

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المركز الجامعي بلحاج بوشعيب لعين تموشنت
Centre Universitaire de Ain Témouchent - BELHADJ Bouchaib -
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : SCIENCES & TECHNOLOGIES

Filière : ELECTRONIQUE

Spécialité : INSTRUMENTATION

Thème :

Etude et réalisation d'un capteur passif pour le suivi de
l'évolution de la corrosion

Présenté par : -Berkane Abdelhamid

-Berkane Nabil Charaf Edinne

Soutenu en Septembre 2020 devant le Jury :

Dr Meradi Hafid	M.C.A	C.U.A.T	Président
Dr Moulesshoul wassila	M.C.B	C.U.A.T	Examineur
Dr Slimane Zohra	M.C.B	C.U.A.T	Encadrant

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Ma Chère Mère, Mon Cher Père

Ceux qui sont toujours à coté de mon cœur, ceux qui m'ont appris le vrai sens de la vie, ceux qui n'ont hésité aucun moment à m'encouragé, ceux qui n'ont jamais épargné un effort pour mon bien, ceux qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, ceux qui ont tous sacrifié pour ma réussite, ceux qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Que Dieu vous garde et vous bénisse.

Ma Précieuse Famille

Mes deux frères **Yasser** et **Safi, Bensafi Sabria** qui a été un bras droit dans ce mémoire, Mon oncle **Berkane Ahmed** pour son aide pédagogique durant ce travaille, mo cousin et mon binôme **Berkane Abdelhamid**.

ET un spéciale remerciement a mon Amie **Hobbi Amira Hadjar** pour son soutien et son aide très précieux

Tous mes professeurs qui m'ont enseigné durant mon parcours scolaire.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Mes amis, Mes camarades et tous qui me connaissent.

Dédicaces

Je Dédie ce travail :

A ceux qui me sont chers

A ceux qui ont toujours cru en moi

A ceux qui m'ont toujours encouragé

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente

Pour exprimer ce qu'elle mérite pour tous les sacrifices

Qu'elle m'a cessé de me donner depuis ma naissance,

Durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé,

Longue vie et bonheur.

A mon très cher père : Berkane Ahmed.

A mes Adorable sœurs : Amina et Merieme que dieu les gardera pour moi

A mon très cher frère : Youcef dieux le protège.

A mon cousin et mon binôme : Berkane Nabil Charaf Eddine.

A mes amies : Hobbi Amira et Boudjemai Khadidja qui ont été présent a fournir leur aides e leurs soutient.

A mes très chers amis qui m'ont aidés a accomplir ce travaille.

A mes enseignants du département de génie électrique.

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

Abdelhamid

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir de modeste travail.

Nos remerciements et notre reconnaissance à notre encadrant de mémoire DR SLIMANI ZOHRA et notre Co-encadrant EL-BOUSLEMTI RAHMOUNA pour leur conseils et leur aides durant toute la période de travaille.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux Messieurs le Président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail. On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Liste des abbreviations

Hfss: high frequency structure simulator

ISFET: Ion-Sensitive Field Effect Transistor.

VH:tension de hall

Introduction générale.....2

Chapitre I :GENERALITES SUR LES CAPTEURS

I ..Introduction.....	5
I.1 Définition	5
I.2 -Les différents types de capteurs :	6
I.2.1: capteurs actifs :	6
I .2.1.1: Sommaire des principaux capteurs actifs:	7
I .2.1.2: Les marques des capteurs actifs :	7
I.2.2: capteur passifs :.....	8
I.2.2.1 :Sommaire des principaux capteurs passifs :	8
I.2.2.2: Les marques de capteur passif :	9
I.3-La technologie microruban:.....	10
I.3.1 : Définition :	10
I.3.2 : La technologie coplanaire :	11
I.3.3 : impédance caractéristique :.....	12
I.3.4 : Paramètre de la ligne micro ruban.....	11
I.3.5 : Avantages et inconvénients :.....	14
a) Avantages.....	14
b) Inconvénients	14
I.3.6 : Caractéristiques générales d'une ligne microruban :.....	14
I.3.7 : Affaiblissement dans une ligne microruban	14
I.4 : conclusion	14

Chapitre II : la corrosion

II .1.Introduction	17
II .2.définision	17
II .3. Corrosion des métaux :	17
La corrosion du cuivre :	17
La corrosion du fer :	18
La corrosion de l'argent :	18
La corrosion de l'aluminium et du zinc:.....	19
II .4. Les facteurs de la corrosion :.....	19

II .5.Principales formes de corrosion :.....	19
La corrosion localisée :.....	21
La corrosion généralisée ou uniforme :.....	23
II .5.Les capteur de corrosion :	24
Capteur de corrosion actif :.....	24
Capteur de corrosion passif :.....	24
II .6.conclusion :	25

Chapitre III : *Simulation et interprétation*

III.Introduction	27
III 1.Présentation du logiciel ansoft HFSS	27
III.1.1 Un projet en HFSS	28
III 1.2 la méthode des éléments finis (FEM)	29
III.2 :Avantages et inconvénients de la méthode	29
III.2.1 :Avantages	29
III 2.2 :inconvénients	30
III.3 :Procédure générale en HFSS	30
III.4 :représentation de capteur de corrosion	31
III.5 : wave port	33
III.6 :Dimensionnement géométrique de la structure	33
III.7 :Résultats de la modélisation numérique	34
Conclusion général.....	39
Bibliographie.....	41
Webographie.....	44
Résumé.....	45

Liste des figures

Figure I.1:Principe de fonctionnement d'un capteur	5
Figure I.2:capteur thermocouple	7
Figure I.3:capteur photo résistance	9
Figure I.4:capteur pt	10
Figure I.5:structure de la ligne micro ruban	11
Figure I.6:structure de la ligne coplaire.....	12
Figure II.1 : corrosion du cuivre.....	17
Figure II.2 : corrosion du fer	17
Figure II.3: Corrosion localisée (a) corrosion généralisée (b).....	19
Figure II.4: Corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal	19
Figure II.5: Les différents types de corrosion localisée	20
Figure II.6: Capteur de corrosion LUNA.	22
Figure II.7: Capteur de corrosion passif.....	23
Figure III.1: la fenêtre principale du logiciel HFSS.	26
Figure III.2: représentation general en HFSS.....	28
Figure III.3: capteur de corrossion modèlisè sur HFSS.	29
Figure III.4: Excitation wave-port.....	30
Figure III.5: le schéma de la sturcture en 2D.	31
Figure III.6: schéma d'un stucture descriptif en 3D.....	31
Figure III.7: Paramètre S du capteur proposè.....	32
FigureIII.8:le dècalage de la frèquence de rèsonance provoquè par le processus de corrosi...	33

Liste des tableaux

<u>Tableau I.1:sommaire des principaux capturs actifs</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>Tableau I.2:Sommaire des principaux capteurs passifs.....</u>	9
<u>Tableau II.1 : Les principaux facteurs de la corrosion</u>	18
<u>Tableau II.2 : Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion</u>	21

Introduction Générale

Introduction Générale

Les recherches en technologie de la communication avancent d'une manière efficace, on a l'impression que les laboratoires et les entreprises de recherche travaillent jour et nuit, et ces travaux sont favorables à toutes les disciplines qui appliquent ces technologies dans leurs domaines respectifs : que ce soit dans la médecine à distance, dans l'armée, dans la gestion des catastrophes naturelles etc. En effet, l'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. Contrairement à l'environnement filaire, celui sans fil permet aux utilisateurs une souplesse d'accès et une facilité de manipulation des informations à travers des unités de calcul mobiles (PC portable, capteur ...).

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

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente très souvent électrique (tension). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande. Le capteur est le premier élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation

La corrosion est un processus électrochimique qui dégrade la plupart des matériaux, et qui de ce fait, présente un fort impact financier au niveau des opérations de maintenance des infrastructures dans de nombreux domaines d'activités : transport, énergie, construction, ... Il est donc crucial de détecter et quantifier avec précision l'évolution de la corrosion par l'utilisation de capteurs ou de réseaux de capteurs. Ceci est notamment vrai dans le cadre des activités marines et portuaires, pour lesquelles les conditions environnementales peuvent être considérées comme sévères

L'objectif principal de notre mémoire est donc la réalisation d'un capteur passif pour le suivi de l'évolution de la corrosion.

Nous avons organisé la structuration de ce mémoire en trois principaux chapitres :

Chapitre I : dans ce chapitre nous commencerons par une généralité sur les capteurs, en premier lieu nous présentons une définition des capteurs, en suivent ses différents types, Puis nous décrivons la technique micro ruban, les paramètres de la ligne micro ruban, ainsi ses caractéristiques et ces Affaiblissement.

Chapitre 2 : fait l'objet d'une étude approfondie de la corrosion sur notamment la présentation de ces types, ces principes formes ainsi que les capteurs de corrosion.

Chapitre3 : en dernier lieu, ce chapitre est consacré à la présentation de logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) qui est le logiciel choisi dans notre projet, et une description détailler de la structure physique à étudier.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES CAPTEURS

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

I.1-Définition

Un capteur est un dispositif transformant une grandeur physique (température, pression, position, concentration, etc.) en un signal (souvent électrique) qui renseigne sur cette grandeur.

Par exemple, la pression exercée par de l'air sur un manomètre à aiguille positionne l'aiguille sur la graduation correspondant à la mesure de cette pression.

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur lui en est dépourvu.

Il existe un grand nombre de capteurs différents, ils diffèrent dans la grandeur physique qu'ils mesurent et dans le dispositif créant le signal. On peut par exemple mesurer une concentration chimique avec un transducteur piézoélectrique ou un micro-calorimètre ou encore avec un ISFET. De même, on peut utiliser un dispositif piézoélectrique pour mesurer une pression ou une concentration en composés biologiques.



Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'un capteur

- température -signal logique(TOR)

-vitesse

-débit

-pression

-force

-signal analogique

-signal numérique

I.2-Les différents types de capteur :

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

- Capteurs actifs
- Capteurs passifs

I.2.1: Capteurs actifs :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les effets physiques les plus rencontrés en instrumentation sont :

•Effet thermoélectrique la thermoélectricité régit la conversion à l'état solide d'énergie électrique en énergie thermique et vice-versa, c'est à dire que si on soumet un circuit formé de deux matériaux de natures différentes à deux gradients de température T_1 pour le premier matériau et T_2 pour le deuxième on peut récupérer aux extrémités des deux matériaux une tension, et si on garde une des deux températures à une valeur fixe on peut déduire l'autre température à partir de la tension délivrée par le système.[2]

•Effet piézo-électrique : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées. [1]

• 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).

• Effet photo-électrique : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique. [1]

• Effet Hall : lorsqu'une plaque d'un matériau semi conducteur, placée dans un champ magnétique est parcourue par un courant électrique, une tension V_H (tension de Hall) perpendiculaire à l'induction magnétique apparaît entre les faces de cette plaque. Les capteurs à base d'effet Hall sont utilisés pour déterminer des vitesses de rotation (capteur de vitesse de rotation, capteur de vitesse d'un véhicule par exemple). La tension V_H mesurée sur le générateur Hall est généralement de faibles valeurs (inférieure ou égale à quelques millivolts) ; elle doit de ce fait être amplifiée à l'aide d'un circuit intégré Hall pour une meilleure exploitation [2]

I.2.1.1: Sommaire des principaux capteurs actifs:

Mesurande	Principe physique	Sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement lumineux	Pyroélectricité Photoémissif Photovoltaïque Photo électromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force, pression, accélération	Piézo-électricité	Charge
Vitesse de déplacement	Induction électromagnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

Tableau I.1:sommaire des principaux capturs actifs**I.2.1.2: Les marques des capteurs actifs :**

- Capteur thermocouple : c'est un capteur actif, il nous permet de mesurer la température, il est présenté sur la Figure suivante :

**Figure I.2 : capteur thermocouple.**

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivrent une f.é.m. V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions.

La jonction à la température T_1 est appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude

I.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. [1]

Il s'agit en général d'une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique, il faut l'intégrer dans un circuit avec une alimentation.

I.2.2.1 : Sommaire des principaux capteurs passifs :

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre semi-conducteurs
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages nickel/silicium dopé Alliages ferromagnétiques
Position déplacement	Résistivité, Réductance/Inductance Capacitive	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, Antimoniure d'indium cuivre Métaux : Aluminium

Humidité	Résistivité, Constante diélectrique	Chlorure de lithium Alumine, polymères
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

Tableau I.2:sommaire des principaux capturs passifs

I.2.2.2: Les marques de capteurs passifs :

❖ **Photo résistance** : c'est un composant électronique qui fonctionne avec la lumière, sa résistance varie en fonction de la lumière capte

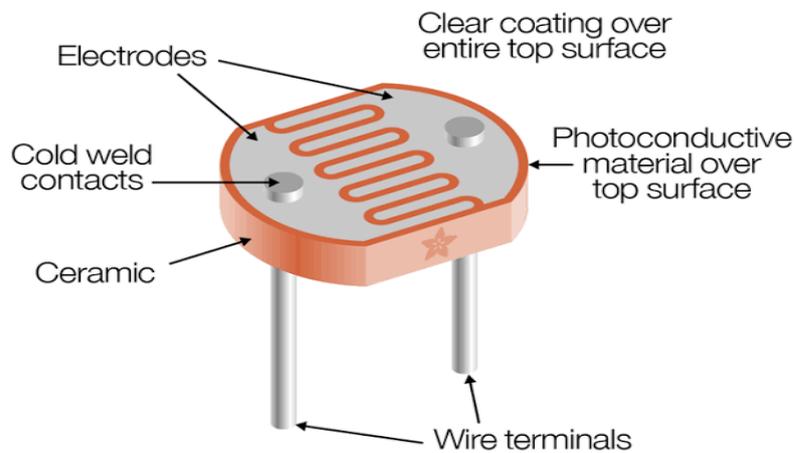


Figure I.3 : capture photorésistance

Capteur Pt100 :c'est un capteur qui fonctionne avec la température

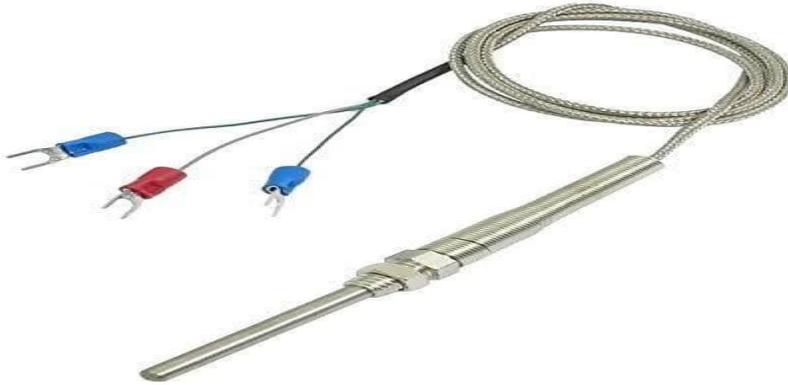


Figure I.4 : capteur pt

I.3-La technologie micro ruban :

I.3.1 : Définition :

La structure micro ruban est couramment utilisée pour la réalisation de circuits hyperfréquences. Elle est composée d'un conducteur chaud situé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique, le plan de masse étant situé sur la face inférieure. [4]

Le procédé technologique mis en œuvre pour la réalisation des motifs est relativement simple, toutefois il comporte un certain nombre d'inconvénients. En effet, si la connexion des composants en série reste simple, il n'en est pas de même pour leur implantation en parallèle compte tenu de la présence du plan de masse en face arrière.[4]

La réalisation de courts-circuits par retour de masse se fait à l'aide de trous métallisés.

L'influence de tels trous métallisés sur la performance électrique du circuit n'est pas négligeable compte tenu des effets parasites qu'ils génèrent.

Du point de vue du comportement électrique, les lignes micro ruban sont relativement dispersives. Enfin, une fois les caractéristiques du substrat choisies, La plage d'impédances caractéristiques réalisables est relativement restreinte, compte tenu des largeurs importantes pour les impédances capacitives (lignes larges avec apparition de modes supérieurs et d'effets parasites), et de la résolution des procédés de gravure pour les impédances inductives (lignes fines).

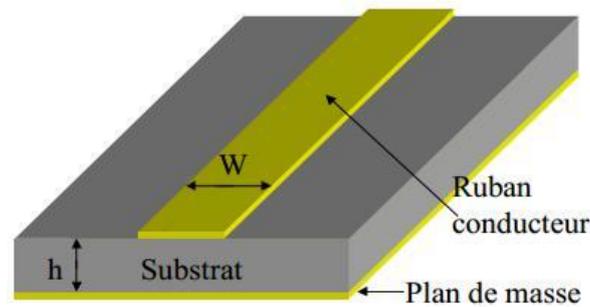


Figure I.5 Structure de la ligne micro ruban.

I.3.2-La technologie coplanaire :

La technologie coplanaire repose sur des structures où le plan de masse et le ruban conducteur sont situés sur la même face du substrat

La technologie coplanaire est généralement utilisée pour la réalisation de dispositifs dans le domaine millimétrique.

Le mode pair de la ligne coplanaire est un mode quasi-TE dispersif et le mode impair est un mode quasi-TEM peu dispersif. Même si l'utilisation conjointe des deux modes n'est pas à négliger, c'est en général le mode impair qui est utilisé du fait de sa faible dispersion. [4]

Avec l'hypothèse souvent vérifiée d'une propagation de type TEM ou quasi-TEM, les tensions présentes en un point le long des lignes sont soit de même polarité, engendrant un mode pair, soit de polarité opposée engendrant un mode impair. La vitesse de propagation des modes est identique si le diélectrique constitutif du substrat des lignes micro ruban est uniforme.[4]

Mais les distributions des champs électrique et magnétique (Figure 6) sont différentes selon les modes pairs (symétriques) ou impair (antisymétriques), et sont caractérisées par une impédance proche à chaque mode :

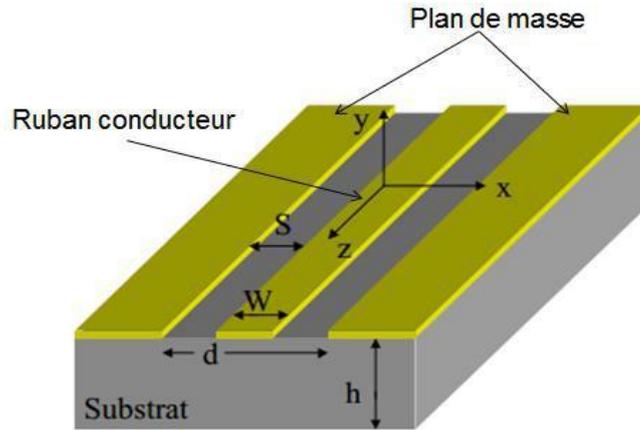


Figure.6 Structure de la ligne coplanaire.

I.3.3 Impédance caractéristique

La ligne micro ruban peut-être définie par son impédance caractéristique Z_c . L'adaptation de la ligne micro ruban permet d'optimiser le transfert de la puissance électrique. Afin d'éviter toute réflexion du signal, nous avons fixé Z_c à 50 qui égale à l'impédance d'entrée et de sortie souhaitée. Cette impédance caractéristique est déterminée par les Equations 2.1 et 2.2

Basées sur la géométrie de la ligne W et h ainsi que la permittivité effective ϵ_r

$$\text{Si } \frac{W}{h} \geq 1 \quad Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \left(\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right)} \quad \text{Equation 2.1}$$

$$\text{Si } \frac{W}{h} \leq 1 \quad Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \quad \text{Equation 2.2}$$

La permittivité diélectrique effective, ϵ_{reff} , liée à la présence d'une discontinuité des milieux (air - substrat), est calculée à partir des relations des Equations 2.3 et 2.4 d'Hammerstad [5], en fonction du rapport W/h (W étant la largeur du ruban et h la hauteur du substrat) et de la permittivité diélectrique du substrat ϵ_r .

$$\text{Si } \frac{W}{h} \geq 1 \quad \varepsilon_{r,eff} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1) \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-1} \quad \text{Equation 2.3}$$

$$\text{Si } \frac{W}{h} \leq 1 \quad \varepsilon_{r,eff} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1) \left[\left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-1} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \right] \quad \text{Equation 2.4}$$

I.3.4 Paramètres de la ligne micro ruban

La ligne micro ruban est réalisée sur un substrat en verre en considérant les dimensions suivantes :

- La largeur du ruban métallique : $W = 1.6 \text{ mm}$
- Epaisseur du ruban : $t = 2 \mu\text{m}$
- La hauteur du substrat : $h = 1 \text{ mm}$
- La permittivité relative du diélectrique (verre) : $\varepsilon_r = 5.5$
- Hauteur de la masse : $E = 40 \mu\text{m}$
- Longueur de la ligne micro ruban : $l = 5 \text{ cm}$
- Largeur du substrat : $L = 3.5 \text{ cm}$

I.3.5-Avantages et inconvénients :

a) Avantages

La technologie micro ruban permet une implémentation aisée des éléments en série. Le procédé technologique de réalisation des circuits est simple et bien maîtrisé. Le report des éléments actifs ne pose pas trop de problème et les bibliothèques de modèles sont relativement fournies. [3]

b) Inconvénients

Le problème majeur rencontré avec cette technologie est l'implantation des éléments en parallèle et le report de masse (ou court-circuit). Pour réaliser des courts-circuits, il faut avoir recours aux trous métallisés (vais) qui peuvent être gênant car ils créent des effets parasites nuisibles aux performances électriques. De plus la plage d'impédances

caractéristiques réalisables est restreinte une fois que les caractéristiques du substrat sont fixées. [3]

I.3.6-Caractéristiques générales d'une ligne micro ruban :

Les caractéristiques d'une ligne micro ruban, telles que l'impédance caractéristique Z_0 , la vitesse de phase v_p et la constante diélectrique effective ϵ_{eff} dépendent toutes de sa géométrie et de la constante diélectrique relative ϵ_r du substrat [5].

I.3.7-Affaiblissement dans une ligne micro ruban

L'atténuation des signaux au cours de leur propagation sur les circuits micro rubans est principalement due à trois causes :

- Les pertes diélectriques
- Les pertes métalliques
- Les pertes par rayonnement [6].

I.4 : Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé une partie qui présente la signification d'un capteur et son principe de fonctionnement ainsi que ses différents types actifs et passifs en récapitulent dans des tableaux les capteurs les caractéristiques de chacun, ensuite nous avons fait un aperçu sur la technologie micro ruban et citant ses avantages et ses inconvénients.

CHAPITRE II

La corrosion

II .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'ingénieur, 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 public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement [7].

II.2.définition

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métallique par leur environnement. C'est, en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, sulfate, carbonate...etc. Plus stable par rapport au milieu corrosif, et ainsi à subir une dégradation de leurs propriétés [8].

Les composés non métalliques ne sont pas inclus dans la présente définition, les plastiques peuvent être gonflé ou craquer, le bois peut s'ouvrir, le granit peut s'éroder et le ciment portland peut se lessiver mais le terme corrosion est ici limité à l'attaque chimique des métaux [9].

II .3. Corrosion des métaux :

La corrosion du cuivre :

Le cuivre se corrode au contact de l'air. Il se couvre d'une couche verdâtre appelée *vert-de-gris*. Cette couche est imperméable et isole le cuivre de l'air et des réactifs responsables de sa corrosion.

La corrosion du cuivre s'arrête donc dès l'apparition du vert-de-gris. La corrosion du cuivre reste alors superficielle, elle modifie seulement son aspect extérieur.

Exemple :

La statue de la liberté doit sa couleur verdâtre au vert-de-gris qui s'est formé sur le cuivre dont elle est constituée.



Figure II.1 : corrosion du cuivre

La corrosion du fer :

Le fer réagit avec le dioxygène et l'eau pour former de la rouille rougeâtre qui constitue une couche poreuse. Cette dernière laisse passer l'eau et l'air qui peuvent continuer à réagir avec le fer tant que celui-ci n'a pas été transformé complètement en rouille. Un objet en fer se corrodé donc en profondeur et peut même disparaître complètement. Le fer doit donc être protégé d'une couche de peinture ou de vernis qui l'isole de l'eau et de l'air afin d'empêcher la transformation chimique qui le transforme en rouille.[17]



Figure II.2 : corrosion du fer

La corrosion de l'argent :

L'argent s'oxyde au contact du dioxygène de l'air. Il noircit en se recouvrant d'une couche d'oxyde d'argent. Cette couche imperméable empêche la corrosion de se poursuivre.

La corrosion de l'aluminium et du zinc:

La corrosion du zinc et de l'aluminium est du même type que celle du cuivre et de l'argent. Elle n'attaque que la surface du métal sur lequel se forme une couche d'oxyde (oxyde de zinc ou oxyde d'aluminium). Cependant les couches qui se forment dans les deux cas sont de couleur grisâtre. Il est donc difficile de les distinguer du métal qu'elles recouvrent et de se rendre compte de leur présence. Elles rendent simplement le métal un peu plus terne. [17]

II .4. Les facteurs de la corrosion :

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service dépend d'une multitude de facteurs, et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux (tableau II.1)

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration de réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Température -Pression -Présence de bactéries	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration -Impuretés -Traitement thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface - -Forme des pièces - -Emploi d'inhibiteur - -Procédés d'assemblage	-Vieillessement - -Tension mécaniques - -Modification des revêtement protecteurs

Tableau II.1 : Les principaux facteurs de la corrosion [10]

II .5.Principales formes de corrosion :

Les facteurs cités précédemment génèrent différentes formes de corrosion, nous pouvons citer deux types de corrosion : localisée et généralisée, présentées sur la Figure 1.4 :



Figure II.3: Corrosion localisée (a) corrosion généralisée (b).

La corrosion localisée :

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques. [11]

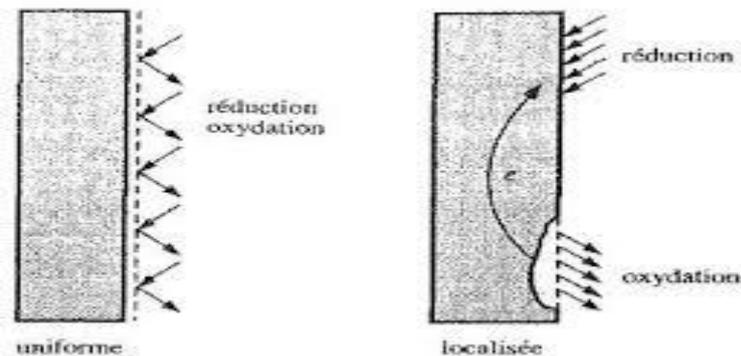


Figure II.4: Corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal [12]

Ainsi les chercheurs ont subdivisé ce type de corrosion en huit catégories les plus courants en pratique [13] :

- Corrosion galvanique : entre deux métaux différents plongés dans un électrolyte, où il existe une différence de potentiel. Si ces métaux sont en contact (c'est-à-dire

connectés électriquement), un courant électrique s'établit. Le métal le moins noble joue le rôle d'anode et se corrode (figure I.4.1), [12]

- Corrosion cavernueuse qui est observée lorsqu'il y a infiltration d'une solution entre deux parties d'un assemblage (figure I.4.2),
- Corrosion par piqûres est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle introduit des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre à l'intérieure de matériau à partir d'une ouverture de faible surface (figure I.4.3),
- Corrosion sélective est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (figure I.4.4),
- Corrosion inter granulaire est une attaque sélective aux joints de grains

(Figure I.4.5),

- Corrosion-érosion est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière. Elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide (figure I.4.6),
- Corrosion sous contrainte est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique

(Figure I.4.7),

- Corrosion fatigue est observée lorsque l'effet est alterné, par conséquent l'attaque est en générale transgranulaire (figure I.4.8).

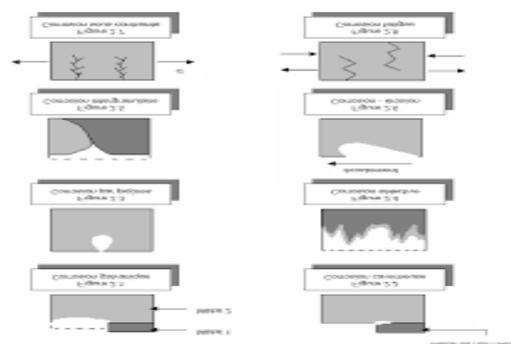


Figure II.5: Les différents types de corrosion localisée [13]

La corrosion généralisée ou uniforme :

C'est le phénomène de corrosion le plus simple et le mieux connu. Il survient dans le cas d'un environnement homogène (absence de gradient de température, de pression ou de concentration le long de l'interface) et lorsque le métal lui-même présente vis à vis de cet environnement un comportement suffisamment homogène.

Cette homogénéité de comportement peut être le fait soit d'une homogénéité intrinsèque du matériau due à l'absence d'inclusions ou de défauts structuraux, soit au non sélectivité de l'environnement vis à vis de ces défauts. La vitesse de corrosion exprimée en tonnes de perte de masse par unité de surface et par unité de temps (après desquamation dans le cas d'un oxyde adhérent) ou par l'épaisseur de métal corrodé en fonction du temps. Ces deux grandeurs sont bien évidemment reliées par la masse volumique du matériau ρ considéré [14]

Taux de corrosion	Tenue
<0.05 mm/an	Excellente
0.05 à 0.130 mm/an	Bonne
0.130 à 1.25 mm/an	Satisfaisante
>1.25mm/an	Non satisfaisante

Tableau II.2 : Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion [13].

Sa vitesse est généralement facile à prévoir avec une précision suffisante pour déterminer la durée de vie probable d'un appareil

$$\text{tauxdecorrosion en (mm/an)} = \frac{\text{masseperdue (mg)} * 87.6}{\text{surface (mm}^2\text{)} * \text{densité (g/cm}^3\text{)} * \text{temps (heures)}}$$

II .5.Les capteur de corrosion :

Capteur de corrosion actif :

LUNA :

LUNA Innovation propose un capteur de corrosion actif sans contact pour la surveillance de la corrosion des avions. Il est présenté sur la FigureII.6 :



Figure II.6: Capteur de corrosion LUNA.

Le capteur LUNA est basé sur une architecture radiofréquence standard IEEE. Le système se compose d'un ensemble d'interfaces de capteurs intelligents qui contient des éléments sensibles à la corrosion (électrodes inter digitées), et au moins un processeur de réseaux [15]. L'interrogation de ce capteur à longue portée et la surveillance de l'état de la corrosion en temps réel sont les principaux avantages de ce capteur. L'inconvénient de ce capteur est qu'il utilise des composants actifs, ainsi, une batterie d'alimentation doit être intégrée dans le capteur. La corrosion étant un processus très long (plusieurs années), le capteur doit avoir une longue durée de vie. Ceci est restrictif pour ce type de capteurs quand ils sont intégrés dans la structure et potentiellement inaccessibles. Dans ce contexte, la possibilité de suivre la corrosion via une méthode passive est intéressante.[16]

Capteur de corrosion passif :

Dans la littérature, relativement peu d'études se sont intéressées aux capteurs de corrosion passifs.

- En 2011, P. Pasupathy et al [1.30]. De l'université de Texas ont proposé un capteur de corrosion totalement passif comme le présente la Figure II.7 :



Figure II.7: Capteur de corrosion passif.

Ce capteur, destiné à la surveillance de la corrosion de l'acier dans le béton armé, est basé sur un transducteur à couplage inductif. Le transducteur est exposé à l'environnement et couplé inductivement au résonateur. L'environnement affecte les propriétés du matériau du transducteur et entraîne un décalage fréquentiel de résonance du résonateur. Ce capteur fonctionne à 2,5 MHz. D'un point de vue économique, le coût de fabrication de ce capteur est faible. Néanmoins, l'interrogation de ce capteur n'est possible qu'à quelques centimètres. De même, ce capteur ne donne pas d'informations sur le niveau de la corrosion, et il existe une transition entre les deux modes (non corrodé, corrodé), l'utilisateur ne connaissant donc pas le début d'apparition d'une éventuelle corrosion [16]

Conclusion

Ce chapitre nous avons parlé sur l'influence de la corrosion dans les différents domaines ainsi que sa définition technique et son impact sur les matériaux métalliques et nous avons présenté aussi les deux principales formes ensuite nous avons abordé les types de capteurs de corrosion qui seront une introduction sur le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Simulation et interprétation

III : Introduction :

Les méthodes de simulation numériques sont de plus en plus en expansion continues dues au développement des calculateurs dont la puissance de calcul ne cesse d'augmenter. Ces méthodes permettent de modéliser des structures complexes simplifiant ainsi le calcul des grandeurs électriques et magnétiques. L'outil numérique est devenu donc indispensable pour la conception et la simulation des circuits électriques.

Dans ce chapitre nous allons voir d'une manière détaillée les étapes correspondantes de notre travail et aussi schématiser notre solution en expliquant sa conception et son principe de fonctionnement, tout d'abord nous allons nous concentrer sur la simulation du capteur utilisé pour la détection de la corrosion, nous allons faire une petite présentation sur le logiciel utilisé et citer la procédure suivie lors de notre travail puis on va présenter notre capteur avec ses caractéristiques ensuite on va passer aux résultats de la modélisation numérique en les expliquant très clairement et on finira par une conclusion qui englobe le but de notre projet.

III.1 : Présentation du logiciel Ansoft HFSS :

Le logiciel Ansoft HFSS « High Frequency Structure Simulator » permet de concevoir des structures en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis, en général cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous-région (élément) avec une fonction locale. [18]

Il aide l'utilisateur à analyser de diverses propriétés électromagnétiques des structures simulées telles que les diagrammes de rayonnement, les paramètres de dispersion S, les fréquences de résonance et les champs électromagnétiques.

C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée .il permet le calcul de :

- ✓ Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique afin de générer une solution du champ électromagnétique
- ✓ Quantité de bases dans le champ proche et le champ lointain (Rayonnement).
- ✓ Les impédances caractéristiques des ports.
- ✓ Les constantes de propagation.

III.1.1 : Un projet en HFSS :

La figure 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 :

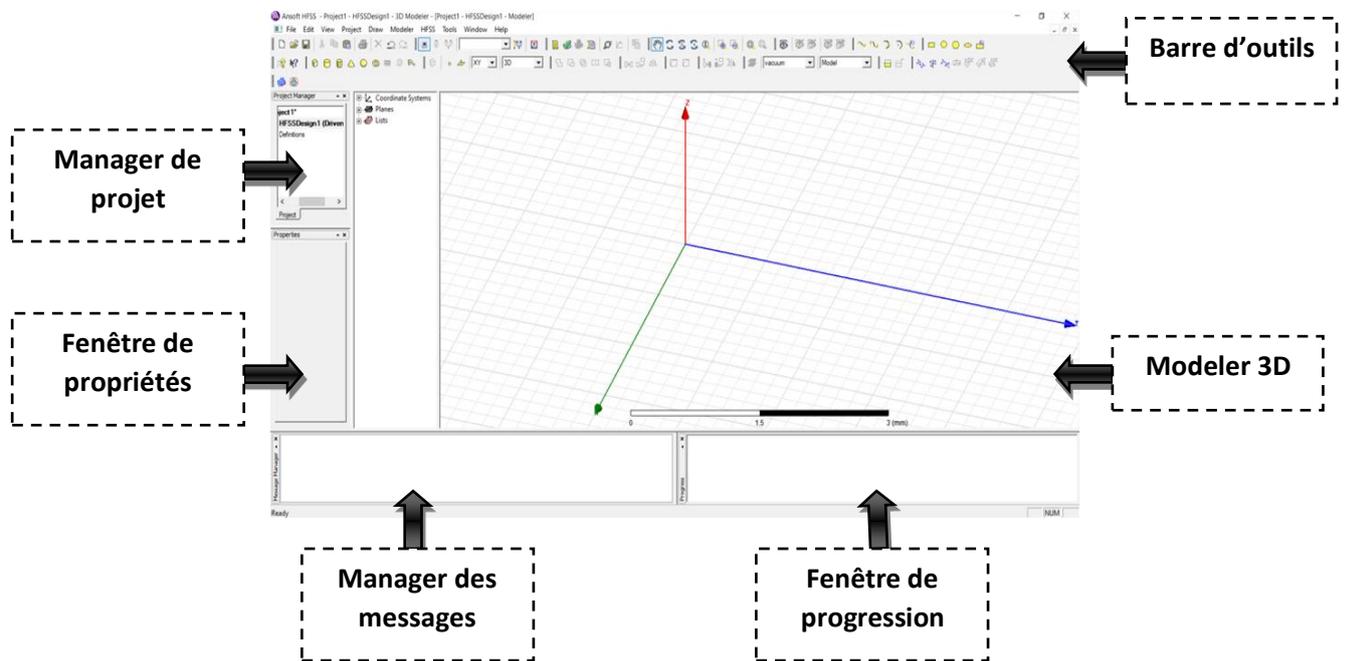


Figure III.1: la fenêtre principale du logiciel HFSS

La fenêtre d'Ansoft HFSS a plusieurs panneaux facultatifs.

- **Le Project Manager** : contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager**: permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la simulation.
- **La fenêtre de Propriétés**: pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.
- **La fenêtre de Progress**: affiche les progressions de la solution.
- **La fenêtre de 3D Modeler**: contient le modèle et son arbre pour la conception.

III.1.2 : La méthode des éléments finis (FEM) :

FEM (Finite Element Method) est une méthode numérique pour solutionner des problèmes dont la structure est suffisamment complexe. Son principe consiste à diviser l'espace d'étude (structure) en un grand nombre de petites régions (tétraèdres) appelé « élément », puis à calculer localement le champ électromagnétique dans chacun de ces éléments. Cette approche réduit considérablement la complexité de la structure. [19]

Elle utilise aussi un maillage adaptatif et du graphisme superbe qui s'apprête à tous les problèmes électromagnétiques 3D. Ansoft HFSS peuvent être utilisés pour calculer des paramètres tels que les paramètres S Y, Z, la fréquence de résonance et les champs rayonnés.[20]

III.2 : Avantages et inconvénients de la méthode

III.2.1 : Avantage :

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

III.2.2 : Inconvénients :

- Gourmande en ressources informatiques (mémoire, temps CPU...).
- Solutions approximées.
- Erreurs de calculs numériques.
- Difficultés pour modéliser un espace libre (structure fermée).

III.3 : 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 [15].

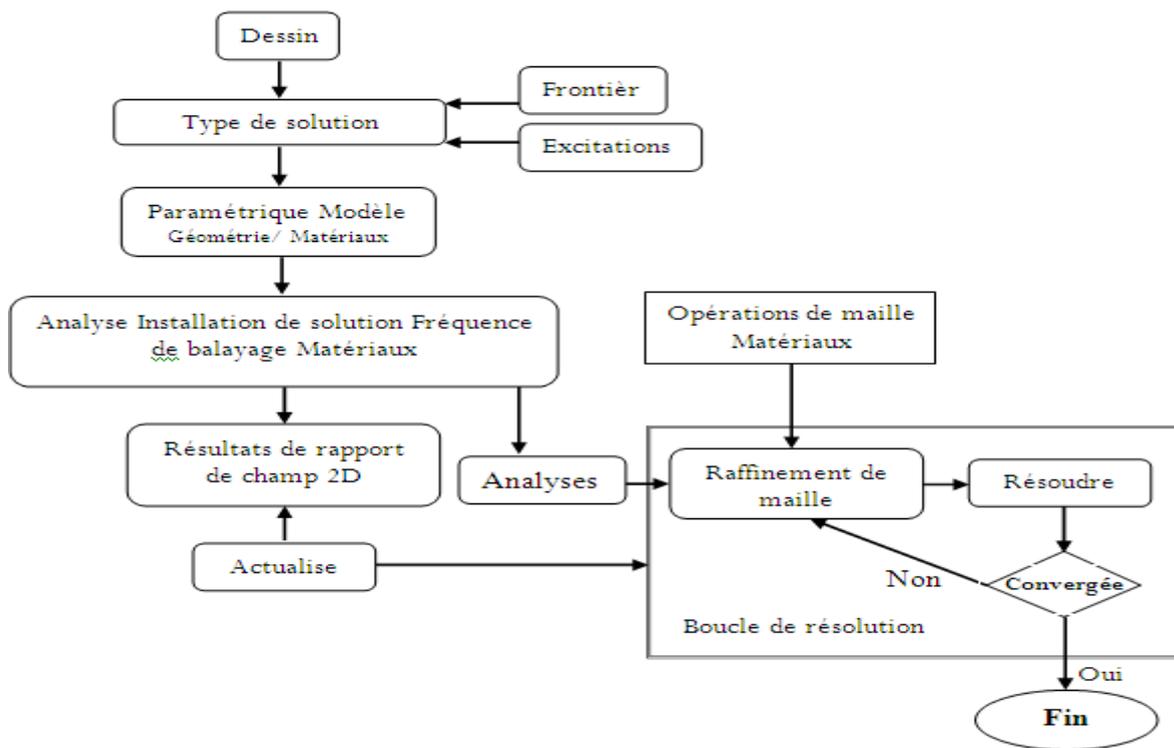


Figure III.2:procedure generale en HFSS.

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

III.4: représentation de capteur de corrosion :

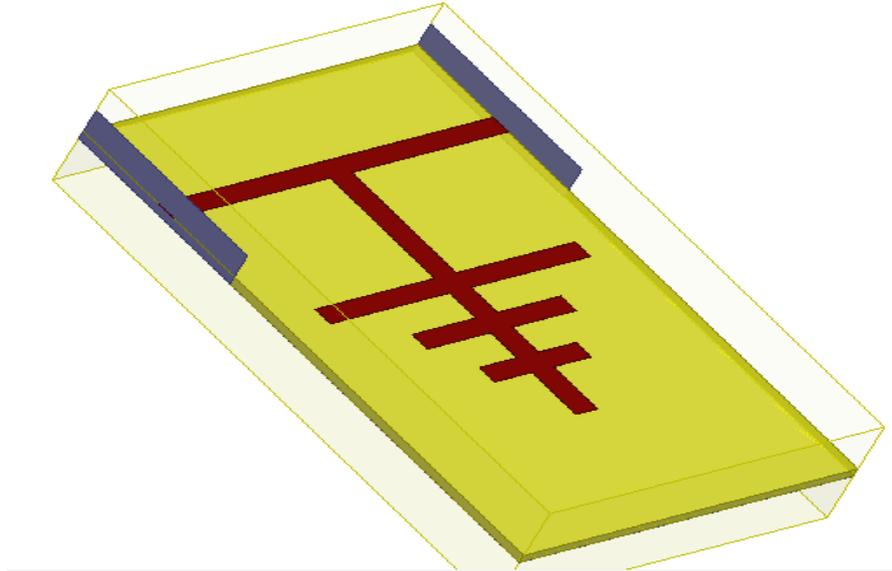
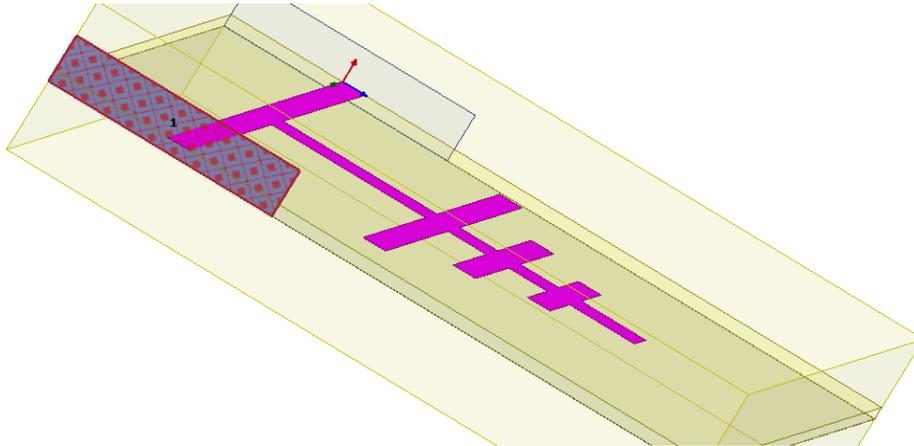


Figure III.3 : capteur de corrosion modélisé sur HFSS.

Les plans conducteurs sont en cuivre de 35 μm d'épaisseur, de conductivité égale à 58000000 S/m, de perméabilité relative de 0.99991 et une permittivité relative de 1. Leur épaisseur est égale à 35 μm .

Le substrat que l'on a choisi le époxy FR4, qui est caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4.5$, et leur pertes diélectriques $\text{tg}\delta = 0.025$, son épaisseur égale de 1.6 mm.

Pour commencer la simulation, il faut exciter la structure. Nous avons utilisé des Wave- Ports qui sont spécifiques pour des excitations planaires.



FigureIII.4 : Excitation wave-port.

III.5 : Wave port:

Le HFSS suppose que chaque port d'onde que vous définissez est connecté à un guide d'onde de longueur semi-infinie qui a la même section et les mêmes propriétés matérielles que le port. Lors de la résolution des paramètres S, HFSS suppose que la structure est excitée par les modèles de champ naturel (modes) associés à ces sections transversales. Les solutions de champ 2D générées pour chaque port d'onde servent de conditions limites à ces ports pour le problème 3D. La solution de champ finale calculée doit correspondre au modèle de champ 2D à chaque port.

Le HFSS génère une solution en excitant chaque port d'onde individuellement. Chaque mode incident sur un port contient un watt de puissance moyennée dans le temps. Le port 1 est excité par un signal d'un watt, et les autres ports sont réglés à zéro watt. Une fois la solution générée, le port 2 est réglé sur un watt, et les autres ports sur zéro watt, et ainsi de suite.

III.6: Dimensionnement géométrique de la structure :

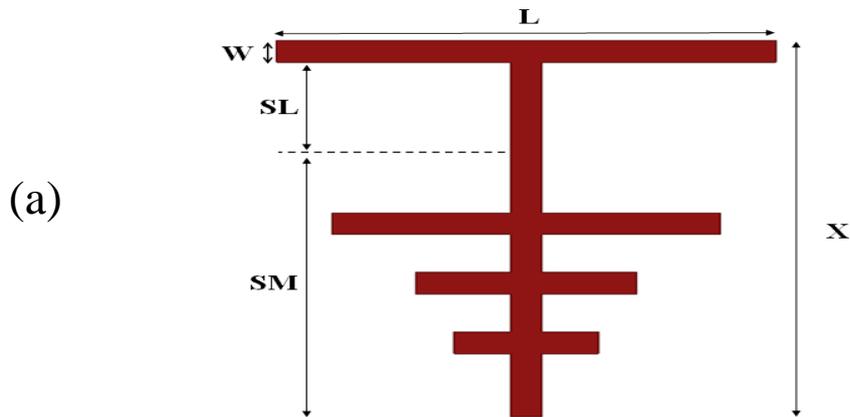


Figure III.5: le schéma de la structure en 2D

Sachant que :

SL = 2 cm la partie non corrodée.

SM = 3 cm la partie corrodée.

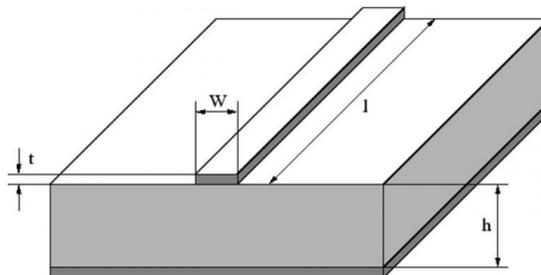


Figure III.6 : schéma d'un structure descriptif en 3D.

Les dimensions géométriques de la structure présentée précédemment sont résumées dans le tableau suivant :

W (mm)	L (cm)	X (cm)	SL (cm)	SM (cm)
2.8	4.5	5	2	3

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

Notant que :

- t : est l'épaisseur de la métallisation ($t=35 \mu\text{m}$) la masse est en cuivre.
- La taille de la structure est $4.5 \times 8.5 \text{ cm}^2$.
- Le substrat est un FR4, caractérisé par : son épaisseur $h=1.6\text{mm}$ et La permittivité relative $\epsilon_r=4.5$; pertes diélectrique $\text{tg}\delta=0.025$.
- Les ports ont une impédance égales à 50Ω .

III.7 : Résultats de La modélisation numérique

La simulation en trois dimensions donne les paramètres S en fonction de la fréquence (voir l'annexe), en remarque dans la figure au dessous que la fréquence de résonance est égale à 3.7 GHz.

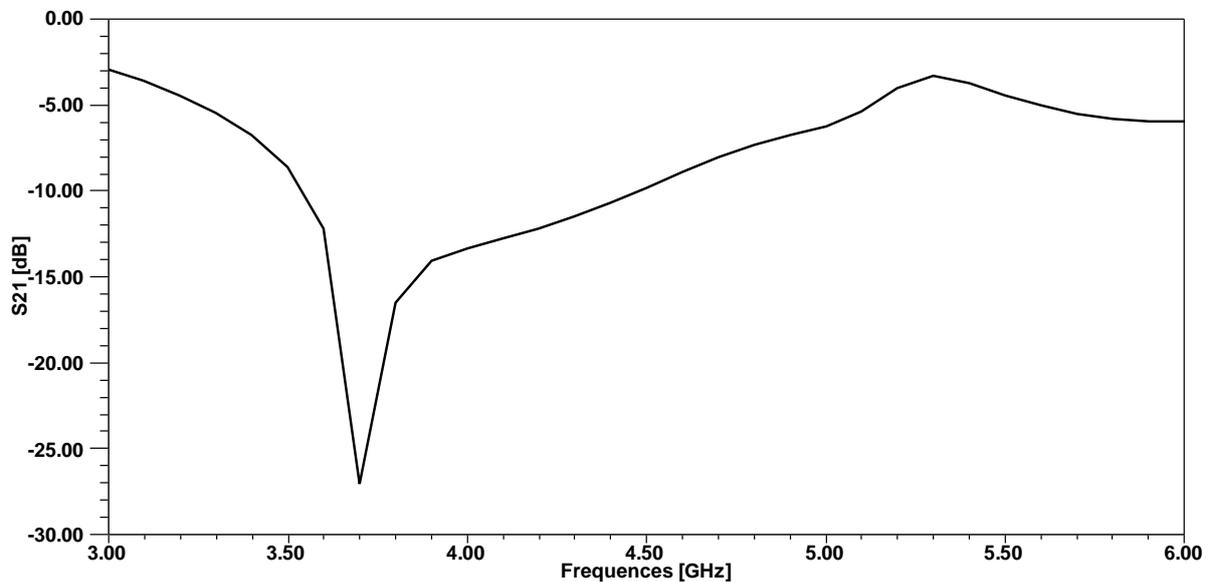


Figure III.7 : Paramètres S su capteur proposé.

Si on a fabriqué le capteur ; on aurait plongé dans l'eau pendant plus de 4 mois pour créer la corrosion accéléré, mais on n'a pas pu le faire, c'est pour cela on a fait des simulations de composant corrodé sur le logiciel HFSS.

Le stub de la longueur Long est divisé en deux partie SL et SM comme montrer dans la figure; La partie supérieure notée SL, de 2 cm de longueur, est protégée contre la corrosion,

tandis que la partie inférieure du stub, notée SM, mesurant 3 cm, est trempée dans l'eau pour exposer à la corrosion.

La partie protégée reste intacte tandis que la partie exposée devient verte orangé. Le changement de couleur prouve que le cuivre a été corrodé.

Les résultats de simulation de la corrosion sont représentés sur la figure ci-dessous :

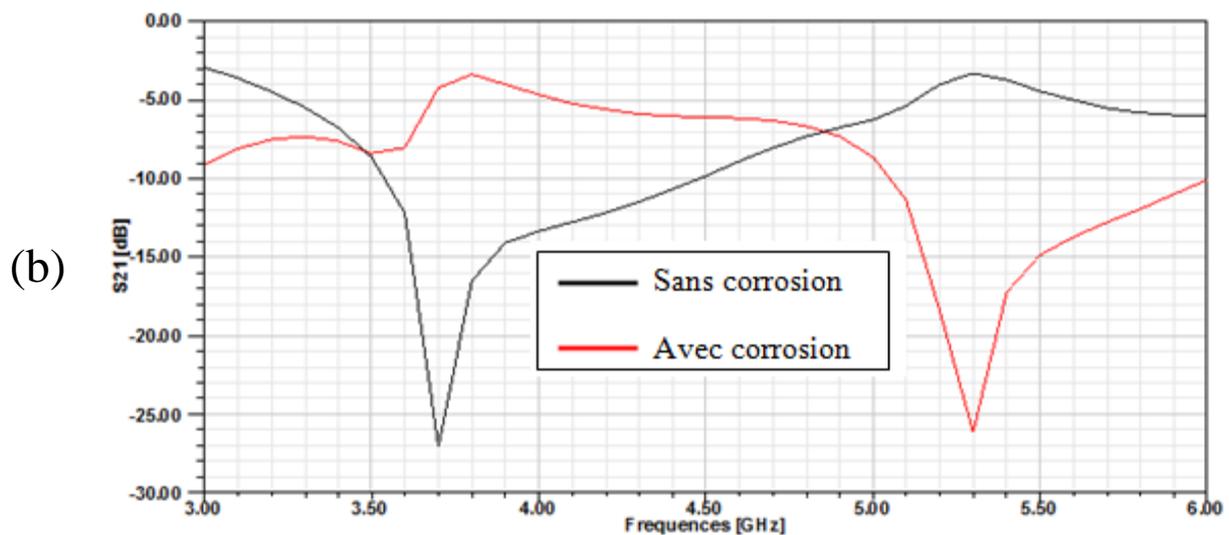


Figure III.8 : Le décalage de la fréquence de résonance provoqué par

Le processus de corrosion.

Nous présentons dans la figure (a) un résonateur stub circuit ouvert en cuivre, d'une épaisseur de 35 μm , sur un substrat FR4 d'une permittivité de 4.5, d'une perte diélectrique $=0.025$ et une épaisseur de 1.6 mm. Afin d'obtenir une structure adaptée à 50 Ω , la largeur du ruban conducteur est fixée à 1.5 mm. Le stub résonateur est divisé en deux parties (SM et SL) comme le montre la Figure (a). La partie supérieure du stub, notée SL, de 2 cm de long, est protégée contre la corrosion, tandis que la partie inférieure du stub, notée SM, mesurant 3 cm, est soumise à la corrosion. Pour étudier la réaction du capteur à la corrosion, nous avons simulé l'expérience dans le simulateur de structure haute fréquence HFSS.

Au cours de l'exposition, la partie protégée reste intacte tandis que la partie exposée devient verte orangé. Le changement de couleur indique la transformation du cuivre en des produits de corrosion relativement isolants. D'un point de vue électrique, la corrosion conduit donc à une variation de la longueur initiale du stub et par conséquent à un décalage de fréquence de résonance. La courbe en bleu indique une fréquence de résonance de $F_{r1} = 3.7$ GHz dans un milieu non corrodé .

Après corrosion à l'humidité, la mesure de la transmission du signal du résonateur permet d'obtenir un décalage fréquentiel vers $F_{r2} = 5.3$ GHz présenté par la courbe rouge.

III.8 : conclusion :

L'objectif de cette expérience a été de développer des fonctions hyperfréquences sensibles à la corrosion des métaux afin de surveiller la corrosion des édifices et des infrastructures .La fonction hyperfréquence sera alors constituée du même métal que la structure à étudier.

Pour cela, nous avons étudié dans cette partie la variation de la propagation des ondes électromagnétiques au sein d'une ligne microruban et d'un résonateur lorsque le métal constituant ces fonctions est exposé à la corrosion. Pour la ligne microruban, l'impact de la corrosion du métal sur la propagation des ondes RF est réalisé en considérant les pertes de transmission RF. Les résultats obtenus ont été ensuite appliqué à un résonateur stub pour réaliser le suivi de la corrosion par une variation fréquentielle.

La première structure réalisée est une ligne microruban dont le ruban est fabriqué à partir d'une couche mince d'un élément sensible à la corrosion (dans notre cas le cuivre). Dans ce cas, la corrosion de la ligne se traduit par une variation d'amplitude du fait de l'apparition de pertes expliquées principalement par l'effet de peau ou la création de défauts.

Une deuxième structure hyperfréquence a été élaborée en se basant sur un stub (circuit ouvert) qui permet de suivre le processus de la corrosion par variation de fréquence. Comme le cas de la ligne microruban, cette structure nous permet de distinguer entre la corrosion uniforme et localisée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La corrosion des matériaux représente un enjeu socio-économique majeur. Sa détection et le suivi de son évolution constituent un défi pour la recherche appliquée.

Après avoir rappelé le comportement en corrosion dans les chapitres précédents on a réalisé une structure bibliographique des procédés de suivi de la corrosion habituellement à base de la technologie micro ruban.

La première structure réalisée est une ligne micro ruban dont le ruban est fabriqué à partir d'une couche mince d'un élément sensible à la corrosion. Dans ce cas, la corrosion de la ligne se traduit par une variation d'amplitude du fait de l'apparition de pertes expliquées principalement par l'effet de peau ou la création de défauts. Comme nous le montrons, la caractérisation dans une bande de fréquence allant jusqu'à 4 GHz permet de différencier les différents types de corrosion. Le fait de travailler à une seule fréquence autorise néanmoins le monitoring de la dégradation du matériau.

Une deuxième structure hyperfréquence a été élaborée en se basant sur un stub (circuit ouvert) qui permet de suivre le processus de la corrosion par variation de fréquence. Comme le cas de la ligne micro ruban, cette structure nous permet de distinguer entre la corrosion uniforme et localisée.

« Les objectifs que nous nous étions fixés au début de ce travail ont été atteints », à savoir, mettre en place un capteur de corrosion :

- ♣ Capable de fournir des informations exploitables à partir d'une corrosion uniforme ou localisée
- ♣ Passif énergétiquement.

Ce travail nous a permis d'étudier la réponse du résonateur de la corrosion et d'évaluer les changements induits par la corrosion sur la propagation des micro-ondes transmises par une ligne micro ruban.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Différents Types De Capteurs, Capteurs Et Actionneurs En Instrumentation, Chapitre 2,P11
- [2] Moussouni Mohamed Akli, Mr. Megherbi Mohamed, Professeur, Ummto, Etude D'un Capteur De Gaz A Base De Tco: Cas Du Sno2 Obtenu Par Apcvd ,Memoire De Magister, 27/05/2010,P2
- [3] DadamoussaSafaMakhloufi Saida, M. Belhadri Abdelkrim, Analyse Et Conception Des Filtres Passe-Bande Microruban Pour Les Applications Ulb, 25/06/2018,P33
- [4] Béatrice Espana ,M Han Vu Thien ,Diplome D'ingenieur C.N.A.M En Electronique,Conservatoire National Des Arts Et Metiers Centre Regional Midi-Pyrenees ,2004, P (19,20)
- [5] M.A. Bousmaha, Analyse Et Conception De Nouvelles Structures De Filtres Larges Bandes Pour Des Applications En Télécommunications, Thèse De Magister Télécommunications Et Informatique Spatiales, Université De Tlemcen, 2011.
- [6] Jia-Sheng Hong. "Microstrip Filters For Rf/Microwave Applications", Second Edition, 2011
- [7]. Dr. H. Bensabra. Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel 2016.
- [8]. G. Daufin, J. Talbot. HAL « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. 1ère partie Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. Le lait, INRA édition. 1971. pp 375-398.
- [9]. D. William, Jr. Callister. Science et Génie des matériaux. Editeur 2001. pp 505.50.
- [10] Faiza K., Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz), Mémoire de Magister, Université de Boumerdès (Algérie), 2008.
- [11] GERARD B, HENRI M., CORROSION DES METAUX ET ALLIAGES, HERMES SCIENCE PUBLICATIONS, PARIS, 2002

- [12] CORROSION DES METAUX, ENSPM FORMATION INDUSTRIE - IFP TRAINING, FRANCE, 2005.
- [13] HICHAM E., ETUDE DE L'INHIBITION DE LA CORROSION DE L'ACIER DOUX AU CARBONE EN MILIEU ACIDE ORTHOPHOSPHORIQUE PAR UN ANTIBIOTIQUE ORGANIQUE, MEMOIRE D'ETUDES SUPERIEURES APPROFONDIES, UNIVERSITE DE OUJDA (MAROC), 2000.
- [14]. H.Mamache. " Etude du problème de corrosion au niveau des installations du surface ». Mémoire de fin de période de mise en situation professionnel Ingénieur Exploitation. IAP. 2017
- [15] J. Demo, et al., "Wireless corrosion monitoring for evaluation of aircraft structural health", Aerospace Conference, 3-10 March 2012.
- [16]Yasri, M. (2016). *Capteur de corrosion passif et sans contact* (Doctoral dissertation, Brest).
- [18] D.M.Poza.S.MVoda . « Arigorousanalysis of micro striplinefedpatch Antenna »,IEEE Transaction on Antenna and Propagations Vil AP-35 ,N 12.12/1987.
- [19] TatsuoItoh. "Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures".John Wiley and Sons. 1989.
- [20] J. R.Mosig ,F.Gardiol, "Technique analytique et numériques dans l'analyza des antennes microruban ",ANN .Télécom,40 ,n°7-8 ,1985.

Webographie

Webographie

[17] :[HTTPS://PHYSIQUE-CHIMIE-COLLEGE.FR/COURS-3EME-CHIMIE/LA-CORROSION-DES-METAUX/](https://physique-chimie-college.fr/cours-3eme-chimie/la-corrosion-des-metaux/)

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons considéré l'interaction entre une onde électromagnétique et un matériau soumis à la corrosion. Les mesures expérimentales menées sur des dispositifs basés sur des lignes micro-ruban et sur un résonateur ont été comparées à des simulations HFSS. La caractérisation hyperfréquence de ces dispositifs donne des informations sur la corrosion : perte de métal, la présence de défauts, Ces résultats nous ont ensuite conduits au développement d'un capteur passif sans contact basé sur la technologie micoruban. Ce capteur de corrosion passif sans contact, permet de suivre le processus de corrosion, de détecter la présence de défauts et / ou de coupures sur la piste sensible.

Mots clés : Corrosion, Capteur passif , micro-ruban, HFSS

الملخص:

في هذه المدكرة نظرنا إلى التفاعل بين الموجة الكهرومغناطيسية والمادة المعرضة للتآكل. تمت مقارنة القياسات التجريبية التي أجريت على أجهزة تعتمد على خطوط ميكروروبان وعلى مرنان بمحاكاة HFSS. يوفر توصيف الميكروويف لهذه الأجهزة معلومات حول التآكل: فقدان المعادن ، وجود عيوب ، إلخ. قادتنا هذه النتائج بعد ذلك إلى تطوير مستشعر سلبي بدون تلامس يعتمد على تقنية الشريحة الدقيقة. يتيح مستشعر التآكل السلبي غير المتصل هذا إمكانية متابعة عملية التآكل ، لاكتشاف وجود أخطاء و / أو قطع على المسار الحساس.

الكلمات المفتاحية:.

Abstract:

In this dissertation, we considered the interaction between an electromagnetic wave and a material subjected to corrosion. The experimental measurements carried out on devices based on microstrip lines and on a resonator were compared to HFSS simulations. The microwave characterization of these devices provides information on corrosion: loss of metal, the presence of defects, etc. These results then led us to the development of a passive contactless sensor based on micor strip technology. This non-contact passive corrosion sensor makes it possible to follow the corrosion process, to detect the presence of faults and / or cuts on the sensitive track.

Keywords: