure 4 12: Une insoleuse.

- **Découpeur des circuits imprimé**

Les plaques de circuit imprimé sont vendues dans un format standard, généralement :

- 100*160
- 200*300
- 300*600

Donc il faut souvent les redécouper pour les mettre à la dimension de la carte qu'on veut réaliser.



Figure 4 13: Le découpeur des circuits imprimés.

- **Les gans**

On utilise des gants de protection destinés à être portés aux mains afin de prévenir les risques chimiques.



Figure 4 14: des gants de protection.

- **Le Révélateur**

Le révélateur est un produit chimique disponible sous forme des sachets de poudre à diluer dans un volume d'eau du robinet. Le révélateur doit être mis dans une bassine en plastique (PVC) ou en verre, le temps de révéler le circuit imprimé, puis devra être remis dans son récipient de stockage juste après usage. La température optimale d'utilisation de ce produit est généralement de 20 à 24°C. Le temps de révélation peut varier de quelques secondes à quelques dizaines de seconde, mais cela reste rapide dans tous les cas, et est parfaitement visible. Pendant que vous remuez (délicatement) la bassine, vous voyez apparaître petit à petit le cuivre nu (couleur rose) aux endroits exposés aux UV, c'est à dire aux endroits qui ne devront pas subsister à l'étape de gravure finale.



Figure 4 15: Le révélateur.

- **Le perchlorure de fer**

On trouve le perchlorure de fer sous forme liquide ou en granules. L'utilisation du perchlorure de fer peut se résumer à le mettre dans une bassine en plastique (PVC) ou en verre, le temps de réaliser la gravure. On plonge la plaque de circuit imprimé dans la bassine, et on bouge légèrement la bassine afin de faire au produit de légères vagues au-dessus de la plaque, afin d'éviter les dépôts et surtout pour accélérer le processus de gravure. Ce procédé est simple mais un peu long (20 à 30 minutes), Surveillez bien l'évolution de la gravure, et retirez la plaque du perchlorure dès que le cuivre qui devait être dissout l'est entièrement. Dès que la plaque est retirée du perchlorure de fer, la rincer abondamment à l'eau.



Figure 4 16: Le perchlorure de fer.

- **Les connecteurs SMA**

Un connecteur SMA (SubMiniature version A) est un type de connecteur coaxial développé dans les années 1960, l'impédance caractéristique est proche de 50 Ohms.



Figure 4 17: Les connecteurs SMA.

- **L'analyseur de réseau**

Un analyseur de réseau est un instrument de mesure qui permet de déterminer les paramètres S d'un circuit électrique. Les analyseurs de réseau les plus perfectionnés mesurent également d'autres paramètres, tels que les paramètres Y, Z et H.

Cet instrument est généralement utilisé pour caractériser les quadripôles (tels que les amplificateurs ou filtres), mais peut être utilisés sur d'autres réseaux (avec notamment un plus grand nombre de pôles).

On utilise généralement un analyseur de réseau dans le domaine des radiofréquences afin de caractériser les filtres, les câbles et les antennes. L'analyseur de réseau permet de tracer le nomogramme de Smith (ou abaque de Smith) du réseau étudié.



Figure 4 18: Un analyseur de réseau.

4.3.2 Les étapes de la réalisation :

- **Etape 1 : création d'un typon**

On dessine notre composant dans le logiciel de simulation HFSS, ensuite on utilise le logiciel AUTOCAD afin d'imprimer le modèle sur un papier transparent.

- **Etape 2 : découpage du plaque présensibilisée**

On découpe notre plaque de circuit imprimé époxy FR4 pré sensibilisée à l'aide d'une cisaille à des morceaux de circuit aux dimensions du composant.



Figure 4 19: découpage de la plaque présensibilisé.

- **Etape 3 : l'insolation**

Après le découpage de la plaque, il faut éteindre la lumière dans la salle (laboratoire), et allumé la lumière rouge parce que la plaque est très sensible à la lumière.

Les plaques photosensibles sont recouvertes d'une couche protectrice photosensible dure et très adhérente, d'une couleur bleu-violet et d'une épaisseur de 2.5 microns. Cette couche protectrice protégera le cuivre lors de la gravure.

Pour que l'insolation puisse s'effectuer, il faut retirer l'adhésif opaque qui protège la couche photosensible des rayons ultra-violet de la lumière ambiante. Une fois l'adhésif retiré, placez la plaque pré sensibilisée dans l'insoleuse, avec le typon côté cuivre.

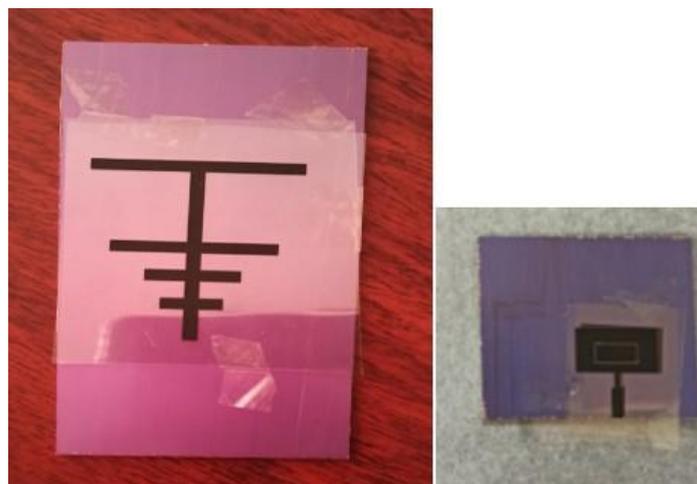


Figure 4 20: la préparation du typon sur la plaque présensibilisée.

On doit fermer le capot protecteur de l'insoleuse et régler la minuterie sur 2 min 30 sec.

Les ultra-violets émis par les tubes de l'insoleuse vont détruire la couche photosensible aux endroits non protégés par le tracé du typon. Lorsque la minuterie s'arrête, on doit ouvrir le capot protecteur de l'insoleuse et sortir la plaque pré sensibilisée. On peut observer le tracé des pistes imprimé sur la résine.

- **Etape 4 : la révélation**

Le plus important dans cette étape est la sécurité, On a préparé la solution du révélateur (un bain marin) par un litre d'eau mélangée par une sachée de produit chimique le NaOH, il faut le mélangée très bien.

On doit ramper la plaque présensibilisée dans le bain révélateur en suivant bien les consignes de sécurité. Si le révélateur est récent ou très actif, l'opération risque d'être très courte, On peut Observer bien l'action du produit qui désagrège la couche photosensible brûlée par les ultra-violets, ne laissant que le tracé de modèle sur la couche de cuivre.

Une fois la révélation effectuée, le circuit doit être rincé à l'eau puis séché, avant d'être plongé dans le produit de gravure.

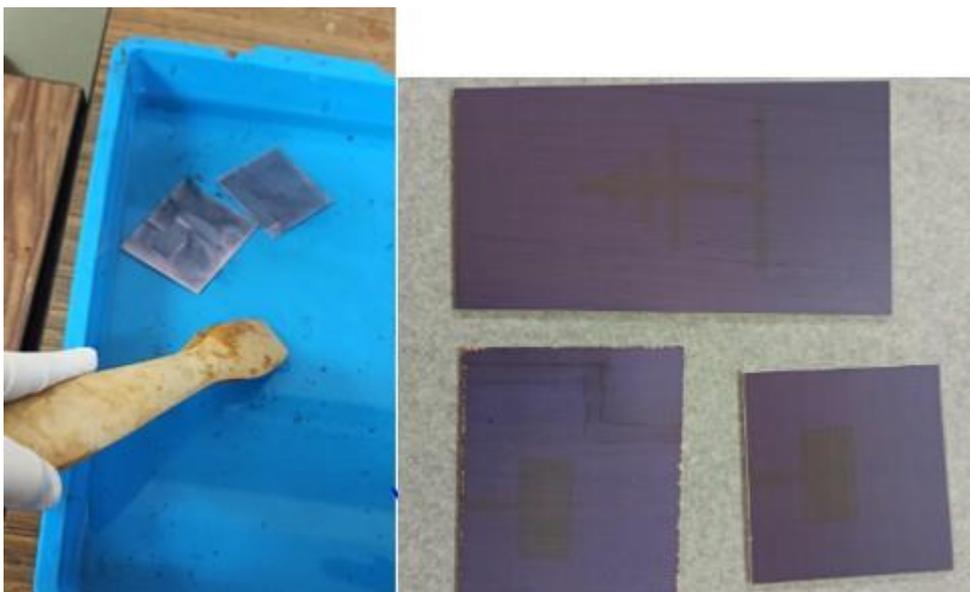


Figure 4 21: la révélation de plaques

- **Etape 5 : la gravure de la carte sur la plaque**

On plonge notre plaque dans un bac à graver qui contient un produit acide : le perchlorure de fer. Cet acide va dissoudre le cuivre autour des pistes protégées par la résine. Le Perchlorure de Fer suractivé est un liquide de couleur marron très foncé. On l'utilise pour graver les circuits imprimés car il a la particularité de détruire (par réaction chimique) tout le cuivre qui n'est pas recouvert de résine photosensible. Cela a pour conséquence de ne laisser sur le cuivre que les pistes qui nous intéressent.



Figure 4 22: la gravure de la carte

Au bout de deux heures suivant la qualité du perchlorure de fer et de la température, la plaque est gravée. On voit facilement les pistes gravées sur le composant.

Une fois la plaque est gravée, il reste à enlever les traces de résine qui subsistent sur les pistes protégées. Nous utiliserons du dissolvant. Le but est d'obtenir une plaque avec des pistes bien nettes.

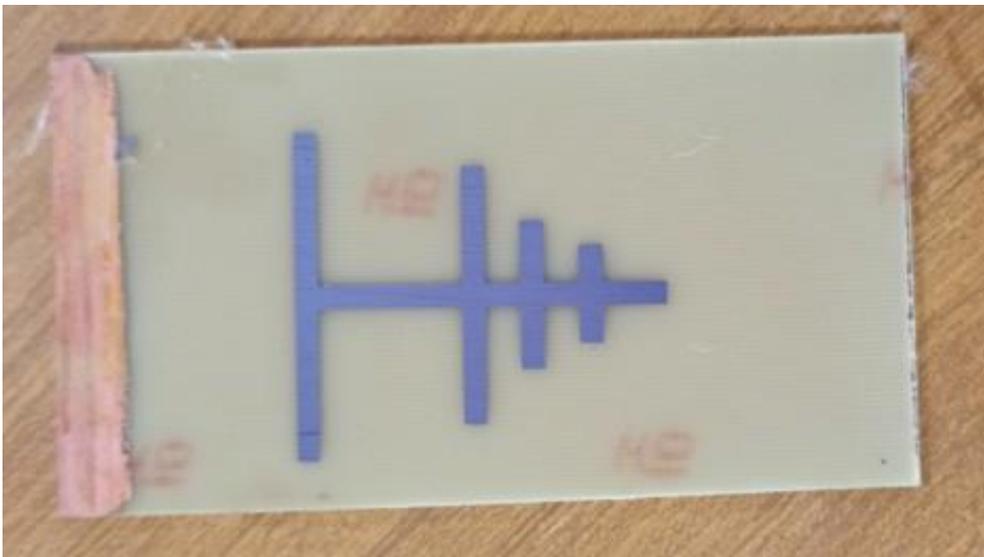


Figure 4 23: le capteur imprimé

- **Etape 6 : la soudure de connecteurs SMA sur les plaques découpées**

Après le découpage de plaques, on soude les connecteurs SMA sur les deux coté pour avoir les composants finals comme illustré dans la *Figure 4 24* :

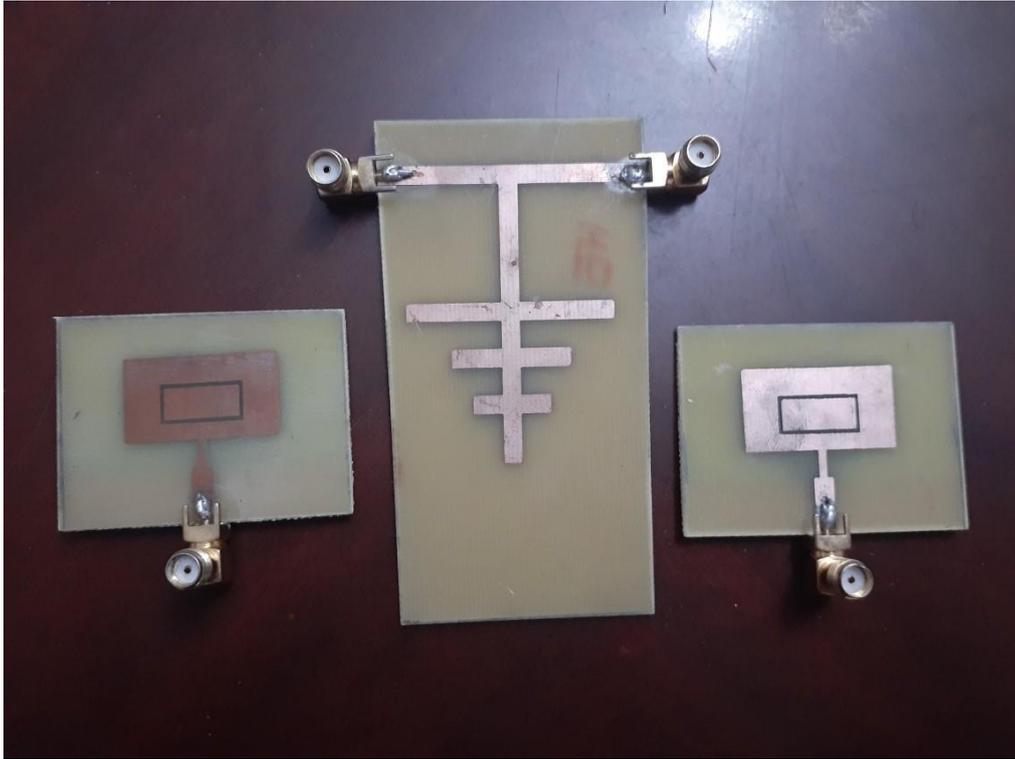


Figure 4 24: les composants finals.

La corrosion :

Après avoir fabriqué le capteur ; on l'a émergé dans l'eau. Le capteur est soumis à la corrosion pendant plusieurs mois.

Pendant les mois de l'exposition, la partie protégée reste intacte tandis que la partie exposée devient verte orangé. Le changement de couleur prouve que le cuivre a été corrodé.

La *Figure 4.25* ci-dessus présente le capteur corrodé.

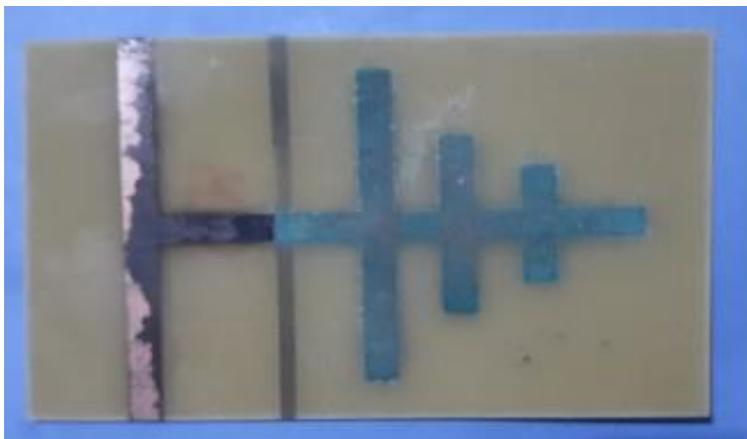


Figure 4 25: capteur corrodé.

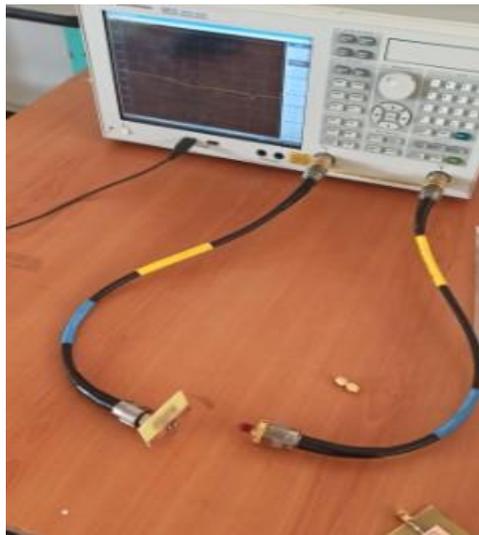


Figure 4 26: l'antenne sous test

4.3.3 Mesure hyperfréquence :

Architecture utilisée pour le capteur :

Pour réaliser l'architecture globale d'un capteur d'énergie passif, nous utilisons l'architecture présentée sur la figure au-dessous. Deux antennes sont utilisées pour transmettre les informations entre le lecteur et le capteur. Cette architecture est basée sur le principe de rétrodiffusion du signal. Le signal émis par l'antenne TxL du lecteur sera modifié après avoir traversé l'élément sensible puis restitué au lecteur.

Les deux antennes du lecteur ainsi que celles du capteur doivent être placées dans une polarisation croisée pour assurer le meilleur isolement possible

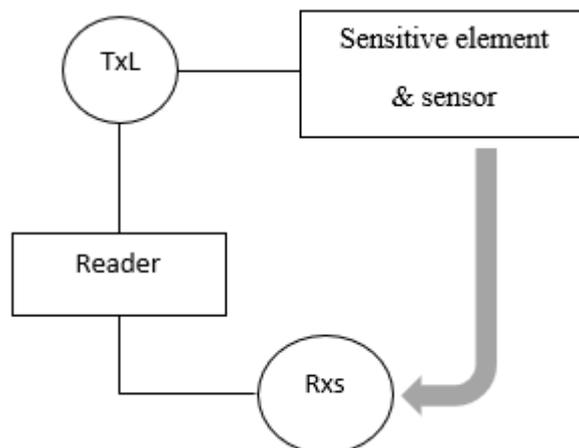


Figure 4 27: Architecture inspirée de la technologie RFID sans puce.

Chapitre 4 : Modélisation numérique et réalisation

L'analyseur de réseau est l'outil principal de mesure aux hautes fréquences. Il permet de mesurer les ondes transmises et réfléchies sur un dispositif sous test.

Il existe deux catégories d'analyseurs de réseaux : les scalaires et les vectoriels, les scalaires ne donnent accès qu'au module des paramètres S et les vectoriels donnent le module et la phase des paramètres. Pour cela, nous pouvons effectuer les mesures de ces paramètres par un analyseur de réseau vectoriel à deux ports à condition de maintenir une charge de 50Ω sur chacun des autres ports.

L'utilisation de la matrice de répartition, ou matrice de paramètre S permet de caractériser une ligne comme étant un élément de circuit aux caractéristiques connues représentable sous la forme d'un quadripôle.

L'architecture donnée par la **Figure 4 27** est réalisée au sein du laboratoire. Cette architecture est le démonstrateur présenté sur la **Figure 4 28**.

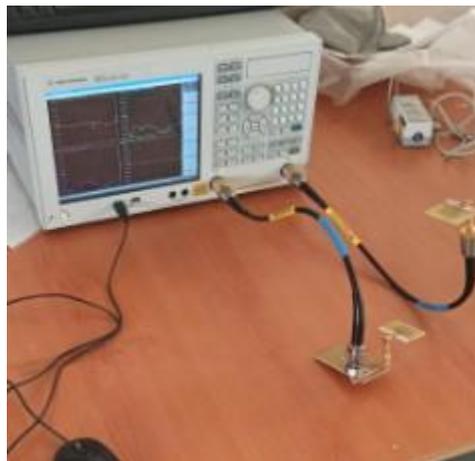


Figure 4 28: démonstrateur de la technologie RFID.

Ce démonstrateur qui a été réalisé d'un capteur qui représente l'élément sensible de la corrosion associée avec deux antennes patch permet la communication qui est inspiré de la technologie RFID.

Les antennes sont placées en polarisation croisée afin d'obtenir une bonne isolation entre les ports TxL et RxS du lecteur.

L'analyseur vectoriel émet une onde électromagnétique pour alimenter le capteur qui est relié à la première antenne qui délivre un signal transmis à la deuxième antenne. Des mesures de transmission du signal ont été effectuées. Le signal passe bien de l'antenne 1 à l'antenne 2.

La distance de lecture DL entre les deux antennes est fixée à 10 cm qui est la valeur maximale pour détecter le signal et avoir une résonance. Ce résultat prouve la faisabilité de la méthode. Le résultat expérimental S11 du capteur selon les deux antennes qui forme le démonstrateur. Pour augmenter la distance du lecteur, une optimisation de l'antenne est nécessaire à l'aide de l'antenne PIFA. Le démonstrateur renseigne sur la corrosion à une distance de 10 cm entre le capteur de corrosion et l'antenne.

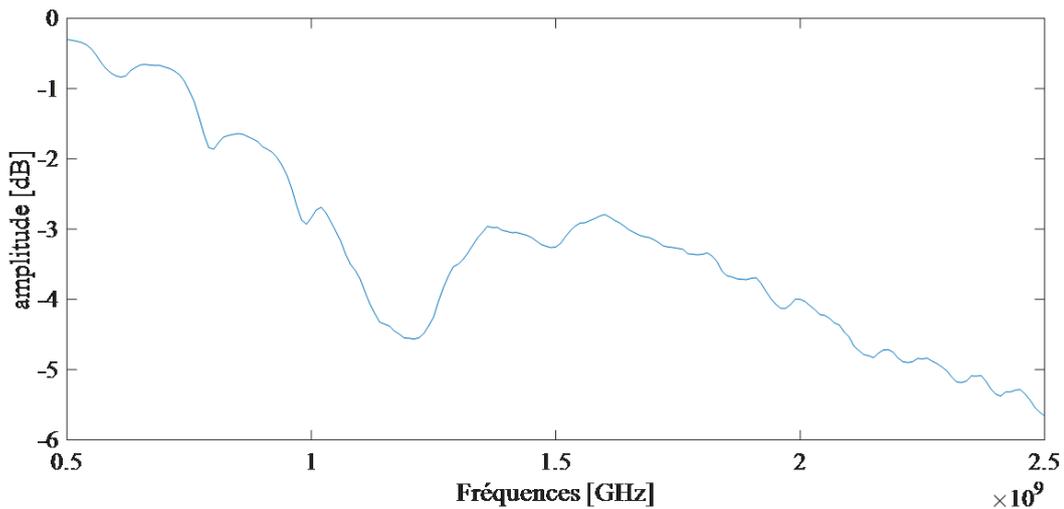


Figure 4 29: la réponse du démonstrateur.

4.4 Conclusion :

L'étude réalisée ici concerne le développement et la validation d'un composant RF permettant le contrôle de la corrosion. La structure sans fil a été modélisée sous le logiciel HFSS. Un avantage du capteur est son faible coût. Le capteur réalisé est soumis à la corrosion.

Nous avons développé un capteur basé sur la technologie RFID sans puce qui fonctionne à 1,3 GHz. Ceci a été réalisé en considérant une architecture présentant des antennes à polarisation croisée au niveau desquelles on insère le capteur qui représente un résonateur sensible. Le capteur fonctionne parfaitement sur une distance de lecture d'environ 10 cm. une amélioration de cette distance est possible en améliorant l'isolation, et en optimisant l'antenne.

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire porte sur la réalisation et la conception d'un capteur de corrosion passif et sans contact inspiré de la technologie RFID pour surveiller et détecter la corrosion.

Dans la première partie nous avons présenté la corrosion et les différentes techniques de détection de corrosion. Ces techniques souffrent de nombreux inconvénients :

Équipements chers.

Difficultés d'analyse des résultats.

Mesures en contact.

Limitation à une durée d'exposition relativement courte ou des zones faciles d'accès.

Ceci s'explique par le fait que les capteurs sont la plupart du temps énergétiquement actifs et nécessitent la présence de câbles de communication. L'utilisation de batteries est également un facteur limitant compte tenu de la durée de vie potentiellement importante de ces infrastructures (plusieurs années). Pour la nécessité de capteurs de corrosion économiques, sensibles, et sans fil qu'on est inspiré de la technologie RFID que nous avons présenté dans le troisième chapitre ainsi que les différents éléments qui composent ce system.

Dans la dernière partie nous avons présenté la modélisation numérique et la réalisation de capteur qui représente un élément sensible à la corrosion basée sur une fonction hyperfréquence. Nous avons montré que la méthode fréquentielle utilisé est fiable pour prédire la corrosion.

Afin de suivre la corrosion atmosphérique, notre travail, détaillé dans ce mémoire, consiste à réaliser un capteur passif sensible à la corrosion est faisable car nous avons atteint les objectifs qui ont été fixés au début :

- Réalisation d'un capteur sans fils capable de détecter la corrosion
- Conception des antennes qui assurent une communication à distance via le capteur.

Bibliographie

- [1] Dr. H. Bensabra. Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel 2016.
- [2] GROSGOGEAT, B. et COLON, P. La corrosion. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009.
- [3] AUGUSTIN, Christel. Prédiction des cinétiques de propagation de défauts de corrosion affectant les structures en alliage d'aluminium 2024. 2008. Thèse de doctorat.
- [4] SASTRI, V. S. Types of corrosion inhibitor for managing corrosion in underground pipelines. *Underground Pipeline Corrosion*, 2014, p. 166-211.
- [5] BRUCELLE, Olivier. Etude de l'effet de la microstructure sur la résistance à la corrosion sous contrainte en milieu primaire REP de l'alliage 718. 2001. Thèse de doctorat. Toulouse, INPT.
- [6] NORMAND, Bernard. Prévention et lutte contre la corrosion: Une approche scientifique et technique. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [7] YASRI, Maria. Capteur de corrosion passif et sans contact. 2016. Thèse de doctorat. Brest.
- [8] MAJEE, Arghya. Effet thermoélectrique dans des dispersions colloïdales. 2012. Thèse de doctorat. Bordeaux 1.
- [9] GIRAUD, Frederik. Modélisation causale et commande d'un actionneur piézo-électrique à onde progressive. Thèse de doctorat, Université Lille I, 2002.
- [10] SENHAJI, Achraf. Simulation numérique de la chauffe par induction électromagnétique d'un disque en AISI 4340. 2017. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- [11] JOACHAIN, Charles Jean. L'effet photo-électrique: d'Einstein à la physique multiphotonique. *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, 2005, vol. 16, no 7, p. 243-268.
- [12] LYNTA, Bouchene et MOURAD, Chertouk. Conception et simulation d'un capteur de champ magnétique à effet Hall compatible avec la technologie CMOS. 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

- [13] KHALIFEH, Rania, RIOUAL, Stéphane, et LESCOP, Benoit. Développement d'une nouvelle méthode de suivi de la corrosion par des capteurs sans fil basés sur la technologie RFID. In : 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation. 2016.
- [14] NGUYEN, Dat Son. Développement des capteurs sans fil basés sur les tags RFID uhf passifs pour la détection de la qualité des aliments. 2013. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [15] John L.volakis "Antenna engineering " HAND BOOK University Stuttgart.2007.
- [16] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles-bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institu d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [17] WALID, DEGHEFEL. Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- [18] I .J . Bahl and P.Bhartia, " Microstrip Antenna", Dedham, Artech House, 1980.
- [19] D.M. POZAR "Microstrip Antennas ", IEEE, Vol.80 N° 1, pp .79-91, January 1992.
- [20] G. Kumar and KP.Ray, "Broad band microstrip antennas" Aartech house baston. Londen 2003.
- [21] Y. Qian and al, "A microstrip patch antenna using novel photonic band gap structures", Microwave J, Vol. 42, pp. 66-67, Jan 1999.
- [22] CHENOUF, Ahlem et BOUGUETTAYA, Basma. Amélioration des performances de l'antenne patch microstrip en utilisant une structure de bande interdite électromagnétique. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila.
- [23] WALID, DEGHEFEL. Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- [24] A.K. Bha Hacharyya "Long rectangular patch antenna with a single feed" IEEE Trams Antennas Propagate, Vol.38, pp. 987-993 July 1990.
- [25] M. Diblng "Développement du concept de l'antenne à résonateur bic pour la génération de la polarisation circulaire", Université de Limoges, thèse de Doctorat, 20 mars 2006.

- [26] D. H. Schaubert, D. M. Pozar and A. Adran "Effect of microstrip antenna substrate thickness and Permittivity: comparison of theories and experiment" IEEE Trans. Antennas propagation, Vol.37, PP.677-682, June 1989.
- [27] D.M. Pozar and B. Kaufman, "Increasing the Baud with of a microstrip antenna by proximity coupling", Electron, Lett, Vol.23, PP.368-369, 1987.
- [28] Ansoft HFSS 9.1 user manual. Pdf
- [29] CHOUTI, Leila et BENGHALIA, Abdelmadjid. Caractérisation d'une antenne microbande couplée par une ouverture de forme rectangulaire. Application à la réalisation d'une antenne multibande. 2018. Thèse de doctorat. Université les frères mantouri Constantine .
- [30] BUROKUR, Shah Nawaz. Mise en oeuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microondes et aux antennes. 2005. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- [31]K.Finkenzelle, RFID Handbook : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, John Wiley& Sons, Second Edition, 2003
- [32] GHIOTTO, Anthony. Conception d'antennes de tags RFID UHF, application a la réalisation par jet de matière. 2008. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [33] NGUYEN, Van Hieu. Antennes implantées et système de localisation pour petits animaux utilisant la technologie RFID. 2018. Thèse de doctorat. Université Côte d'Azur (ComUE).

Annexe A

Présentation du logiciel d'Ansoft HFSS

Le logiciel Ansoft HFSS « High Frequency Structure Simulator » permet de concevoir des structures en 3D. La version utilisée dans les applications est la version 14. C'est un logiciel permettant la modélisation et l'analyse électromagnétiques des structures passives et tridimensionnelles. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Il aide l'utilisateur à analyser de diverses propriétés électromagnétiques de la structure telles que les diagrammes de rayonnement, les paramètres de dispersion tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs électromagnétiques. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Son principe de calcul est basé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle). Le simulateur possède des outils et un poste de traitement pour une analyse plus détaillée des structures en 3D. Il permet de calculer les points suivants:

- Les quantités de base : champs proches et lointains.
- Les impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation.
- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique afin de générer une solution du champ électromagnétique.

Avantages et inconvénients de la méthode

➤ Avantage :

- Etude de structures très complexe (Mécanique, EM...).
- Solutions exactes aux noeuds du maillage.
- Prise en compte de la dépendance fréquentielle ou temporelle.
- HFSS utilise un algorithme nommé ALPS (Adaptative Lanczos Pade sweep) qui lui permet de générer un maillage adaptatif automatiquement.

➤ Inconvénients :

- Gourmande en ressources informatiques (mémoire, temps CPU...).
- Solutions approximées.

- Erreurs de calculs numériques.
- Difficultés pour modéliser un espace libre (structure fermée).

Aperçu du processus

La première étape est de dessiner le modèle géométrique de la structure qui doit être analysée. La seconde étape est de choisir les matériaux que les divers objets utilisés pour la conception de la structure. Une définition précise des frontières pour la structure doit être faite, comme, le conducteur magnétique ou électrique parfait. Au niveau HFSS, un port ou une source de tension doit être défini pour exciter la structure. Ceci est fait en tant qu'élément de définition des frontières. Une fois que la structure est complètement modélisée, l'analyse de la structure est lancée, ceci inclut la définition de divers paramètres tels que la fréquence à laquelle l'amélioration adaptative de la maille a lieu et le critère de convergence. En conclusion, et une fois la simulation terminée, un poste traitement des données de la solution nous permet de visualiser le diagramme de rayonnement en champ lointain, le diagramme de Smith et les valeurs des paramètres S. La figure A.1 illustre la première fenêtre que l'utilisateur rencontre dès qu'il ouvre un nouveau projet. Le menu de projet contient un gestionnaire de tâches telles que l'ouverture et l'enregistrement des différents projets.

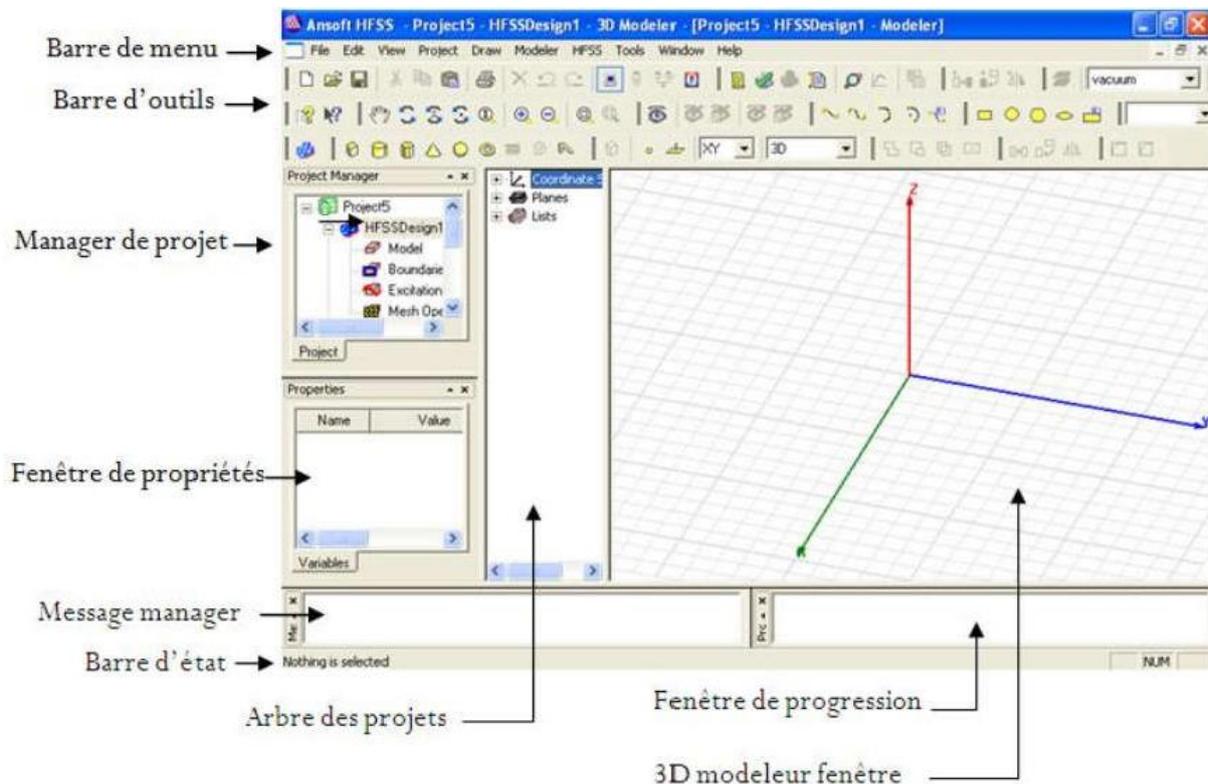


Figure A.1 : Aperçu de HFSS.

Procédure générale en HFSS

Ansoft HFSS fournit un organigramme, facile à utiliser pour la conception de dispositifs passifs RF. La création des dessins et des modèles, nécessite les éléments suivants :

- 1 Parametric Model Generation : Création de la géométrie, des frontières, et des excitations.
- 2 Analysis Setup : Définition des solutions d'installation et des fréquences de balayage.
- 3 Results : Création des rapports des plans en 2D.
- 4 Solve Loop : La solution du processus est entièrement automatisée.

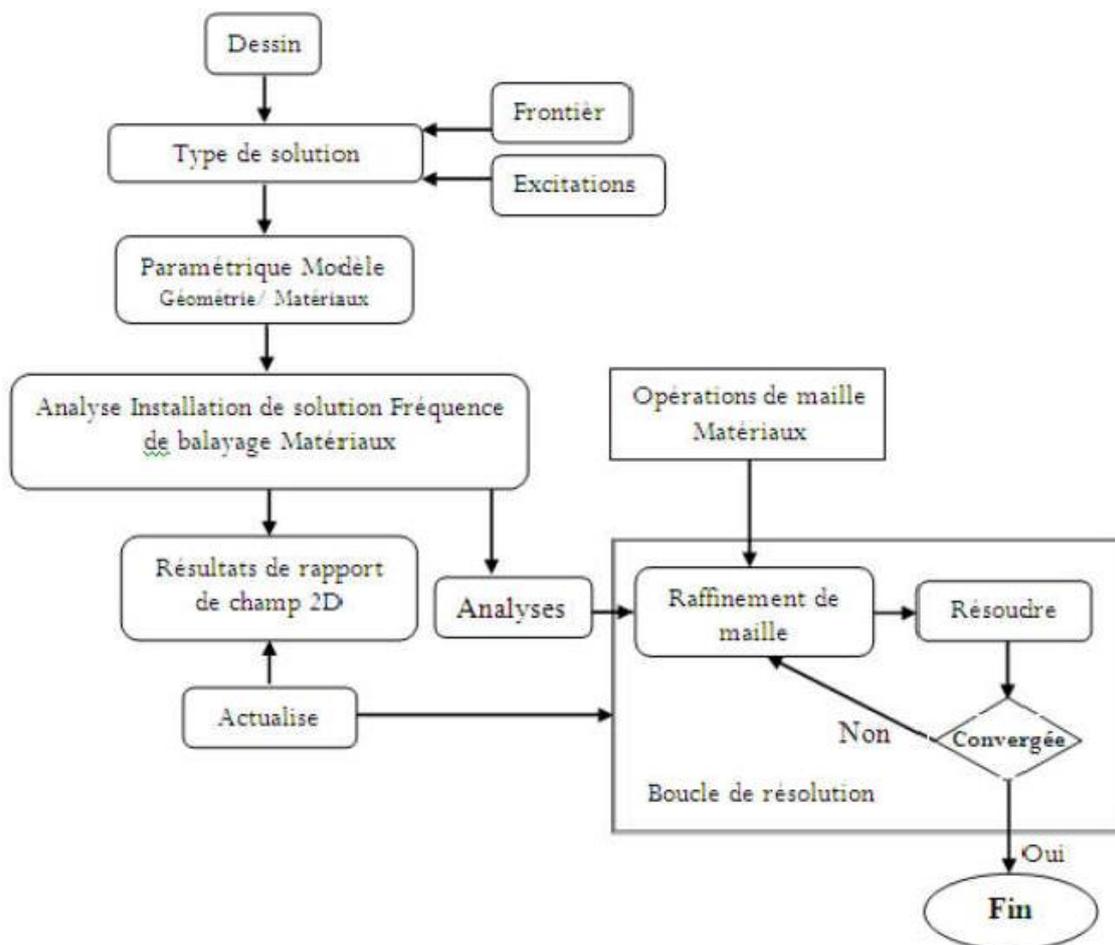


Figure A.2 : Procédure générale en HFSS.

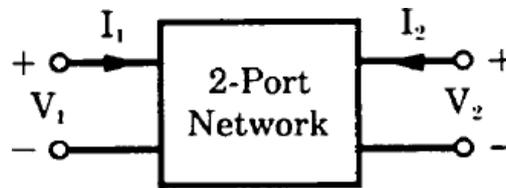
Le lecteur intéressé est encouragé à étudier des manuels spécifiques et des helps pour un arrangement complet de tous les dispositifs dans HFSS.

Annexe B

Paramètres S

Représentation matricielle des quadripôles

Un quadripôle (en anglais "Two port") est un circuit comportant deux paires de terminaux. Chaque paire de terminaux ou port peut être utilisé comme entrée ou sortie pour le signal. Les deux ports peuvent éventuellement avoir un terminal commun.



H-Parameters

$$\begin{aligned}V_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}V_2\end{aligned}$$

Y-Parameters

$$\begin{aligned}I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 &= y_{21}V_1 + y_{22}V_2\end{aligned}$$

Z-Parameters

$$\begin{aligned}V_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2\end{aligned}$$

Chaque matrice décrit entièrement le quadripôle et peut donc être exprimée en fonction d'une des autres.

Ondes incidentes et réfléchies

Comme on l'a vu au 1.4, après qu'on ait convenu d'une impédance de référence Z_0 , le voltage observable à un port peut être considéré comme la somme algébrique de :

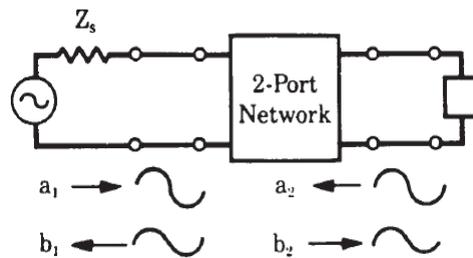
Un voltage incident E_i qui est la valeur correspondante au transfert de puissance maxi

Un voltage réfléchi E_r qui traduit éventuellement une non-adaptation d'impédance

On définit les ondes ou "Waves" en divisant ces voltages par la racine carrée de l'impédance de référence, dans un but de normalisation, pour le cas où l'impédance de référence ne serait pas la même pour tous les ports :

a = onde incidente

b = onde réfléchie



$$a_1 = \frac{E_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad a_2 = \frac{E_{i2}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_1 = \frac{E_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad b_2 = \frac{E_{r2}}{\sqrt{Z_0}}$$

Paramètres S

Les relations entre les ondes peuvent être exprimées sous forme d'une matrice de 4 coefficients sans dimension, les paramètres S :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

L'appellation Paramètre S vient de « Scatring parameters », latéralement Paramètre de dispersion, une expression qui vient de l'optique, où la transition entre deux milieux défirents donne lieu à réflexions et dispersion de la lumière. A condition d'être accompagné de la valeur de l'impédance de référence, la matrice S décrit entièrement le quadripôle et peut donc être exprimé en fonction de chacune des matrice H, Y, Z et réciproquement.

L'intérêt f=de la méthode est le même que pour le coefficient de réflexion appliqué à caractérisation d'un dipôle.

S_{11} = coefficient de réflexion au port 1

S_{12} = coefficient de transmission du port 2 vers le port 1

S_{21} = coefficient de transmission du port 1 vers le port 2

S_{22} = coefficient de réflexion au port 2

Si l'impédance de référence est la même pour les deux ports, S_{12} et S_{21} sont similaires à des gains en tension. Sinon, S_{12} et S_{21} sont des gains en tension normalisés en puissance, c'est à dire qu'une valeur de 1 correspond à un gain en puissance de 1.

