

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université de BLIDA1**



**Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales**

**Département de navigation aérienne**

**Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme de  
Master**

**En**

**Communication Navigation Surveillance-Air Traffic Management**

**THEME**

**Caractérisation électromagnétique dans la  
bande X de matériaux RAM**

**Présenté par :**

**YAHIAOUI Mohammed Amine**

**KHETTABI Amar**

**Encadré par :**

**M<sup>me</sup> : F. Otmane**

**Année universitaire : 2018- 2019**

# Dédicace

**Nous dédions notre modeste travail à :**

**Nos parents, dont leurs sacrifices, aides et patiences ont été l'essence de  
notre réussite. Sans eux, nous ne serions pas ce que nous sommes  
aujourd'hui.**

**Nos enseignants et toute la promotion 2014 - 2015 de l'institut  
d'aéronautique et des études spatiales, en particulier la promotion CNS ATM.**

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier tout d'abord ALLAH qui nous a donné la capacité de terminer ce travail,

Nous tenons à remercier nos parents respectifs, nos frères et sœurs sans oublier nos amis,

Nous remercions notre promotrice M<sup>me</sup> Fadhéla OTMANE pour avoir dirigé nos travaux. Merci pour vos échanges scientifiques et vos conseils,

Nous remercions également tous les membres du jury pour nous avoir honorés par leur présence et pour avoir accepté d'évaluer ce travail de mémoire,

Nous tenons aussi à remercier nos enseignants et toute la promotion 2014 - 2015 de l'institut d'aéronautique et des études spatiales et spécialement la promotion de la spécialité CNS/ATM,

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

لقد أدى اختراع الرادار الذي بات قادرا على كشف مختلف أنواع الأهداف داخل مجال تغطيته إلى ظهور الحاجة إلى التخفي، من أجل أداء مهمات خاصة

في هذا العمل ، سوف ندرس إحدى هذه التقنيات وهي المواد التي تمتص موجات الرادار ، بناءً على الخصائص الكهربائية، المغناطيسية والهيكليّة لهذه المواد، تركيباتها و أبعادها.

### **Abstract**

The invention of the radar, which made it possible to detect the different types of targets in its area of coverage, led to the need for stealth, for the accomplishment of special missions.

In this work, we will study one of these techniques which is the materials that absorb radar waves (RAM), based on electrical, magnetic and structural parameters of these materials, their compositions and their dimensions.

### **Résumé**

L'invention du radar, qui a permis de détecter les différents types de cibles dans sa zone de couverture, a conduit au besoin de furtivité, pour l'accomplissement des missions spéciales.

Dans ce travail, nous étudierons l'une de ces techniques qui est les matériaux qui absorbent les ondes radars (RAM), en se basant sur paramètres électriques, magnétiques et structurels de ces matériaux, leurs compositions et leurs dimensions

# Liste des abréviations

RF : Radio Fréquence

SER : Surface Equivalente Radar

RAM : Radar Absorbing Materials ( Matériaux Absorbants les ondes Radar )

RCSR : Radar Cross Section Réduction ( Réduction de la surface équivalente radar )

NRW : Nicolson-Ross-Weir

E : Energie

# Liste des figures

Figure 1.1.Principe de fonctionnement radar. ....	5
Figure 1.2 : Plan du lockheed F-117. ....	11
Figure 1.3.a : Avion D.H. 98 Mosquito avec revêtement RAM. ....	12
Figure 1.3.b : Avion F-117 Nighthawk avec revêtement RAM. ....	12
Figure 2.1 :pourcentage de chaque matériau constituant la structure d'un avion. ....	18
Figure 2.2 : Mécanismes de soudure – fracture lors d'une mécanosynthèse. ....	23
Figure 2.3 : Echantillon de Fer élémentaire (avant broyage). ....	25
Figure 2.4.a : Echantillon de Fer broyé (durée : 7h). ....	25
Figure 2.4.b : Echantillon de Fer broyé (durée : 36h). ....	25
Figure 2.5 : Elaboration des nanocomposites. ....	26
Figure 2.6 : micrographe MEB de nanocomposite à base de Fer broyé durant 36 h. ....	27
Figure 2.7 schema sur la méthode de réflexion en espace libre. ....	29
Figure 2.8 schema de mesure bistatique en espace libre (incidence normale). ....	30
Figure 2.9 : Schéma du dispositif de mesure en cavité résonnante ....	31
Figure 2.10 :schéma de répartition des paramètres S ....	32
Figure 2.11 : Les deux types d'analyseur de réseaux ....	34
Figure 3.1 : Schéma de mesure en guide d'onde. ....	36
Figure 3.2 : Schéma de principe d'une plaque, placée dans un espace libre, irradiée par une onde plane polarisée linéairement et normalement incidente sur l'échantillon. ....	38
Figure 3.3 : Paramètres $S_{11}$ mesurés à différentes compositions. ....	41
Figure 3.4 : Paramètres $S_{22}$ mesurés à différentes compositions. ....	42
Figure 3.5 : Paramètres $S_{21}$ mesurés à différentes compositions. ....	43
Figure 3.6 : Paramètres $S_{12}$ mesurés à différentes compositions. ....	43
Figure 3.7 : Permittivité relative diélectrique à différentes compositions. ....	44
Figure 3.8 : Pertes diélectriques à différentes compositions. ....	45
Figure 3.9 : Perméabilité relative magnétique à différentes compositions. ....	46
Figure 3.10 : Pertes magnétiques à différentes compositions. ....	47
Figure 3.11 : Paramètres $S_{11}$ mesurés à différentes épaisseurs. ....	48
Figure 3.12 : Paramètres $S_{22}$ mesurés à différentes épaisseurs. ....	48
Figure 3.13 : Paramètres $S_{21}$ mesurés à différentes épaisseurs. ....	49
Figure 3.14 : Paramètres $S_{12}$ mesurés à différentes épaisseurs. ....	49
Figure 3.15 : Permittivité relative diélectrique à différentes épaisseurs. ....	50
Figure 3.16 : Pertes diélectriques à différentes épaisseurs. ....	50
Figure 3.17 : Perméabilité relative magnétique à différentes épaisseurs. ....	51
Figure 3.18 : Pertes magnétiques à différentes épaisseurs. ....	51
Figure 3.19 : Tangente des pertes diélectriques à différentes épaisseurs. ....	52
Figure 3.20 : Tangente des pertes magnétiques à différentes épaisseurs. ....	52

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 RADAR ET TECHNIQUES DE REDUCTION DE LA SER.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Fonctionnement radar .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Définition .....	4
1.2.2. Principe général.....	4
1.2.3. Equation radar .....	5
1.2.4. Surface Equivalente Radar (SER) .....	9
<b>1.3. Techniques de réduction de la SER .....</b>	<b>9</b>
1.3.1. Annulation active.....	10
1.3.2. Annulation passive.....	10
1.3.1.1. <i>Technique de mise en forme</i> .....	10
1.3.1.2. <i>Technique de revêtement</i> .....	11
<b>1.4. Matériaux d'absorption radar.....</b>	<b>11</b>
1.4.1. Mécanisme de fonctionnement RAM .....	13
1.4.2. Types de RAM.....	14
1.4.2.1. Matériaux quart d'onde.....	14
1.4.2.2. Matériaux absorbants par transformation d'énergie .....	14
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE2 TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Matériaux Nanocomposites.....</b>	<b>17</b>
2.2.1. Définition d'un composite .....	17
2.2.2. Types des matériaux composites .....	19
2.2.3. Définition d'un nanocomposite .....	19
2.2.4. Procédés d'élaboration.....	20
2.2.4.1. Procédés d'élaboration d'un composite .....	20
2.2.4.1.1. Polymérisation .....	20
2.2.4.1.2. Mélange .....	21
2.2.4.1.3. Mise en forme.....	21
2.2.4.2. Résine .....	21
2.2.4.3. Procédés d'élaboration des poudres nanostructurées .....	22
2.2.4.3.1. Procédés physiques.....	22
2.2.4.3.2. Procédés chimiques .....	22
2.2.4.3.3. Procédés mécaniques .....	23
2.2.4.4. Caractérisation structurale des poudres nanostructurées.....	24

<b>2.3. Caractérisation Electromagnétique .....</b>	<b>27</b>
2.3.1. Définition.....	27
2.3.2. Méthodes de caractérisation électromagnétique .....	28
2.3.2.1. Méthodes de l'espace libre .....	28
2.3.2.2. Méthodes en cavité résonante.....	30
2.3.2.3. Méthodes en guide d'onde rectangulaire .....	31
<b>2.4. Matrice de dispersion S .....</b>	<b>32</b>
2.4.1. Utilisation des paramètres S .....	33
2.4.2. Analyseur de réseaux .....	33
<b>2.5. CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>
<b>CHAPITRE 3 EXTRACTION DES PARAMETRES ELECTROMAGNETIQUES .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2. Procédure Nicholson-Ross-Weir .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3. Résultats et Interprétation .....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Caractérisation électromagnétique en fonction de la composition.....	41
3.3.2 Caractérisation électromagnétique en fonction de l'épaisseur .....	47
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>56</b>

# INTRODUCTION GENERALE

Les signaux radar sont réfléchis par les surfaces métalliques des aéronefs. Ce phénomène est fondamental à la détection radar. Mais dans certaines situations, il est important qu'un aéronef ne soit pas détecté par un radar pour l'accomplissement d'une mission particulière. Les techniques de réduction de la détectabilité au radar sont fondées sur la forme et le revêtement de l'aéronef par des matériaux d'absorption (RAM) qui agissent comme absorbants des ondes radar.

Les matériaux destinés à l'industrie aéronautique doivent répondre à différentes exigences à savoir la légèreté, la durabilité, la multifonctionnalité et la résistance à la corrosion, la dégradation, la haute température et aux changements météorologiques. Dans ce contexte, les matériaux composites ont trouvé leur application dans le revêtement des aéronefs à cause de la maîtrise de leurs propriétés. Vers les années 80, les nanomatériaux ont apparus. Ce sont des matériaux variant à l'échelle nanométrique et qui se présentent sous diverses formes avec des propriétés physiques et mécaniques améliorées. De nos jours la génie des RAM s'impose comme un champ d'application potentiel des nanomatériaux.

Lors de la conception d'un RAM, il est nécessaire de choisir les propriétés diélectriques et magnétiques ainsi que l'épaisseur pour minimiser la réflexion dans une gamme de fréquences la plus large possible. Dans cette thématique s'inscrit ce travail de mémoire de Master qui traite la caractérisation électromagnétique dans la bande X de matériaux RAM à base de poudres métalliques nanostructurées. Le mémoire est organisé en trois chapitres essentiels :

- Dans le premier chapitre, on rappelle sur l'équation radar qui explicite le paramètre SER (Surface Equivalente Radar), les techniques de réduction de la SER, la technique de réduction par revêtement avec des matériaux RAM sera considérée avec intérêt ainsi que les mécanismes qui gouvernent l'absorption des ondes radar,
- Dans le deuxième chapitre, nous résumons toutes les techniques expérimentales qui peuvent être mises en jeu pour le choix, l'élaboration et le test du

comportement d'un RAM soumis à l'action d'un champ électromagnétique dans la bande X.

- Le troisième chapitre sera consacré à l'algorithme qui permet l'extraction des paramètres électromagnétique du matériau sous test. Les résultats obtenus seront également commentés.
- Le mémoire sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre 1**

## **Radar et Techniques de Réduction de la SER**

## **1.1. Introduction**

Le radar est une branche de l'histoire de l'électronique qui devient un des fondements de la stratégie militaire du XX<sup>e</sup> siècle. L'idée de repérer un objet à distance (la télédétection) est née au début de ce siècle quand Christian Hülsmeier applique les lois de l'électromagnétisme de Maxwell et utilise les ondes électromagnétiques découvertes par Hertz dans un précurseur du radar.

Le radar a joué un rôle crucial dans le conflit de la seconde guerre mondiale, et a probablement eu une contribution plus importante pour la victoire des alliés que la bombe atomique. L'expérience acquise pendant le conflit par un grand nombre de chercheurs a permis d'élargir l'utilisation du radar à d'autres domaines que le militaire. On le retrouve directement ou indirectement aujourd'hui dans l'aviation civile, le contrôle maritime, la détection météorologique, les détecteurs de vitesse de nos routes et même en médecine.

Lors de la conception d'un système radar ou d'un avion, plusieurs paramètres sont à étudier. La surface équivalente radar (SER) qui est un paramètre spécifique à un quelconque avion influant grandement sur sa susceptibilité d'être détecté par un radar. Représentée dans une équation mathématique, la SER est fonction de nombreux facteurs. Il est devenu courant aujourd'hui de mesurer la SER en plein air ou dans une chambre anéchoïque à l'aide de radars ou bien en utilisant des programmes de simulation.

## **1.2. Fonctionnement radar**

### **1.2.1. Définition**

Le terme RADAR est l'acronyme de l'expression anglaise "RADio Detecting And Ranging". Cet acronyme a été convenu par un accord adopté en 1943 par les puissances alliées de la seconde guerre mondiale et a ensuite été accepté par la communauté internationale. Il fait référence à la détection et la localisation d'objets en utilisant des moyens radio.

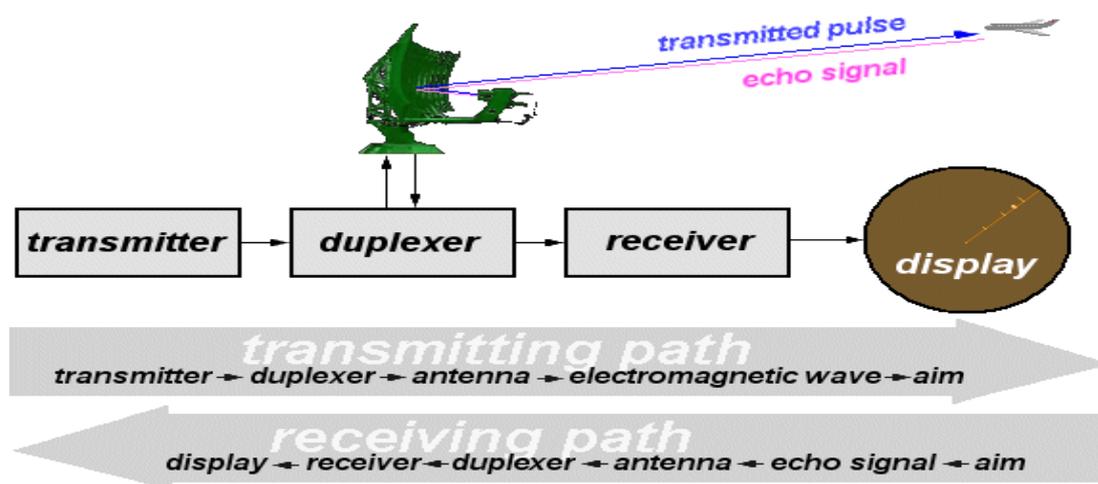
### **1.2.2. Principe général**

Le radar est la technique la plus utilisée pour la détection et la poursuite d'un avion. Bien que ce soit un outil indispensable en gestion du trafic aérien, il constitue un problème

pour les opérations offensives qui nécessitent que des avions atteignent leurs cibles et s'éloignent après, sans être détectés.

Le principe général de fonctionnement radar est très similaire à celui de la réflexion des ondes sonores. Comme illustré sur la figure 1.1, le radar implique la génération et l'émission d'une onde électromagnétique qui est rayonnée dans l'espace par une antenne émettrice. A la rencontre d'un avion, l'onde électromagnétique se réfléchit et une partie de l'énergie réfléchie est captée par une antenne réceptrice. Cette énergie renvoyée s'appelle écho, tout comme dans la terminologie sonore. Les radars utilisent l'écho pour déterminer la direction, la distance, l'altitude et la vitesse de l'avion après un traitement adéquat dans un récepteur approprié. La fréquence de l'énergie électromagnétique utilisée par le radar n'est pas affectée par l'obscurité et pénètre également dans le brouillard et les nuages.

Les radars modernes peuvent extraire beaucoup plus d'autres informations du signal d'écho telles que la nature de la structure et la taille de la cible. Les avions conventionnels exploités par les compagnies aériennes sont facilement détectés par les radars parce que les métaux utilisés dans la structure de ces avions sont de bons réflecteurs des ondes électromagnétiques, les composites sont également détectables par le radar mais pas toujours aussi facilement que les métaux.



**Figure 1.1.Principe de fonctionnement radar.**

### 1.2.3. Equation radar

Un avion illuminé par une onde radar réfléchit l'énergie électromagnétique dans beaucoup de directions et la portion détectable par le récepteur radar est généralement celle

réfléchi dans la direction où elle a été rayonnée à l'origine. L'équation radar constitue un bilan des énergies sur le trajet aller-retour d'une onde électromagnétique émise par un radar.

Dans ce qui suit nous allons établir l'équation radar en montrant l'influence de chaque paramètre intervenant dans cette équation sur la fonction radar.

Un signal à haute fréquence émis par une antenne isotrope est rayonné uniformément dans l'espace. Les zones d'égale densité de puissance forment des surfaces sphériques ( $A = 4\pi \cdot R^2$ ) concentriques autour de l'antenne. Lorsque le rayon de la sphère augmente, une même quantité d'énergie sera diffusée sur une plus grande surface sphérique. Cela revient à dire que la densité de puissance, dans une direction donnée, diminue lorsque la distance de l'émetteur augmente. La densité d'énergie  $dE$  par unité de surface à une distance  $D$  de l'émetteur s'écrit alors :

$$\frac{dE}{ds} = \frac{E_e}{4\pi D^2} \quad (1.1)$$

Si l'antenne n'émet que sur une portion de la sphère (pour une puissance d'émission constante), la densité de puissance augmente dans la direction de l'émission. Cette caractéristique est appelée gain de l'antenne nommée  $G$ . Ce gain exprime la concentration de l'énergie émise dans une seule direction. La densité d'énergie devient :

$$\left(\frac{dE}{ds}\right)_1 = \frac{E_e}{4\pi D^2} G \quad (1.2)$$

En radar, on utilise des antennes radar qui génèrent des lobes étroits avec un gain pouvant aller jusqu'à 30 à 40 dB (Antenne parabolique ou antenne à réseau de phases). La détection d'une cible dépend de la quantité d'énergie réfléchi qui est captée par l'antenne du radar. Cette dernière est déterminée par la surface équivalente radar  $\sigma$  :

$$E_1 = \sigma \left(\frac{dE}{ds}\right)_1 = \frac{E_e G}{4\pi D^2} \sigma \quad (1.3)$$

Avec  $E_1$  l'énergie captée par une cible à une distance  $D$  du radar.

On entend par surface équivalente radar la surface avion éclairée par le rayonnement radar, elle dépend de la forme de la cible, la nature de ses matériaux ainsi que de la longueur d'onde des angles d'incidence et de réflexion du rayonnement et même de la polarisation. Elle varie avec les dimensions de la cible et l'angle de vue par rapport au radar. En réalité la cible est

une composition de surfaces élémentaires. Quand elle est en mouvement, sa surface équivalente évolue à chaque instant donnant une réponse variable.

La densité d'énergie réfléchiée par la cible qui arrive au niveau du radar en écho est calculée en considérant la cible comme source isotropique émettant vers le radar :

$$\left(\frac{dE}{ds}\right)_2 = \frac{E_1}{4\pi D^2} = \frac{E_e G \sigma}{(4\pi D^2)^2} \quad (1.4)$$

En réception, l'énergie globale captée par l'antenne radar  $E_r$  dépend de la surface effective antenne :

$$E_r = A \left(\frac{dE}{ds}\right)_2 = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \left(\frac{dE}{ds}\right)_2 \quad (1.5)$$

$$E_r = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \frac{E_e G \sigma}{(4\pi D^2)^2} = \frac{E_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4} \quad (1.6)$$

La notion de surface effective de l'antenne découle du fait qu'aucune antenne ne fonctionne sans pertes (son efficacité n'est jamais de 100%). Dans la réalité, la surface effective de l'antenne est donc toujours inférieure à sa surface géométriquement mesurée, et ce d'un facteur de 0,6 à 0,7.

A la fin on introduit un coefficient de pertes  $L$  :

$$E_r = \frac{E_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L} \quad (1.7)$$

Le facteur  $L$  regroupe les pertes suivantes :

- $L_D$  = atténuations internes dans les circuits de l'émetteur et du récepteur (pertes d'énergie par bruit thermique sur les composants électroniques),
- $L_f$  = pertes dues aux fluctuations de la surface équivalente,
- $L_{Atm}$  = pertes atmosphériques lors de la propagation de l'onde électromagnétique en direction de la cible (pertes d'énergie par diffusion de l'onde sur des particules en suspension dans l'atmosphère : pluie, neige, etc...).

D'où on exprime la distance cible – radar par :

$$D = \left(\frac{E_e G^2 \lambda^2 \sigma}{E_r (4\pi)^3 L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.8)$$

Avec

$D$  : distance cible - radar [m]

$E_c$  : puissance émise par le radar [W]

$\lambda$  : longueur d'onde radar  $\lambda = \frac{c}{f}$  [m]

$\sigma$  : surface équivalente radar [m<sup>2</sup>]

$G$  : gain de l'antenne.

On constate que la portée du radar est en proportionnalité directe avec le gain de l'antenne  $G$ , la longueur d'onde  $\lambda$  et la surface équivalente  $\sigma$ , et en proportionnalité inverse avec la sensibilité du radar  $E_{r \min}$  (puissance minimale reçue par une cible et autorisant sa détection).

Cependant, le signal reçu par le récepteur radar est un signal composite de la superposition de signaux utiles, signaux indésirables et de bruit. Le problème du radar consiste donc à détecter le signal utile qui correspond aux cibles désirables. Pour cela il y'a un filtre optimal qui maximise le rapport signal/bruit (S/B) :

$$\frac{S}{B} = \frac{E_r}{b} \quad (1.9)$$

Avec,  $b$  correspondant à l'énergie du bruit.

Si l'on considère que le bruit thermique ( $b = FkT_0$ ) on aura :

$$\frac{S}{B} = \frac{E_r}{b} = \frac{P_c \tau}{F k T_0} \cdot \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L} \quad (1.10)$$

Et

$$D = \left( \frac{P_c \tau}{F k T_0} \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \frac{S}{B} L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.11)$$

La portée radar peut être facilement déterminée pour un couple de probabilités de détection  $p_d$  et de fausse alarme  $p_{fa}$  à l'aide du rapport  $\frac{S}{B}$  obtenu pour des  $p_d$  et  $p_{fa}$  correspondants. Plus le rapport  $\frac{S}{B}$  est augmenté, plus la probabilité de détection  $p_d$  augmente.

### 1.2.4. Surface Equivalente Radar (SER)

La surface équivalente radar (notée  $\sigma$ ) est une mesure de la capacité d'une cible à réfléchir les signaux radar dans la direction du récepteur radar. Si toute l'énergie incidente du faisceau radar était diffusée de façon égale dans toutes les directions,  $\sigma$  serait alors la section efficace de la cible perpendiculaire au faisceau. En pratique, une partie de l'énergie est absorbée et la diffusion n'est pas isotrope. La surface équivalente radar est donc difficile à estimer et elle est généralement obtenue par mesures expérimentales. Elle dépend de :

- La géométrie de l'aéronef et de ses appendices,
- La direction d'où provient le faisceau radar,
- La fréquence d'émission radar,
- Les matériaux composant la structure de l'appareil.

L'équation (1.11) appelée équation radar en espace libre montre que la portée radar varie comme quatrième racine de la surface équivalente radar. L'utilité d'une réduction de la surface équivalente radar de 10 dB réduit la portée de détection radar plus de la moitié.

Diminution de la SER		Portée radar réduite
dB	%	
10	90	0.56D
15	97	0.42D
20	99	0.32D
25	99.7	0.24D
30	99.9	0.18D

**Table1.1. Exemples numériques spécifiques de dépendance SER – Portée de détection Radar <sup>[1]</sup>.**

### 1.3. Techniques de réduction de la SER

Présenter une SER faible est une qualité essentielle pour un aéronef désirant d'autant mieux s'échapper d'un radar adverse. Des technologies de furtivité ont par conséquent été mises au point dans le but de réduire la SER. La partie suivante fournit un résumé des techniques de réduction de la surface équivalente radar. Les deux techniques les plus souvent utilisées sont la technique de mise en forme et la technique d'absorption des ondes radar.

### 1.3.1. Annulation active

L'annulation active implique le processus de modification et de retransmission du signal radar reçu. Un dispositif dans la cible agit pour induire le radar en erreur en aveuglant son détecteur. La cible doit émettre un rayonnement au même instant que l'impulsion reçue dont l'amplitude et la phase annulent l'énergie réfléchie. Les données requises sont l'angle d'arrivée, l'intensité, la forme d'onde et la fréquence de l'onde reçue. Un système d'annulation actif devrait détecter ces données avec précision, puis réémettre l'impulsion avec une amplitude et une phase appropriées. Évidemment, cela nécessite une tâche complexe pour le système, car ces données changent <sup>[2]</sup>

Parmi les méthodes utilisées dans cette approche, nous avons :

- **Le brouillage :** des signaux radioélectriques sont intentionnellement émis pour interférer dans le fonctionnement d'un radar en saturant son récepteur avec un bruit puissant, ou avec de fausses données. <sup>[3]</sup>
- **La suppression active :** consiste à empêcher un radar de détecter une cible en renvoyant un signal avec la même fréquence que le signal reçu, mais décalé précisément d'une demi-longueur d'onde. L'énergie atteignant le radar n'a alors plus aucune fréquence et l'avion ne peut pas être détecté. <sup>[4]</sup>

### 1.3.2. Annulation passive

L'annulation passive se base sur la réduction de la signature de l'avion donc la réduction de sa SER (une SER plus petite signifie un avion moins détectable). Cette méthode est appliquée dans la phase de construction de l'avion et elle suit deux étapes : la mise en forme et le revêtement avec des matériaux d'absorption radar (RAM). Dans les conceptions actuelles, les techniques de mise en forme sont principalement appliquées pour établir une faible SER. Les matériaux d'absorption radar sont ensuite utilisés pour réduire les effets des ondes rampantes ou des ondes progressives, ou lorsque la mise en forme est insuffisante <sup>[2]</sup>.

#### 1.3.1.1. Technique de mise en forme

La technique de mise en forme est traditionnellement considérée comme la première étape du contrôle de la SER. L'objectif de la mise en forme est de concevoir la structure d'une

cible de manière à réfléchir ou à diffracter l'onde RF incidente loin du radar par la suppression des formes en dièdre qui concentrent l'énergie et construire des avions avec des formes arrondies (diffusion de l'énergie) ou par des formes planes (émission dans une direction privilégiée). Il est généralement préférable de garder les grandes surfaces aussi plates et lisses que possible de manière à limiter les échos à une région angulaire très étroite <sup>[5]</sup>. Le Lockheed F-117A (Figure 1.3) est un bon exemple de cette technique.

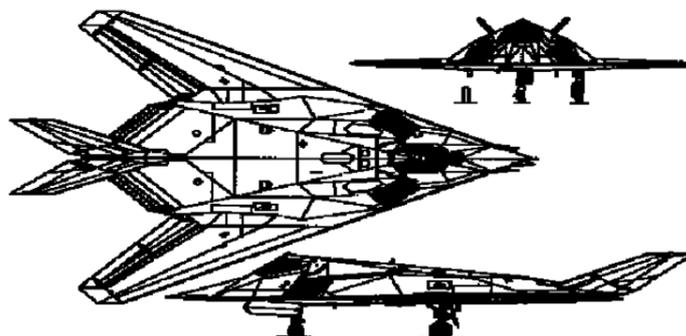


Figure 1.2 : Plan du Lockheed F-117.

#### **1.3.1.2. Technique de revêtement**

Les matériaux absorbants les ondes émises par les radars sont des matériaux conçus pour absorber les ondes radar et minimiser ou éliminer les réflexions fournissant ainsi une signature réduite pour la détection. Ils sont particulièrement utilisés dans la recherche de la furtivité surtout dans le domaine de défense et d'espionnage. L'énergie radar est absorbée par un ou plusieurs mécanismes pour lesquels s'impliquent les propriétés diélectriques et magnétiques de ces matériaux <sup>[6]</sup>.

### **1.4. Matériaux d'absorption radar**

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique est incident sur un milieu matériel, il peut subir une réflexion, une réfraction, une transmission ou bien une absorption. Les différentes grandeurs de ces phénomènes dépendent des propriétés électromagnétiques de ces matériaux.

Les premiers usages des Matériaux d'absorption radar (RAM) sont contemporains de la naissance du radar. Ainsi, pendant la seconde guerre mondiale, l'avion britannique D.H.

98 Mosquito (Figure 1.3.a) construit en grande partie en bois était mal détecté par les radars Allemands. Tout au long de la guerre froide des études poussées ont eu lieu, mais peu d'avions en ont bénéficié (Lockheed YO-3A Quiet Star "ultra-silencieux" utilisé au Viêt Nam). C'est seulement à partir de 1980 que les RAM ont commencé à être utilisés pour les premiers avions furtifs (Figure 1.3.b) <sup>[7]</sup>.



Figure 1.3.a : Avion D.H. 98 Mosquito avec revêtement RAM.



Figure 1.3.b : Avion F-117 Nighthawk avec revêtement RAM.

L'application de matériaux d'absorption radar peut réduire la SER sur une plage spécifiée de fréquences. La technique consiste à trouver un arrangement de matériaux avec des caractéristiques électriques et magnétiques souhaitables qui présentent de bonnes qualités d'absorption, de sorte que le RAM puisse atténuer l'onde incidente <sup>[2]</sup>.

### 1.4.1. Mécanisme de fonctionnement RAM

Aux fréquences radar, une réduction de la réflexion d'un objet peut être obtenue par les mécanismes d'absorption ou bien d'annulation. Les revêtements RAM réduisent la SER par la suppression des réflexions multiples. L'une de ces méthodes est basée sur le transfert de l'énergie de l'onde incidente au matériau. La propriété principale d'un matériau absorbant les ondes radar est de dissiper l'énergie de l'onde incidente en chaleur. Ces matériaux ont des paramètres constitutifs qui sont des nombres complexes <sup>[2]</sup>.

Les mécanismes de pertes sont tenus en compte dans la permittivité  $\varepsilon$  et la perméabilité  $\mu$  du matériau. Lors de l'expression de la permittivité et de la perméabilité complexes, on utilise la permittivité relative et la perméabilité relative  $\varepsilon_r$  et  $\mu_r$  respectivement qui sont normalisées par les valeurs de l'espace libre <sup>[2]</sup>.

Les notations complexes pour  $\varepsilon_r$  et  $\mu_r$  sont données comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r) \quad (1.12)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0(\mu'_r - j\mu''_r) \quad (1.13)$$

où la partie réelle (partie de stockage d'énergie) est représentée par  $\varepsilon'$  et  $\mu'$ , et la partie imaginaire (partie de perte) par  $\varepsilon''$  et  $\mu''$ . Le taux de pertes est déterminé par les parties imaginaires de perméabilité et de permittivité ou, de manière équivalente, par les tangentes de perte.

$$\tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.14)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1.15)$$

On les appelle tangentes des pertes, car elles constituent une mesure de la perte dans le support. Les tangentes de perte sont généralement comprises entre 0,001 et 0,1 (entre 0,1 % et 10 %) et l'atténuation de l'onde en décibels par mètre est donc très faible. Dans le cas général, la majeure partie des pertes d'un absorbeur électrique est due à la conductivité du matériau. En revanche, la perte pour les absorbants magnétiques est due à la magnétisation aux hyperfréquences. Il est souvent pratique d'exprimer la perte en termes de conductivité <sup>[2]</sup> :

$$\varepsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (1.16)$$

Où  $\sigma$  est la conductivité et  $\omega$  est la fréquence en radians.

## **1.4.2. Types de RAM**

### **1.4.2.1. Matériaux quart d'onde**

Du fait de leur épaisseur égale au quart de la longueur d'onde émise par le radar, ce revêtement est composé de deux matériaux, le premier est un revêtement partiellement réfléchissant qui renvoie la moitié des ondes reçus, le deuxième est un revêtement carcasse qui est totalement réfléchissant renvoie le reste de ces ondes (soit la deuxième moitié), ces deux matériaux sont séparés par une distance équivalente au quart de la longueur d'onde émise par le radar. Il y a donc réflexion des deux ondes qui se trouvent alors en opposition de phase et par conséquent s'annulent en s'additionnant. Ceci est normal, puisque l'onde qui se réfléchit sur la carcasse parcourt la distance d'un quart de longueur d'onde émise par le radar à l'aller comme au retour. Elle parcourt donc deux fois la distance (d'un quart de la longueur de l'onde) soit la demi-longueur d'onde émise<sup>[8]</sup>.

L'inconvénient de cette technique est qu'elle fonctionne pour une longueur d'onde bien précise et l'efficacité du revêtement diminue d'autant plus que la longueur de l'onde réfléchie est différente de la longueur à laquelle le revêtement est conçu<sup>[8]</sup>.

### **1.4.2.2. Matériaux absorbants par transformation d'énergie**

Ce type de matériaux transforme les ondes radar en infrarouge, énergie thermique ou magnétique, cela afin que l'onde arrivant sur l'avion ne soit pas réfléchie. Ces matériaux sont constitués de carbone, de résine, de caoutchouc, d'époxy, de céramique, de silicone ou encore de polyuréthane. Dans ces matières sont noyées différentes substances qui vont, soit modifier la fréquence de l'onde (ferrites), soit modifier sa nature par transformation en chaleur (caoutchouc synthétique) ou bien en onde magnétique (matériaux ayant une grande permittivité magnétique comme le fer ou l'oxyde de fer), ou encore en piégeant l'onde ou en la renvoyant vers l'intérieur de l'avion plutôt que vers le récepteur (fibres de carbonées, particules de ferrites)<sup>[8]</sup>.

## 1.5 Conclusion

Ainsi, on peut réduire la SER en modifiant la forme d'une cible, en utilisant des matériaux absorbants ou même en réduisant de manière active la puissance réfléchi. D'ordre géométrique on peut obtenir une forme bien étudiée pour empêcher la réflexion de la majeure partie du faisceau radar en direction de l'émetteur en favorise exclusivement des surfaces planes et en évitant des angles droits. Les matériaux absorbants provoquent la transformation du rayonnement en un réchauffement ou bien, si la longueur d'onde est connue en l'éliminant par rotation de phase. La réduction active opère par l'émission d'ondes d'interférence et elle difficile à mettre en œuvre. Dans le cadre de ce mémoire, on s'intéresse particulièrement à la technique des matériaux d'absorption radar (RAM).

# **Chapitre2**

## **Techniques expérimentales**

## **2.1. Introduction**

Les techniques de réduction de la SER les plus souvent employées sont la mise en forme et le revêtement par des matériaux d'absorption radar (RAM). La technique des RAM est fondée sur l'arrangement de matériaux diélectriques ou magnétiques qui présentent une impédance appropriée à l'onde incidente. L'impédance à la surface du RAM impose une bonne adaptation par atténuation de l'onde radar qui pénètre dans le matériau. L'utilisation des RAM est un compromis de conception où ses avantages sont pondérés devant ses inconvénients tels que le poids, le coût et la maintenance spécialisée. Cette technique a permis d'atteindre des réductions remarquables dans les plateformes SER.

Lors du processus de conception, une étude de l'évolution des spectres de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique effectuée sur une bande de fréquences désirée est fondamentale pour un matériau ou une combinaison de matériaux RAM. Avec l'avènement des nanomatériaux, la génie des RAM est devenue un champ de recherche prometteur.

Les composites allient la légèreté d'une matrice organique aux propriétés spécifiques des charges incorporées. Suivant la nature, la forme et l'organisation des inclusions et de la matrice, on peut obtenir des produits très divers utilisés dans des domaines aussi variés que la construction automobile, aéronautique ou même aérospatiale. La conception et la modélisation de ces matériaux en vue d'une application particulière nécessitent l'établissement des relations entre les propriétés, la structure et les procédés d'élaboration et requièrent une forte synergie entre la science des matériaux et la génie des procédés.

## **2.2. Matériaux Nanocomposites**

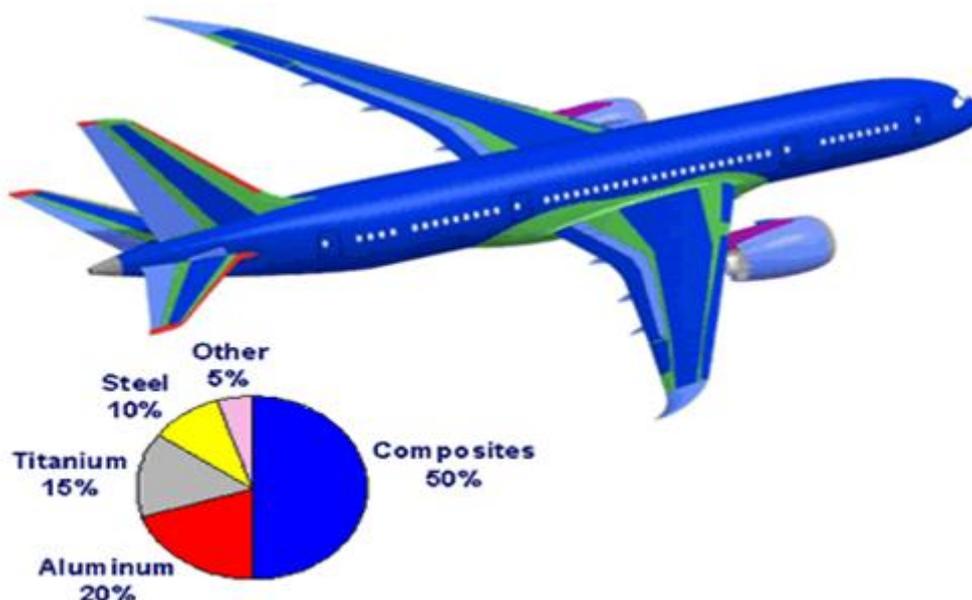
### **2.2.1. Définition d'un composite**

Les matériaux composites sont un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles ayant cependant une forte capacité d'adhésion. Les nouveaux matériaux ainsi constitués possèdent des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Ce mécanisme permet

d'améliorer la qualité de la matière, et présente de nombreux avantages. En effet, ils sont plus légers que les alliages métalliques, ils sont insensibles à la corrosion, mais également, plus résistants au phénomène de fatigue. La structure de ces matériaux est composée de deux parties : une matrice qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts et un renfort qui assure la tenue mécanique. La nature de la matrice détermine les trois grandes classes de matériaux composites :

- Les composites à matrice organique (CMO),
- Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et opérant à très haute température (dans les domaines aéronautique et spatial),
- Les composites à matrice métallique (CMM).

Le renfort et la matrice doivent être compatibles entre eux et se solidarisent grâce à l'intervention d'une interface. La fibre de carbone est très utilisée dans la construction aéronautique, elle permet de renforcer les matériaux composites. Les avions les plus récents sont composés à 50% de matériaux composites<sup>[9]</sup>.



**Figure 2.1 : pourcentage de chaque matériau constituant la structure d'un avion.**

### 2.2.2. Types des matériaux composites

Les matériaux composites sont en général scindés en deux catégories, les composites de Grande Diffusion (GD) qui sont peu coûteux avec des caractéristiques moyennes et qui s'emploient largement pour des applications de grandes séries (automobile etc...) et les composites Hautes Performances (HP) assez onéreux mais dont les propriétés de la structure sont importantes et qui sont principalement employés pour des applications de pointe (aéronautique, spatial)<sup>[10]</sup>.

Les composites Grande Diffusion possèdent des caractéristiques mécaniques souvent inférieures à celles des matériaux de références tels que l'acier. Les principaux constituants de base des composites GD sont les fibres de verre avec des résines polyesters, ils conviennent donc aux applications de grandes séries pour l'industrie des transports. Les composites Hautes Performances sont principalement utilisés dans l'aéronautique, l'aérospatial et les sports de pointe (Formule 1 etc...). Les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues principalement en carbone avec des taux de renfort supérieur à 50 %. Contrairement aux composites GD, les composites HP se caractérisent par des propriétés mécaniques plus élevées que celles des métaux<sup>[10]</sup>.

### 2.2.3. Définition d'un nanocomposite

Un nanocomposite sera défini comme une composition dont l'une des phases au moins se situe dans un domaine de taille compris entre le dixième du nanomètre et quelques dizaines de nanomètres. L'introduction de renforts de taille nanométrique dans une matrice polymère présente plusieurs avantages comparativement aux renforts micrométriques classiques :

- Le cout global de revient d'un nanocomposite diffère très peu de celui de la matrice et ce pour des améliorations de propriétés potentiellement importantes,
- L'utilisation des nanocomposites pour de nombreuses applications qui exigent la transparence du matériau, un bon aspect de surface et une bonne tenue en température,
- Combinaison de faible poid avec de hautes performances.

Les propriétés des nanocomposites différent de celles des matériaux composites traditionnels à cause d'un rapport surface/volume élevé du renfort. Le renfort peut être sous

forme de particules (minéraux), de feuillets (argiles exfoliées) ou de fibres (nanotubes de carbone). L'interface matrice-renfort présente une grande surface qui est typiquement d'un ordre de grandeur plus important que celle dans le cas d'un matériau composite traditionnel. Cette interface implique qu'une faible quantité de renfort nanométrique peut avoir un effet observable sur les propriétés macroscopiques du composite. Par exemple, l'ajout de nanotubes de carbone améliore les conductivités électrique et thermique d'un matériau composite. D'autres types de nanoparticules peuvent conduire à l'amélioration des propriétés optiques, diélectriques, la résistance au feu, ou des propriétés mécaniques<sup>[11]</sup>.

## **2.2.4. Procédés d'élaboration**

### **2.2.4.1. Procédés d'élaboration d'un composite**

Les procédés d'élaboration d'un matériau composite comporte toujours les trois étapes suivantes : le mélange, la polymérisation et la mise en forme. Selon le polymère employé, thermoplastique ou thermodurcissable, et le moment d'incorporation du renfort, on peut distinguer trois cas de figures<sup>[12]</sup> :

#### **2.2.4.1.1. Polymérisation**

- **Thermoplastiques**

1er cas :après avoir réalisé le mélange du monomère et du renfort, on effectue la polymérisation en réacteur. Le produit obtenu peut alors être mis en forme par thermoformage<sup>[12]</sup>.

2ème cas :le polymère préalablement synthétisé subit une nouvelle fusion pour permettre l'incorporation et la dispersion du renfort. La mise en forme est réalisée de la même manière que dans le cas précédent<sup>[12]</sup>.

- **Thermodurcissables**

3ème cas :la première étape du procédé consiste à réaliser le mélange du renfort et du monomère. Les processus de polymérisation et de mise en forme sont confondus puisque la polymérisation entraîne la constitution d'un réseau tridimensionnel rigide et donc la formation

d'un matériau qui n'est plus moulable par la suite. Le moule de polymérisation doit posséder les dimensions de l'objet fini<sup>[12]</sup>.

#### 2.2.4.1.2. Mélange

Quel que soit le procédé choisi, l'étape primordiale dont dépendent les propriétés ultérieures du matériau est celle du mélange au cours de laquelle les particules du renfort sont introduites et dispersées dans les produits organiques de départ. Les problèmes pour cette opération se posent de manière assez différente, selon que la matrice se présente sous forme d'un liquide plus ou moins visqueux ou d'un solide fondu<sup>[12]</sup>.

#### 2.2.4.1.3. Mise en forme

La mise en forme finale des matériaux est réalisée soit par moulage par compression dans le cas des thermodurcissables ou des thermoplastiques, soit par des méthodes spécifiques aux thermoplastiques comme le moulage par transfert ou le moulage par injection<sup>[12]</sup>.

#### 2.2.4.2. Résine

La résine est une substance solide ou pâteuse, insoluble dans l'eau et dans l'éther de pétrole, soluble dans l'alcool et les huiles essentielles, et capable de se solidifier en contact avec l'air. Chimiquement, c'est un mélange complexe de composés secondaires terpénoïdes (notamment les acides résiniques) ou phénoliques. Elle est obtenue naturellement en tant que produit (sève) qui coule de plusieurs plantes, ou bien synthétiquement par des substances avec des propriétés similaires aux résines naturelles<sup>[13]</sup>. Les types de résines les plus connus sont :

- Résines végétales : substances naturelles sécrétées par certains végétaux, les conifères essentiellement. Elles ont l'aspect d'un liquide poisseux qui sèche plus ou moins rapidement au contact de l'air<sup>[14]</sup>.

- Résines synthétiques : matériaux aux propriétés similaires aux résines naturelles d'origine végétale. Ce sont des liquides visqueux capables d'endurcir de manière permanente. Elles sont généralement classées en deux catégories : résine polyester et la résine époxy<sup>[15]</sup>.

### **2.2.4.3. Procédés d'élaboration des poudres nanostructurées**

Dans ce paragraphe, on s'intéresse aux procédés qui permettent de produire des poudres nanostructurées dans le but de les utiliser comme renforts pour l'élaboration des échantillons nanocomposites utilisés dans ce travail. De nombreuses techniques permettent de produire des poudres nanostructurées. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : chimiques, physiques et mécaniques.

#### **2.2.4.3.1. Procédés physiques**

Cette méthode consiste à évaporer un métal par chauffage puis à condenser la vapeur métallique afin d'obtenir des nanopoudres formées de particules nanométriques dispersées. Le type de chauffage dépend de la tension de vapeur du métal, c'est-à-dire de sa capacité à s'évaporer, de la force de la liaison chimique et de l'état de surface (oxydation). En exemple le Fe, Ni, Co, Cu, Pd et le Pt produisent suffisamment de vapeur par chauffage radiatif (1200°C) et inductif (2 000°C), en conséquence 50 à 100 g/h de matière peuvent être produits en laboratoire. Ce mode de préparation est employé au niveau de la production industrielle de nanopoudres métalliques et céramiques. La production est de plusieurs dizaines de tonnes par an<sup>[16]</sup>.

#### **2.2.4.3.2. Procédés chimiques**

Les procédés chimiques sont des techniques fondées sur des réactions de polymérisation inorganiques. L'une des techniques de la voie chimique est le procédé sol-gel qui consiste tout d'abord en l'élaboration d'une suspension stable (sol) à partir de précurseurs chimiques en solution. Suite à des interactions entre les espèces en suspension et le solvant, ces « sols » vont se transformer en un réseau solide tridimensionnel expansé au travers du milieu liquide. Le système est alors dans l'état de « gel ». Ces gels sont ensuite transformés en matière sèche amorphe par évacuation des solvants dans leurs domaines gazeux ou supercritique (aérogel) ou par simple évaporation sous pression atmosphérique (xérogel)<sup>[16]</sup>.

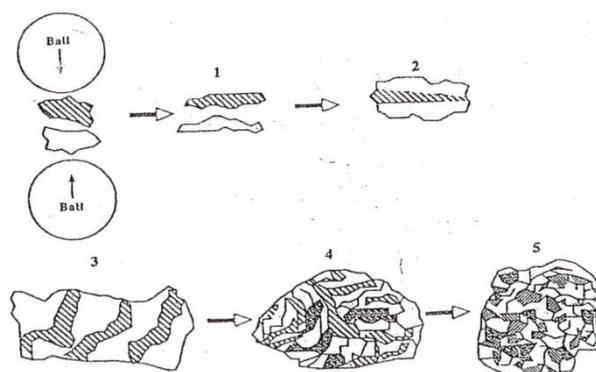
Les techniques sol-gel permettent de contrôler la taille et l'homogénéité de la distribution des particules. Elles permettent la production de pièces massives, de dépôts de couches minces sur plaques, fibres ou de composites fibreux. Toutefois, ces techniques présentent certains inconvénients tels que le coût élevé des précurseurs de base, un faible

rendement, des produits de faible densité (pour les matériaux à hautes densité, une étape de recuit à haute température est nécessaire) et des résidus de carbones et autres composés, certains pouvant être dangereux pour la santé (pour les matériaux ultra purs, une étape de purification complexe est nécessaire) <sup>[16]</sup>.

### 2.2.4.3.3. Procédés mécaniques

Dans la voie mécanique, le broyage à billes est un procédé de métallurgie des poudres. Il consiste à utiliser l'énergie mécanique pour diminuer la taille des grains d'un matériau, pour réaliser un mélange à l'échelle du grain (échelle nanométrique). Il procède par une succession de fractures et de soudures provoquées lors de chocs mécaniques dans un broyeur (en général par des billes en acier inoxydable), le produit final se présente sous la forme de grains de poudres nano structurés. Le broyage à billes peut être divisé en deux catégories : broyage de poudres élémentaires dit broyage mécanique et broyage de poudres différentes où un transfert matériel se produit nommé mécanosynthèse.

On sous-entend par mécanosynthèse la formation d'alliages ou de composés à partir de précurseurs élémentaires durant un broyage par billes à haute énergie. La collision répétée entre billes et poudres avec un impact de vitesse très élevée déforme et fait durcir la poudre. Dans ce mécanisme répétitif de soudage - fracture à froid se produit un raffinement microstructural et à la fin on aboutit à des changements de composition.



**Figure 2.2 : Mécanismes de soudure – fracture lors d’une mécanosynthèse.**

L'avantage essentiel du procédé de mécanosynthèse est sa versatilité puisqu'il est applicable à tous les types de matériaux (organiques et inorganiques, semi-conducteurs et métalliques). Il présente également l'avantage d'être aisément modulable de l'échelle

laboratoire à l'échelle industrielle. Un des grands inconvénients de cette méthode est la contamination des poudres par le milieu extérieur qui provoque des réactions chimiques (oxydation à cause de l'oxygène) influant sur les caractéristiques des poudres obtenues.

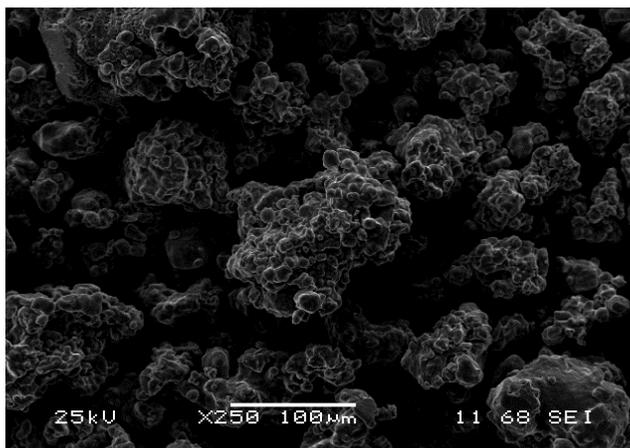
Dans ce travail, nous avons opté pour l'élaboration de poudres nanostructurées à base de Fer, des poudres élémentaires de Fer et de Silicium de pureté supérieure ont été sujettes des processus de broyage mécanique et de mécanosynthèse dans un broyeur à haute énergie à une vitesse de 200 tpm sous atmosphère d'argon pendant une durée de 20h pour le Fer et 56h pour le Fer-Silicium. A la fin de l'élaboration, nous sommes en possession de poudres nanostructurées qui sont utilisés comme renforts dans une matrice de résine époxy pour l'obtention d'échantillons massiques nanocomposites qui serviront comme matériaux de test pour la caractérisation électromagnétique.

#### **2.2.4.4. Caractérisation structurale des poudres nanostructurées**

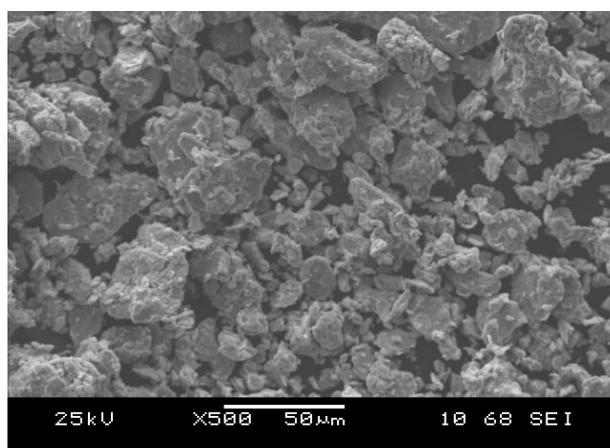
Pour mettre en évidence le caractère nanostructural des poudres obtenues par broyage à billes, deux techniques de caractérisation structurale sont disponibles :

- Analyse des spectres de diffraction des rayons X (DRX) sur les poudres nanostructurées, les résultats obtenus permettent de caractériser la taille du grain et d'autres paramètres structuraux.
- Microscopie électronique à balayage (MEB) pour caractériser l'évolution morphologique des particules de poudres.

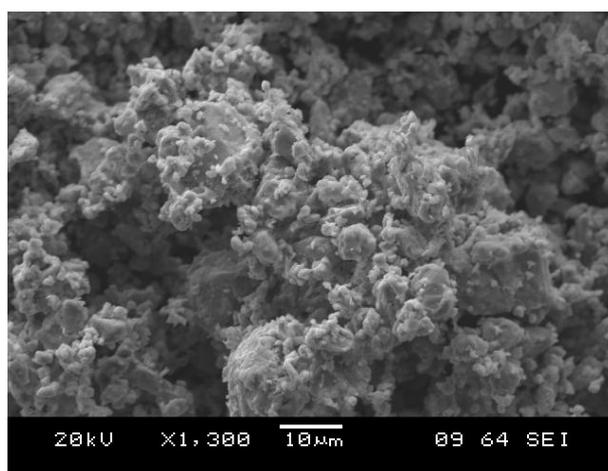
Pour analyser l'aspect structural des poudres élaborées, la microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée. Le principe général est fondé sur l'interaction électrons-matière : lorsqu'un électron suffisamment énergétique rencontre de la matière, plusieurs types de rayonnements peuvent être induits, chaque type de rayonnement est exploitable pour renseigner sur la nature du matériau. La morphologie des poudres de Fer grossière et broyée est étudiée dans une série d'images MEB. La figure (2.3) confirme la morphologie de nature ductile de la poudre de Fe élémentaire (avant broyage) on peut remarquer que le Fe élémentaire révèle des particules presque sphériques avec des branches dentées primaires et secondaires et une taille moyenne de l'ordre de plusieurs dizaines de micromètres.



**Figure 2.3 : Echantillon de Fer élémentaire (avant broyage).**



**Figure 2.4.a : Echantillon de Fer broyé (durée : 7h).**



**Figure 2.4.b : Echantillon de Fer broyé (durée : 36h).**

Le broyage mécanique provoque une fragmentation des particules et en conséquence leurs tailles sont réduites (Figure 2.4.a). Avec la progression du broyage (Figure 4.b) les particules

sont à maintes reprises aplaties, fracturées et soudées, ceci mène au raffinement de la taille des particules. Les poudres broyées sont aplaties avec des formes angulaires et une tendance vers des agglomérations de particules de taille réduites (10 à 20  $\mu\text{m}$ ).

Les poudres nanostructurées à base de Fer ont été utilisées comme renforts dans une matrice époxy pour deux élaborations (Figure 2.5) destinées à la caractérisation électromagnétique :

- Une plaque de dimensions 60x60  $\text{cm}^2$  à base de Fer broyé,
- Une série d'échantillons à base de Fer-Silicium de dimensions compatibles à celles du guide d'ondes métallique à bande X (20.86x10.16  $\text{mm}^2$ ).



(a) Moule réalisé



(b) mélange de la résine avec la poudre

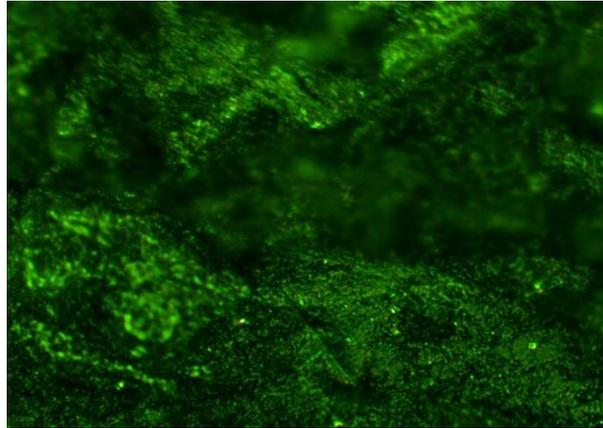
nanométrique du Fer



(c) Réalisation de la plaque

**Figure 2.5 : Elaboration des nanocomposites.**

Dans l'image MEB de la figure 2.6, on analyse la qualité de dispersion des poudres broyées de Fer dans la résine époxy dans une section transversale du nanocomposite élaboré. La dispersion des poudres est bonne, ceci est dû à l'homogénéité des particules après broyage. La qualité de dispersion est une caractéristique importante pour les propriétés électromagnétiques désirées.



**Figure 2.6 : micrographie MEB de nanocomposite à base de Fer broyé durant 36 h.**

## 2.3. Caractérisation Electromagnétique

### 2.3.1. Définition

On entend par caractérisation électromagnétique d'un matériau l'extraction de sa permittivité diélectrique et sa perméabilité magnétique. La permittivité diélectrique est une grandeur physique qui décrit la réaction d'un matériau à un champ électrique appliqué. Autrement dit elle caractérise l'organisation, l'orientation et le déplacement des charges électriques dans le matériau. Le vide ( $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ) est pris comme milieu de référence pour décrire la permittivité d'un autre milieu :  $\epsilon_0 \epsilon_r$  ou  $\epsilon$  est la permittivité du milieu et  $\epsilon_r$  est une permittivité relative. En général, la permittivité d'un matériau est complexe avec la partie imaginaire est liée au phénomène d'absorption ou d'émission du champ électromagnétique et la partie réelle est considérée comme un terme de dispersion<sup>[17]</sup>.

La perméabilité est une grandeur physique qui décrit la capacité d'un milieu à modifier les lignes d'un champ magnétique (modifier les lignes de ce champ) autrement dit elle décrit la réponse du milieu à un champ magnétique. Souvent on réalise cette mesure dans un milieu contenant l'air (faible pression) elle est symbolisée par  $\mu_0$  avec ( $\mu_0 = 12,566 370 614 \text{ T m/A}$ ).

Cette perméabilité est utilisée souvent comme perméabilité de référence. De même, la perméabilité relative caractérise un milieu autre que le vide et elle est symbolisée par  $\mu_r$  :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.2)$$

Où  $\mu$  est la permittivité du milieu

Pour estimer les pertes de l'onde électromagnétique dans un matériau, il faut considérer la valeur du rapport des deux composantes, réelle et imaginaire, de la permittivité et la perméabilité. Celui-ci est désigné sous le terme de tangente de l'angle de pertes,  $\text{tg}\delta$ , et est défini par la relation suivante <sup>[12]</sup>:

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.4)$$

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2.5)$$

Suivant la valeur de l'angle de pertes, on peut classer les matériaux absorbants en quatre grandes catégories <sup>[12]</sup> :

$\text{tg}\delta < 0,001$	matériaux à très faibles pertes
$0,001 \leq \text{tg}\delta \leq 0,1$	matériaux à faibles pertes
$0,1 \leq \text{tg}\delta \leq 1$	matériaux à pertes moyennes
$1 \leq \text{tg}\delta \leq 10$	matériaux à fortes pertes

## 2.3.2. Méthodes de caractérisation électromagnétique

### 2.3.2.1. Méthodes de l'espace libre

L'espace libre est un moyen important de transmission d'onde dans le domaine de la recherche sur les matériaux. Dans la caractérisation des propriétés des matériaux, l'espace libre donne plus de flexibilité dans l'étude électromagnétique des matériaux sous différentes conditions <sup>[18]</sup>. Pour la caractérisation des propriétés électromagnétiques, les paramètres importants décrivant les antennes sont la polarisation, le diagramme de rayonnement, le gain de puissance, la largeur de bande, et la réciprocité.

- **Méthode de réflexion avec un court-circuit**

Dans la mesure de la permittivité effective des matériaux composite, il est nécessaire que les dimensions de l'échantillon doivent être très grands devant ceux des inclusions. Pour les composites avec des tailles d'inclusions comparables avec la longueur d'onde du signal, par exemple, les composites de fibres, les méthodes de la ligne coaxiale conventionnelle, et du guide d'onde ne peuvent pas être employées. Dans ces cas, la méthode d'espace libre est généralement utilisée<sup>[18]</sup>.

La figure ci-dessous montre un exemple de cette méthode de caractérisation. On place un échantillon du matériau sous test en face d'une antenne tout en vérifiant les conditions citées auparavant :

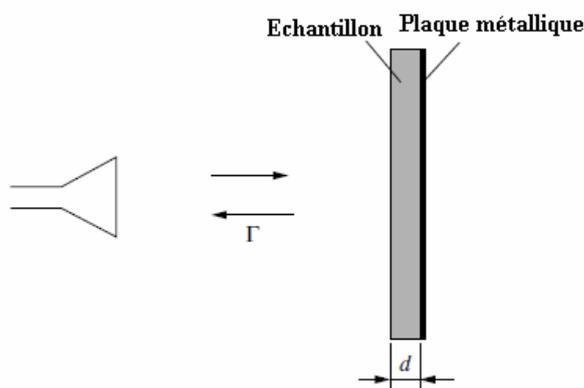


Figure 2.7 schéma sur la méthode de réflexion en espace libre

La réflectivité complexe  $S_{11}$  à l'interface entre l'espace libre et l'échantillon est donnée par :

$$S_{11} = \frac{j z \tan(\beta d) - 1}{j z \tan(\beta d) + 1} \quad (2.4)$$

$z$  est l'impédance d'onde du matériau par rapport l'impédance d'onde de l'espace libre. Pour les matériaux non magnétiques elle est donnée par

$$z = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.5)$$

$\beta$  est la constante de phase donnée par

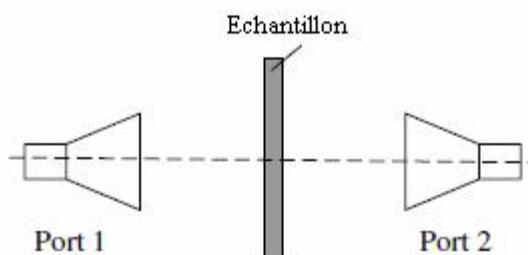
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.6)$$

Avec  $\lambda$  est la longueur d'onde en espace libre  
 $d$  est épaisseur de la plaque-échantillon

Cependant, les équations précédentes indiquent que la permittivité de l'échantillon ne peut pas être exprimée explicitement en fonction de  $S_{11}$  et  $d$ , alors des méthodes numériques sont utilisées pour le calcul de la permittivité diélectrique<sup>[18]</sup>.

- **Méthode de réflexion bistatique**

Dans cette méthode on utilise deux antennes, chacune émet le signal et reçoit la réponse au même temps le figure ci-dessous nous montre un schéma de cette méthode :



**Figure 2.8** schéma de mesure bistatique en espace libre (incidence normale)

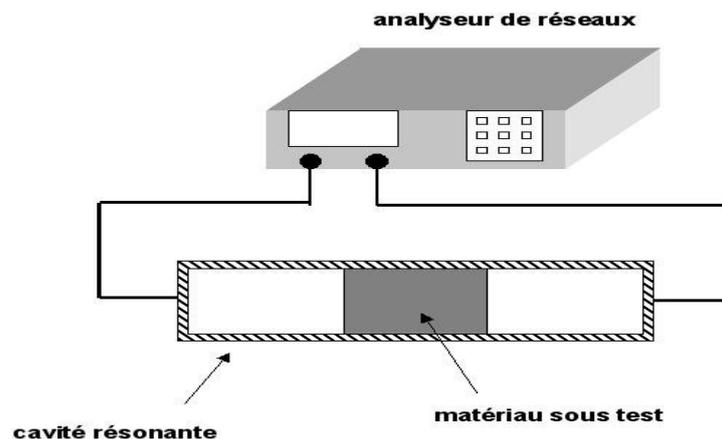
On remarque que la réflexion dépend de la polarisation de l'onde incidente. Habituellement les polarisations parallèle et perpendiculaire entraînent des coefficients de réflexion différents. En outre, un calibrage spécial est nécessaire pour la mesure bistatique en espace libre du coefficient de réflexion<sup>[18]</sup>.

### 2.3.2.2. Méthodes en cavité résonante

Dans tout milieu diélectrique, homogène ou inhomogène, entièrement entouré d'un conducteur idéal ; les équations de Maxwell n'admettent des solutions non nulles que pour certaines fréquences particulières. Une telle enceinte fermée est appelée cavité résonante ou résonateur. La résolution des équations de Maxwell, en présence des conditions aux limites au bord d'une enceinte conductrice fermée, est un problème aux valeurs propres. Un tel problème admet un ensemble de solutions distinctes, appelées modes de résonance, qui sont les

fonctions propres du problème. A chaque fonction propre est associée une valeur propre, qui est la fréquence de résonance<sup>[18]</sup>.

Une section de guide d'ondes terminée à ses extrémités par des plans métalliques perpendiculaires à son axe forme une cavité. Une telle cavité est résonante lorsque sa longueur est égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde de guide. La distribution des champs peut être déterminée au moyen des résultats obtenus pour les guides d'ondes<sup>[18]</sup>.



**Figure 2.9 : Schéma du dispositif de mesure en cavité résonnante**

### 2.3.2.3. Méthodes en guide d'onde rectangulaire

Dans cette méthode, deux mesures sont effectuées l'une sans l'échantillon et une avec l'échantillon en forme du guide et d'épaisseur  $d$ , qui est mis à l'intérieur du guide contre le court-circuit. Le port du guide est excité par un signal hyperfréquence. Ce signal se propage à l'intérieur d'un guide rectangulaire jusqu'il rencontre l'interface amont de l'échantillon, une partie de l'énergie est réfléchie, l'autre partie continue sa propagation dans l'échantillon, avec ou sans atténuation suivant que le matériau est absorbant ou non, enfin la partie qui atteint le court-circuit est complètement réfléchie. L'utilisation d'un analyseur de réseaux permet d'enregistrer la réponse de l'échantillon de matériau sur une bande de fréquences appropriée<sup>[18]</sup>.

## 2.4. Matrice de dispersion S

Pour tout composant linéaire à  $n$  accès, il existe une relation algébrique linéaire liant tous les signaux sortant aux signaux entrant<sup>[19][20]</sup>. On l'appelle la matrice de répartition, ou matrice de paramètres S, elle permet de caractériser une ligne comme étant un élément de circuit aux caractéristiques connues représentable sous la forme d'un quadripôle. Pour  $n$  égal à deux c'est-à-dire un système à deux accès, le système d'équations s'écrit :

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (2.12)$$

$S_{ij}$  appelés paramètres dispersion.

On peut écrire le système sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Ou sous forme abrégée :

$$(b) = (S)(a) \quad (2.14)$$

$(S)$  est la matrice de dispersion

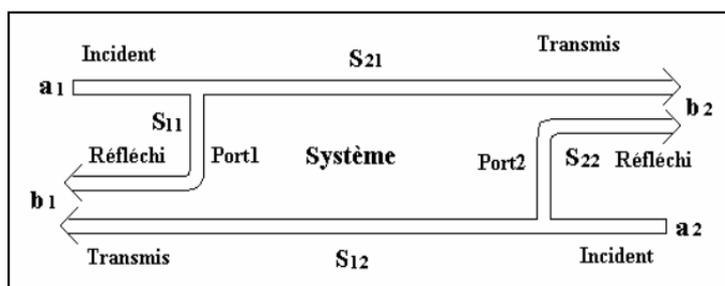


Figure 2.10 :schéma de répartition des paramètres S

$$S_{11} = \frac{\text{signal réfléchi au port 1}}{\text{signal incident au port 1}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \quad (2.15)$$

$S_{11}$  coefficient de réflexion en entrée (sortie adaptée)

$$S_{21} = \frac{\text{signal réfléchi au port 2}}{\text{signal incident au port 1}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \quad (2.16)$$

$S_{21}$  coefficient de transmission direct (sortie adaptée)

$$S_{12} = \frac{\text{signal réfléchi au port 1}}{\text{signal incident au port 2}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1 = 0} \quad (2.17)$$

$S_{12}$  coefficient de transmission inverse (entrée adaptée)

$$S_{22} = \frac{\text{signal réfléchi au port 2}}{\text{signal incident au port 2}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1 = 0} \quad (2.18)$$

$S_{22}$  coefficient de réflexion en sortie (entrée adaptée)

#### 2.4.1. Utilisation des paramètres S

La matrice de dispersion S est l'outil de base pour l'étude des systèmes en hyperfréquences quel que ça soit des systèmes en espace libre ou en ligne de transmission. Les mesures des paramètres S se font sur entrée et sortie adaptées et n'entraîne pas de difficultés<sup>[20]</sup>. La connaissance des paramètres S permet de calculer les grandeurs les plus communément recherchées : qui sont dans notre cas les coefficients de réflexion et de transmission qui vont nous permettre de trouver les caractéristiques électromagnétiques d'un échantillon diélectrique mis dans le trajet d'une onde.

#### 2.4.2. Analyseur de réseaux

L'analyseur de réseaux est l'outil principal de mesure aux hyperfréquences. Il permet de mesurer les ondes transmises et réfléchies sur un dispositif sous test. On a ainsi directement accès aux paramètres S. Il existe deux catégories d'analyseurs de réseaux :

- Analyseurs de réseaux scalaires ne donnent accès qu'au module des paramètres S.
- Analyseurs de réseaux Les vectoriels donnent le module et la phase des paramètres S.



**Figure 2.11 : Les deux types d'analyseur de réseaux**

## 2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé sur les techniques expérimentales qui peuvent être mises en jeu pour l'élaboration d'un matériau RAM. Une liaison étroite relie le mode d'élaboration aux propriétés obtenues. Nous avons opté pour des nanocomposites issus de la dispersion de poudres à base de Fer nanostructurées par broyage à billes. Les nanocomposites ont été choisis pour leurs propriétés améliorées, le broyage à billes a été choisi pour sa disponibilité et faible coût. Une diversité de techniques de caractérisation électromagnétique est disponible, chacune a des exigences sur la forme et la dimension de l'échantillon à tester, la bande de fréquences et le type de ligne de transmission utilisée. Ceci nous a conduit à l'élaboration d'une plaque de dimension  $60 \times 60 \text{ cm}^2$  à base de Fer broyé en vue d'une caractérisation en espace libre impliquant deux antennes cornets dans la bande X (l'expérience n'a pas eu lieu). Une série d'échantillons composites à base de Fer-Silicium a été également élaborée en vue d'une caractérisation électromagnétique dans un guide d'ondes métallique à bande X. Un analyseur de réseaux vectoriel a été indispensable pour l'enregistrement des mesures de réflexion et de transmission sur les ports des échantillons de matériaux sous test. Ces enregistrements seront utilisés dans le chapitre suivant pour l'extraction des spectres de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique.

# **Chapitre 3**

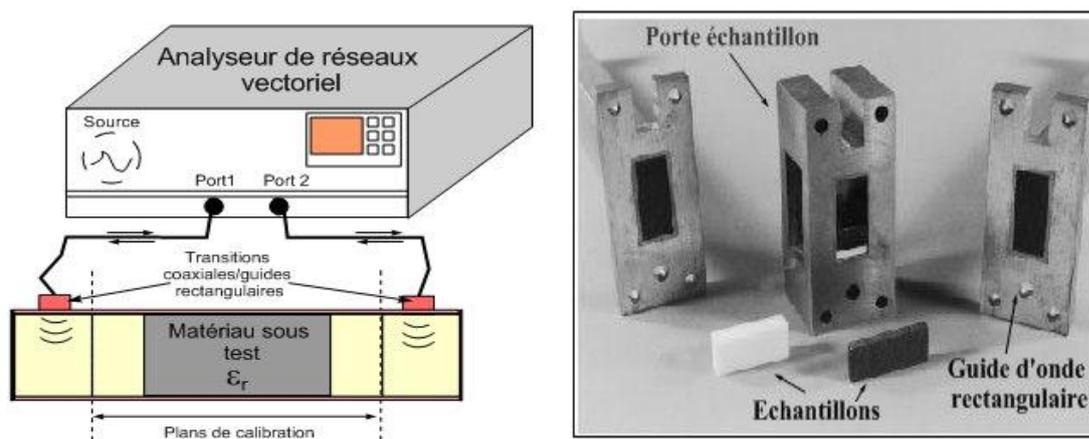
## **Extraction des**

### **paramètres**

#### **Electromagnétiques**

### 3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons abordé les techniques qui permettent l'accomplissement de la caractérisation électromagnétique dans son aspect expérimental, la technique de transmission/réflexion a été utilisée pour la détermination de la matrice de dispersion d'échantillons composites élaborés à base de Fer-Silicium. La technique est une mesure à deux ports sur une bande de fréquences [8.2 à 12.4 GHz]. La cellule de mesure se compose de la section du guide d'ondes rectangulaire R100 rempli d'un échantillon de matériau et associé à l'analyseur de réseaux vectoriel de type Agilent Technology 8791 ES.



**Figure 3.1 : Schéma de mesure en guide d'onde.**

Après enregistrement des paramètres  $S_{ij}$ , une routine de calcul connue sous le nom de l'algorithme de Nicholson-Ross-Weir (NRW) sera utilisée sous Matlab pour la conversion des enregistrements  $S_{ij}$  en spectres de permittivité et perméabilité relatives.

### 3.2. Procédure Nicholson-Ross-Weir

L'une des procédures les plus courantes pour la caractérisation électromagnétique des matériaux est la méthode Nicholson – Ross – Weir (NRW), basée sur les mesures T/R de l'échantillon testé. Les propriétés des matériaux sont extraites de leur impédance et des vitesses des ondes dedans. Il est bien connu que le principal inconvénient de cette méthode est lié à l'épaisseur électrique du matériau analysé. En particulier, lorsque l'épaisseur de

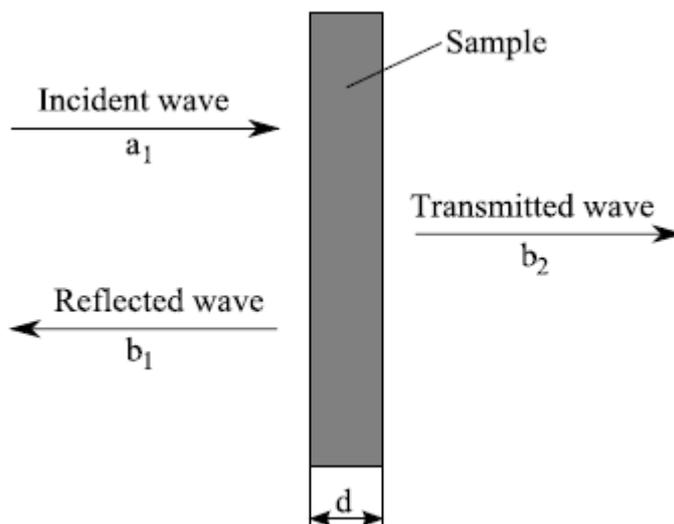
l'échantillon est un multiple entier de la moitié de la longueur d'onde du matériau, la méthode produit des résultats ambigus en raison de la périodicité  $2\pi$  de la phase de l'onde électromagnétique. En principe, à partir d'informations à priori sur le spécimen, il est possible d'obtenir des résultats sans ambiguïté. En raison de la procédure d'inversion adoptée pour l'extraction des paramètres EM, la méthode NRW n'est pas précise dans le cas de matériaux peu réfléchissants ou d'échantillons minces <sup>[21]</sup>.

- **Extraction des propriétés effectives**

Il existe plusieurs méthodes d'extraction de paramètres effectifs des matériaux pour les mélanges non homogènes. L'approche la plus populaire est l'extraction des caractéristiques de transmission et de réflexion d'un échantillon. La méthode est basée sur des mesures en espace libre de la permittivité complexe et de la perméabilité complexe. La même théorie sous-tend l'extraction de propriétés effectives à partir de données de simulation et est utilisée avec un grand succès, par exemple pour décrire les métamatériaux en tant que milieu homogène <sup>[22]</sup>.

La figure 3.2 montre une plaque de matériau d'épaisseur  $d$  placée dans un espace libre. La plaque est irradiée par une onde plane incidente normalement sur la plaque. Une telle configuration avec des ports hyperfréquences sur les côtés gauche et droit, avec un échantillon entre eux, peut être considérée comme un réseau hyperfréquence à deux ports. Les amplitudes de champ des ondes d'entrée et de sortie sur le port 1 peuvent être écrites respectivement sous les noms  $a_1$  et  $b_1$ , et celles des ondes d'entrée et de sortie sur les ports 2 sous les formes  $a_2$  et  $b_2$ , respectivement. Ces paramètres sont soit les amplitudes de champ complexes du champ électrique ( $E$ ), soit le champ magnétique ( $B$ ). Les paramètres de diffusion sont collectés dans la matrice de diffusion  $[S]$ . Ils sont utilisés pour décrire la relation entre les ondes d'entrée  $[a]$  et celles des ondes de sortie  $[b]$ . Dans le cas d'un réseau à deux ports, la sortie peut être calculée en utilisant l'équation (2.13) :

Où  $S_{ij}$  sont les paramètres de diffusion avec les indices  $i$  indiquant le port de destination et  $j$  le port source. Étant donné que dans notre cas, la structure est symétrique et que l'onde plane n'est excitée qu'au port 1, seuls les deux paramètres de diffusion  $S_{11}$  et  $S_{21}$  exprimant respectivement les caractéristiques de réflexion et de transmission sont importants <sup>[22]</sup>.



**Figure 3.2 : Schéma de principe d'une plaque, placée dans un espace libre, irradiée par une onde plane polarisée linéairement et normalement incidente sur l'échantillon.**

Les paramètres de diffusion  $S_{11}$  et  $S_{21}$  pour une fréquence donnée  $f$  sont liés aux coefficients de réflexion  $R$  et de transmission  $T$  par les équations suivantes :

$$S_{11} = \frac{R(1 - T^2)}{1 - R^2T^2} \quad (3.2)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - R^2)}{1 - R^2T^2} \quad (3.3)$$

Le coefficient de réflexion  $R$  dans l'espace libre et la limites de la plaque peuvent être exprimé comme suit :

$$R = \frac{Z - 1}{Z + 1} \quad (3.4)$$

Le coefficient de transmission  $T$  à travers une plaque homogène est :

$$T = e^{-\gamma d} \quad (3.5)$$

En (3.3) et (3.4),  $Z$  et  $\gamma$  sont l'impédance caractéristique et la constante de propagation de la plaque, respectivement.

L'impédance caractéristique  $Z$  et la constante de propagation  $\gamma$  sont liées à la permittivité électrique complexe et à la perméabilité magnétique complexe comme suit

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (3.6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.7)$$

où  $\gamma_0 = i2\pi / \lambda_0$  est la constante de propagation de l'espace libre et  $\lambda_0$  la longueur d'onde en espace libre.

Les valeurs de  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont relatives à l'espace libre. En réarrangeant (3.2) et (3.3), on obtient :

$$R = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (3.8)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - R}{1 - (S_{11} + S_{21})R} \quad (3.9)$$

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2 S_{11}} \quad (3.10)$$

En (3.8) le signe  $\pm$  est choisi pour que  $|R| < 1$ .

En Réinsérant (3.4) dans (3.7) on obtiendra :

$$\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (3.11)$$

De (3.6) et (3.11) on obtient :

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \quad (3.12)$$

$$\mu = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1+R}{1-R} \right) \quad (3.13)$$

En inversant (3.5), la constante de propagation peut être écrite ainsi :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{1}{T}}{d} \quad (3.14)$$

Le paramètre de transmission T est un nombre complexe, donnant plusieurs valeurs pour  $\gamma$ . Une seule valeur peut définir T comme :

$$T = |T|e^{i\varphi} \quad (3.15)$$

Alors  $\gamma$  peut être exprimé comme suit :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{1}{T}}{d} + i \left( \frac{2\pi n - \phi}{d} \right) \quad (3.16)$$

où n est un entier.

En insérant la valeur de  $\gamma$  dans (3.12) et (3.13), on obtient la permittivité complexe effective  $\varepsilon$  et perméabilité complexe effective  $\mu$  de la plaque. La partie réelle de  $\gamma$  est une valeur unique, contrairement à la partie imaginaire de  $\gamma$  qui peut avoir plusieurs valeurs. Cela conduit à des résultats ambigus avec de multiples branches des fonctions complexes dépendant de la fréquence pour  $\varepsilon(f)$  et  $\mu(f)$ . Lorsque d est suffisamment grand, ces branches peuvent être arbitrairement proches les unes des autres rendant difficile le choix de la branche appropriée dans le cas de matériaux dispersifs.

Pour une onde plane, la constante de phase  $\beta$  est définie par :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.17)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le matériau de la plaque.

En comparant l'expression de la constante de phase  $\beta$  (3.17) et la partie imaginaire de la constante de propagation  $\gamma$  (3.16) on obtient :

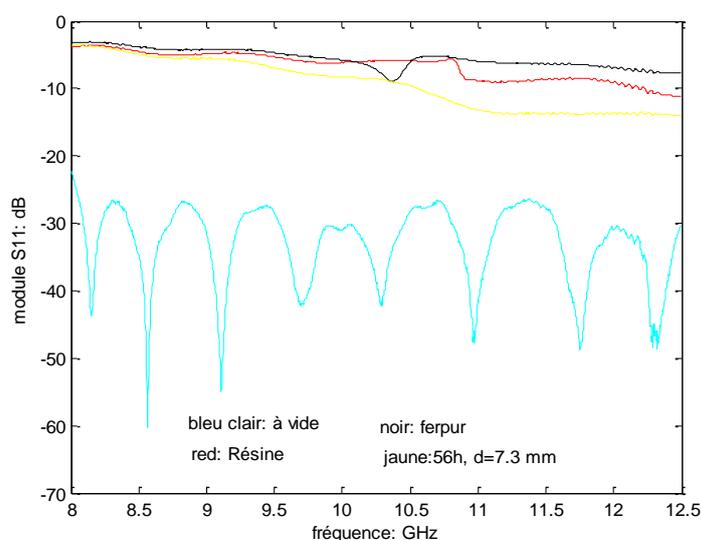
$$\frac{d}{\gamma} = n - \frac{\phi}{2\pi} \quad (3.18)$$

Pour  $n = 0$  et  $-2\pi < \phi < 0$ ,  $d / \lambda$  est compris entre 0 et 1. Si l'épaisseur de la plaque  $d$  est choisie telle qu'il satisfait  $d < \lambda$ , donc (3.12) et (3.13) fourniront chacun des valeurs uniques pour  $\varepsilon(f)$  et  $\mu(f)$ .

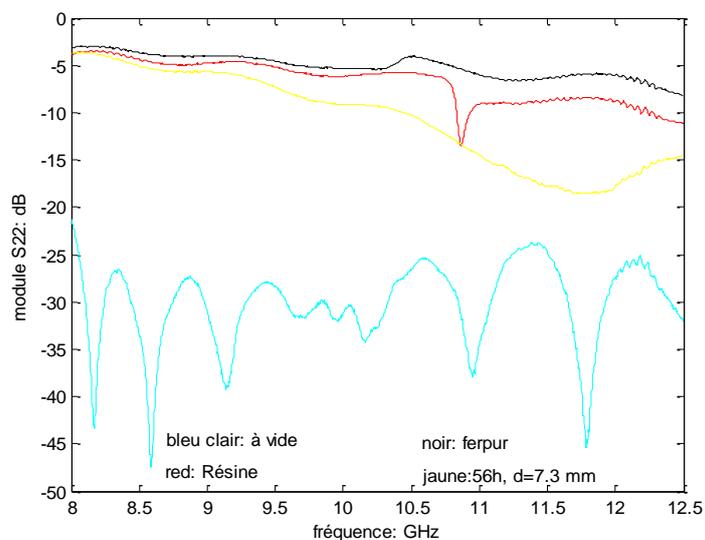
### 3.3. Résultats et Interprétation

#### 3.3.1 Caractérisation électromagnétique en fonction de la composition

Dans cette partie nous considérons quatre mesures de matrice de dispersion  $S$  pour trois échantillons composites de compositions différents à savoir un échantillon composite de résine époxy seule, un échantillon composite à base de fer pur (sans broyage), un échantillon composite à base de Fer-Silicium broyé pendant 56h et une mesure avec le guide d'onde vide dans le but d'obtenir des résultats qui serviront de référence et de comparaison.



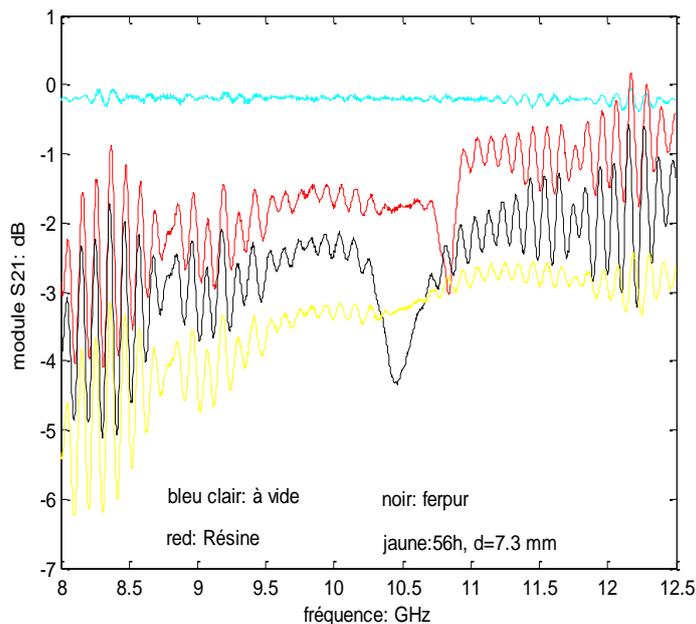
**Figure 3.3 : Paramètres  $S_{11}$  mesurés à différentes compositions.**



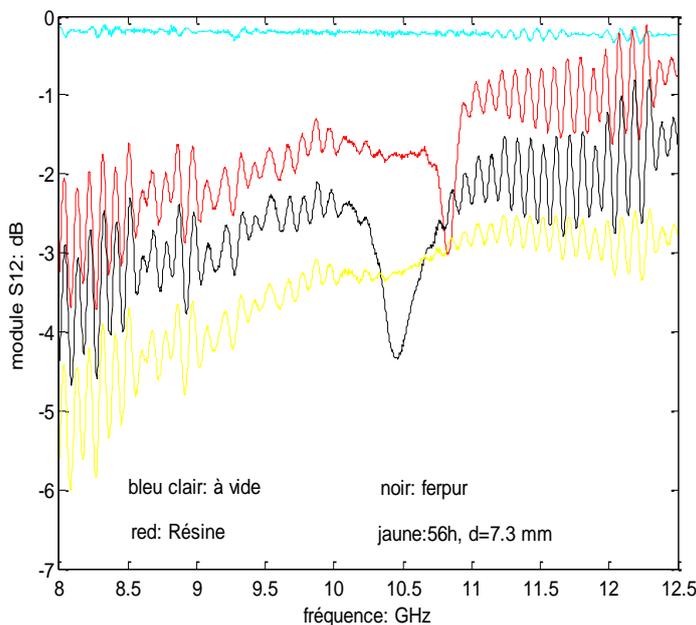
**Figure 3.4 : Paramètres  $S_{22}$  mesurés à différentes compositions.**

A partir de ces graphes qui représentent respectivement les modules de réflexions au niveau du port 1 et 2 en fonction de la fréquence, on constate que le vide a un faible module de réflexion (presque aucune réflexion) avec de points de divergence. Dans toute cette bande de fréquence le module de réflexion  $S_{11}$  varie entre -30 dB et -45 dB et le module de  $S_{22}$  entre -25 dB et -45 dB. La présence des autres échantillons composites dans l'expérience augmente les modules de réflexion  $S_{11}$  et  $S_{22}$  et les rend importants.

la résine, le fer pur et le fer-Silicium broyé pendant 56 heures ont presque la même valeur des modules de réflexion  $S_{11}$  et  $S_{22}$ , on voit que le fer pur et la résine ont des modules  $S_{11}$  et  $S_{22}$  quasi-constants (entre -4 dB et -10 dB) tandis que ces modules de réflexion du fer broyé pendant 56 heures sont plus faible que les 2 autres et se décroissent avec l'augmentation de la fréquence. Donc on confirme l'aspect diélectrique du vide (air) qui ne reflète pas plus de 4% de l'énergie EM, tandis que la propriété de réflexion des échantillons composites s'affaiblit avec le broyage.



**Figure 3.5 : Paramètres  $S_{21}$  mesurés à différentes compositions.**



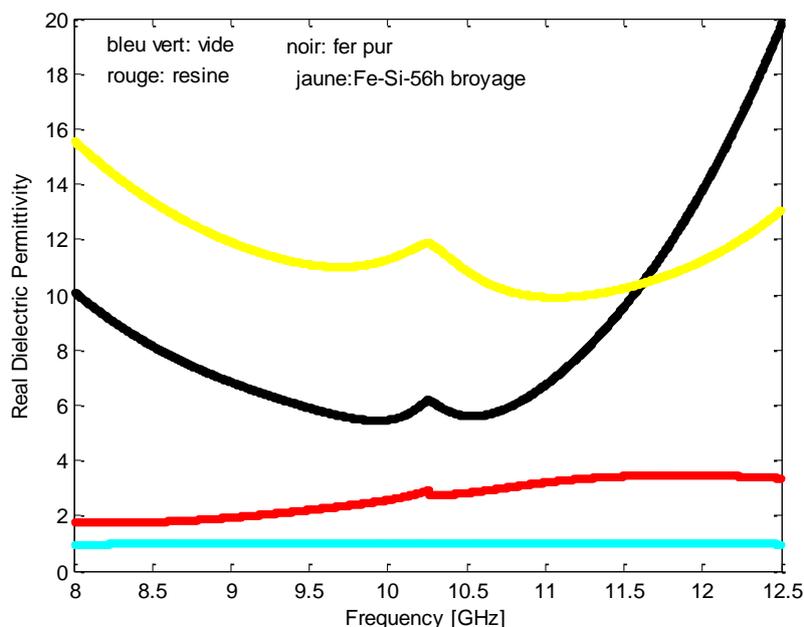
**Figure 3.6 : Paramètres  $S_{12}$  mesurés à différentes compositions.**

A partir de ces graphes qui représente respectivement les modules de transmission au niveau du port 1 et 2 en fonction de la fréquence, on constate directement que le vide a des modules de transmission quasi-nul mais la présence de n'importe quel matériau ou substance affaiblit ces modules, car la résine, le fer pur et le fer broyé pendant 56 heures ont des

modules de transmission beaucoup plus faible avec une forte variance. On constate que la résine et le fer ont des modules de transmissions quasi-identiques tandis que les modules du fer-Silicium broyé pendant 56 heures sont plus faibles en le comparant à ceux de la résine et du fer pur.

On conclut qu'en présence du vide la transmission e l'énergie EM est excellente (environ 96% de cette énergie) tandis que les 3 autres matériaux et substances ne le sont pas. Et aussi le broyage du matériau diminue la capacité à transmettre l'énergie EM probablement pour des phénomènes qui ont lieu dans le milieu matériel.

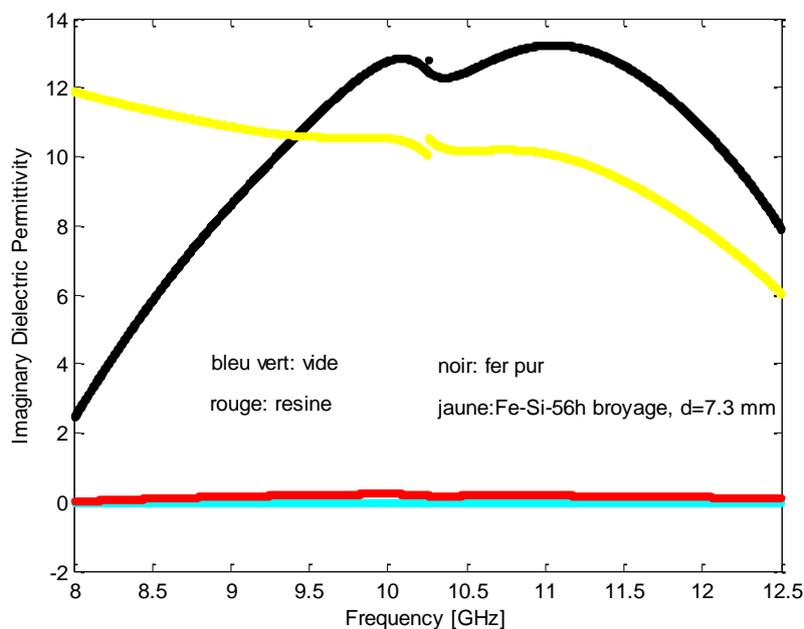
Dans les figures 3.7 à 3.10 sont illustrés les spectres des paramètres électromagnétiques extraits sous matlab par l'algorithme de Nicholson-Ross-Weir appliqué à la cellule de guide d'ondes rectangulaire.



**Figure 3.7 : Permittivité relative diélectrique à différentes compositions.**

A partir de ce graphe nous retrouvons la partie réelle de la permittivité relative du vide qui est faible et fluctue autour de 1. La partie réelle de la permittivité relative de la résine a une faible valeur avec une légère croissance dans le domaine spectral de l'expérience tandis que dans le cas du fer pur et dur fer-silicium broyé pendant 56 heures  $\epsilon_r'$  a une forte variance dans ce domaine spectral. Nous remarquons que  $\epsilon_r'$  du fer-silicium varie entre 9 et 16 tandis que celle du fer est inférieure à celle du fer-silicium sauf que sa valeur croit fortement à partir de 11

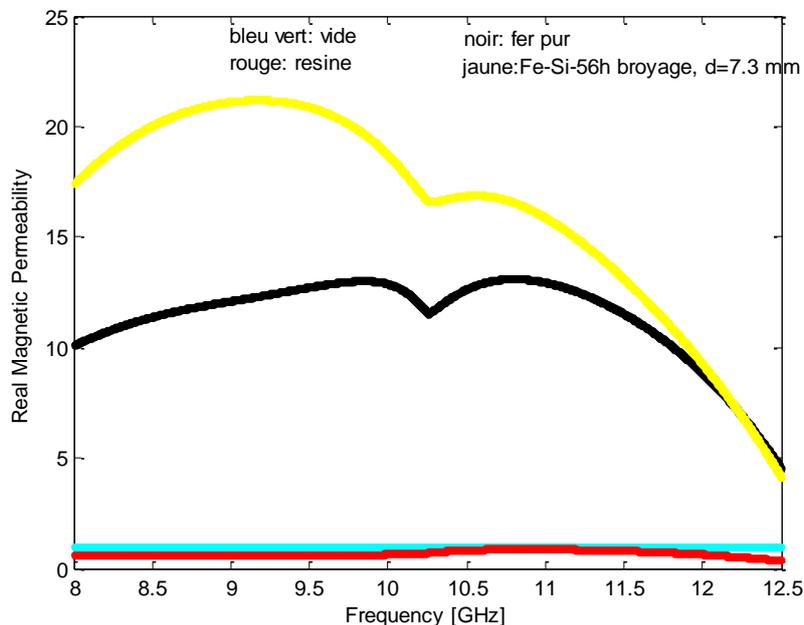
GHz. La constante diélectrique de l'échantillon composite à base de Fer-Silicium broyé pendant 56h augmente, cette amélioration est liée à la nature du renfort (présence de la phase Silicium) et à sa taille nanométrique. Les spectres dressés expriment l'aptitude de l'échantillon à stocker de l'énergie électromagnétique.



**Figure 3.8 : Pertes diélectriques à différentes compositions.**

A partir de ce graphique nous voyons que la partie imaginaire de la permittivité relative  $\epsilon_r''$  du vide et de la résine sont fluctuent autour de zéro. Dans ce domaine spectrale  $\epsilon_r''$  du fer-silicium broyé ne cesse de se décroître tandis que celle du fer pur prend de différentes valeurs dans un large intervalle (entre 2 et 13) exprimant les pertes d'énergie électrique dans les milieux matériels sous test.

Les spectres de la partie réelle de la perméabilité relative montrent que pour le vide et la résine sont quasi-constantes avec une fluctuation autour de 1 renseignant sur l'aspect non magnétique de ces milieux matériels. On voit aussi que  $\mu_r'$  du fer pur varie légèrement dans ce domaine spectral et décroît à partir de 11,5 GHz tandis que  $\mu_r'$  du fer-silicium broyé décroît le long de cette gamme de fréquence jusqu'à elle soit converge avec celle du fer pur. La perméabilité magnétique du nanocomposite à base de Fer-Silicium broyé est supérieur à celle du composite à base de Fer dans la majorité de la bande de fréquences, cette amélioration est toujours liée à la nature et la taille du renfort utilisé.

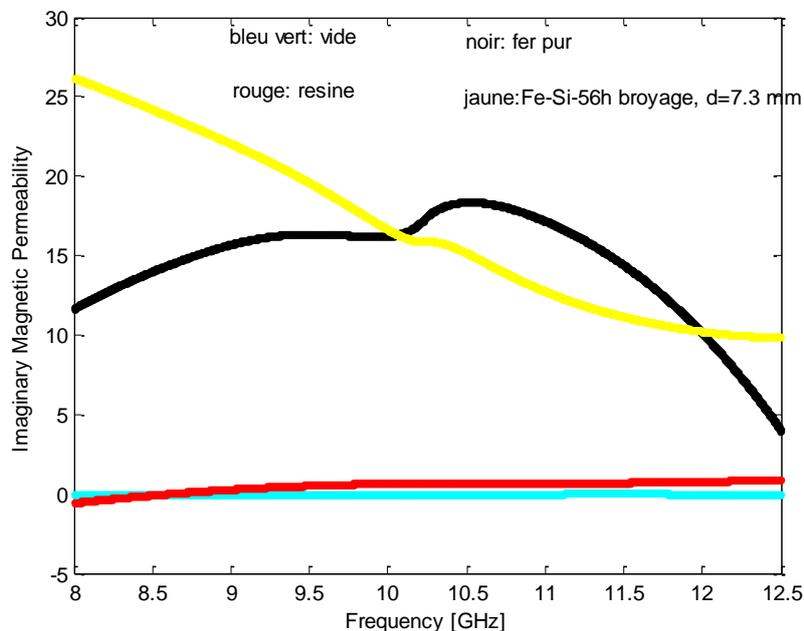


**Figure 3.9 : Perméabilité relative magnétique à différentes compositions.**

Dans la figure 3.9, la partie imaginaire de la perméabilité relative ( $\mu_r''$ ) du vide et de la résine sont très faibles exprimant le caractère non magnétique des milieux. On voit aussi que  $\mu_r''$  du fer pur varie entre 12 et 19 dans ce domaine spectral sauf qu'elle décroît et devient inférieure à 11 pour les fréquences supérieures à 11,5 GHz tandis que  $\mu_r''$  du fer-silicium broyé décroît d'une manière quasi-uniforme le long de cette bande de fréquence avec une amélioration dans les valeurs dans la partie inférieure du spectre. Ce comportement exprime les pertes magnétiques qui ont lieu dans les deux échantillons de matériaux composites à base de renforts métalliques.

La présence de la phase de silicium ainsi que le raffinement de la taille des particules et des grains après broyage à haute énergie conduit à une structure désordonnée avec beaucoup de déformations, cette structure raffinée et désordonnée met une fraction importante d'atomes en réaction avec le champ électromagnétique, ceci renforce la dissipation de l'énergie électromagnétique dans le milieu matériel. Les propriétés diélectriques et magnétiques citées favorisent une caractéristique d'absorption de l'énergie électromagnétique

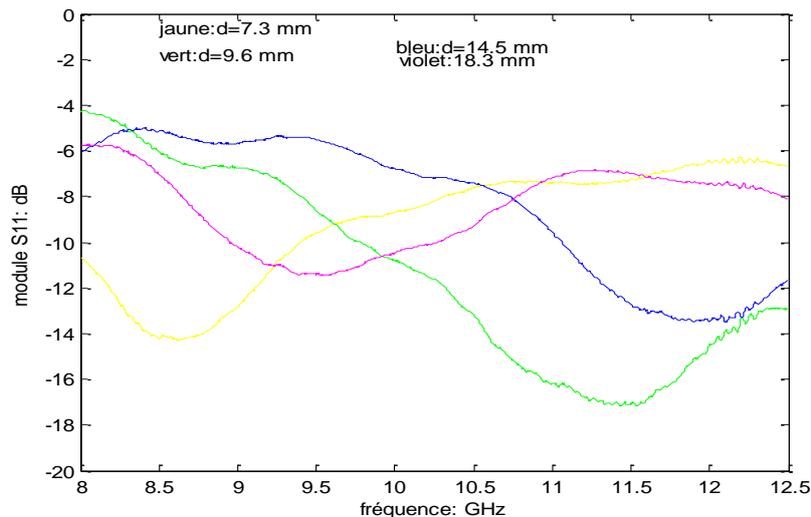
prometteuse dans la bande x en présence de poudres métalliques nanostructurées dans la matrice de résine.



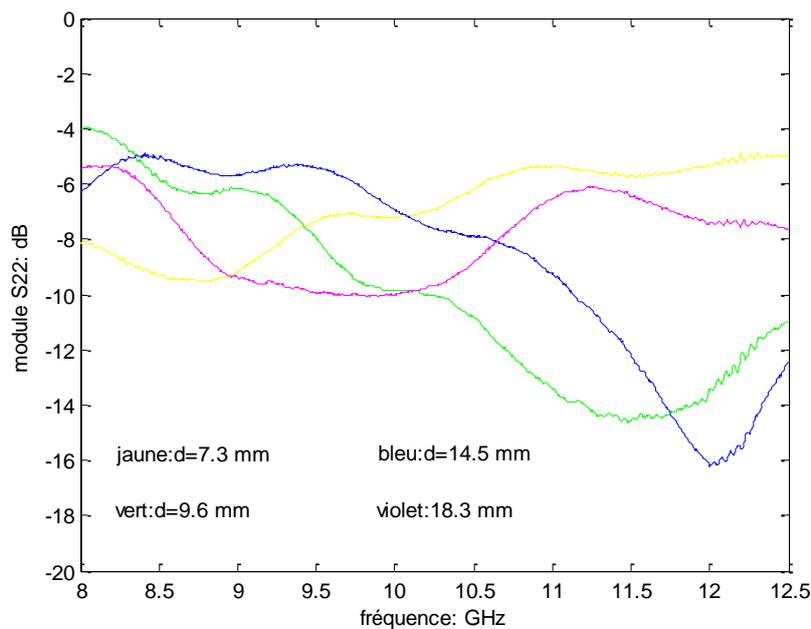
**Figure 3.10 : Pertes magnétiques à différentes compositions.**

### 3.3.2 Caractérisation électromagnétique en fonction de l'épaisseur

L'épaisseur d'un RAM est un paramètre très important lors d'une caractérisation électromagnétique, dans ce qui suit, nous présentons les résultats d'une caractérisation électromagnétique pour l'échantillon composite à base de Fer-Silicium disponible à différentes épaisseurs, nous tenons à signaler que l'épaisseur a été choisie arbitrairement.



**Figure 3.11 : Paramètres  $S_{11}$  mesurés à différentes épaisseurs.**

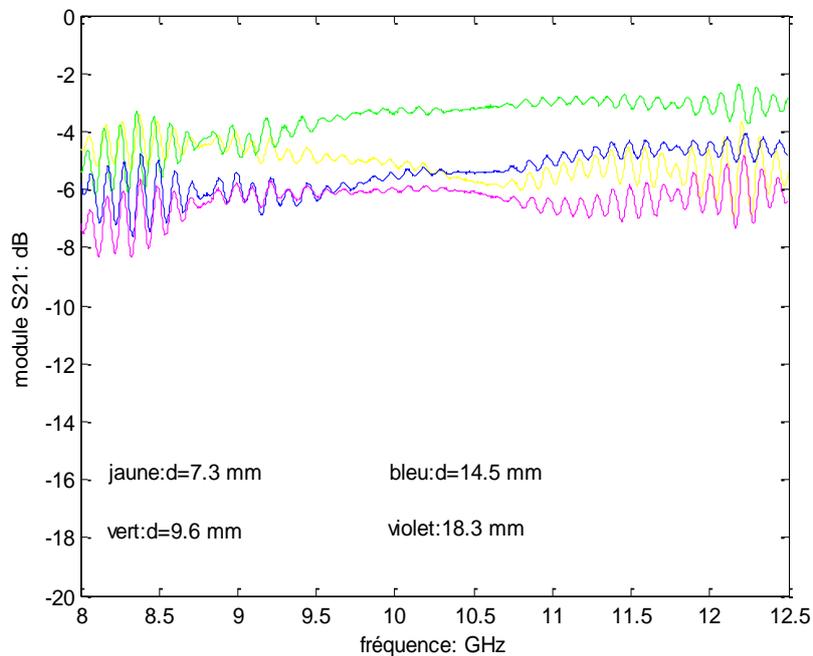


**Figure 3.12 : Paramètres  $S_{22}$  mesurés à différentes épaisseurs.**

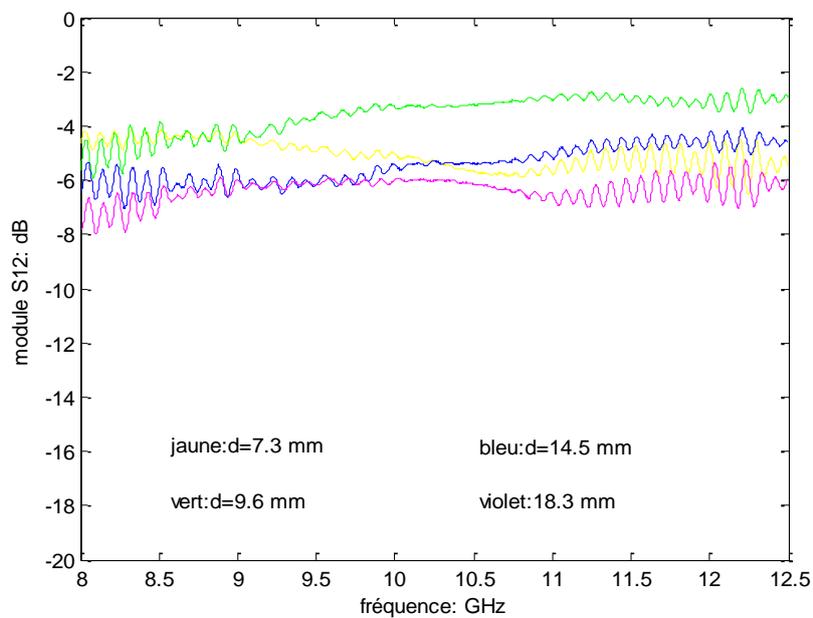
On remarque dans ces graphes des changements importants de la forme des modules  $S_{11}$  et  $S_{22}$  en variant l'épaisseur de l'échantillon. Dans cette large bande de fréquence on remarque que les modules de  $S_{11}$  et  $S_{22}$  ont des minimums inférieurs à -11 dB et -9 dB respectivement et qui changent de position avec la variation de l'épaisseur.

En ce qui concerne les coefficients de transmission On remarque que chacun de ces modules varie dans un intervalle de 2 dB de largeur. Les modules de  $S_{12}$  et  $S_{21}$  ont un maximum à atteindre pour une certaine épaisseur de l'échantillon avant qu'ils se diminuent pour chaque

augmentation de l'épaisseur de l'échantillon. La variation des modules de transmission est faible dans le domaine spectral.

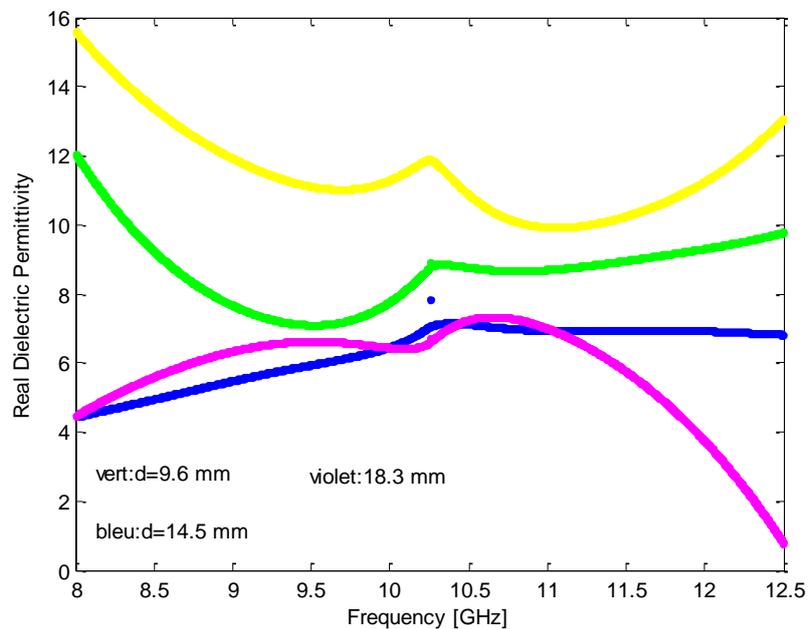


**Figure 3.13 : Paramètres  $S_{21}$  mesurés à différentes épaisseurs.**

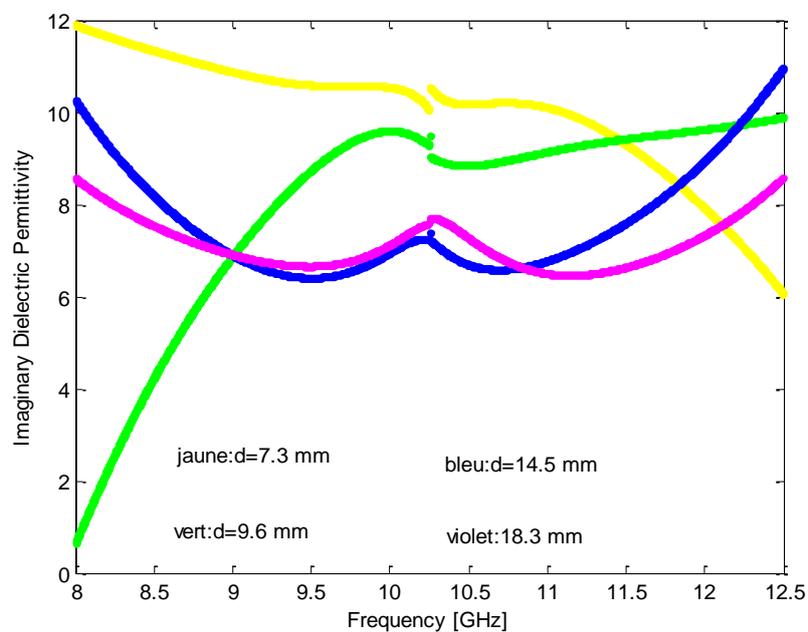


**Figure 3.14 : Paramètres  $S_{12}$  mesurés à différentes épaisseurs.**

Les spectres de permittivité diélectrique et de perméabilité magnétique obtenus pour l'échantillon nanocomposite à base de Fer-Silicium broyé pendant 56h et élaboré à différentes épaisseurs sont dressés dans les figures 3.15 à 3.18.

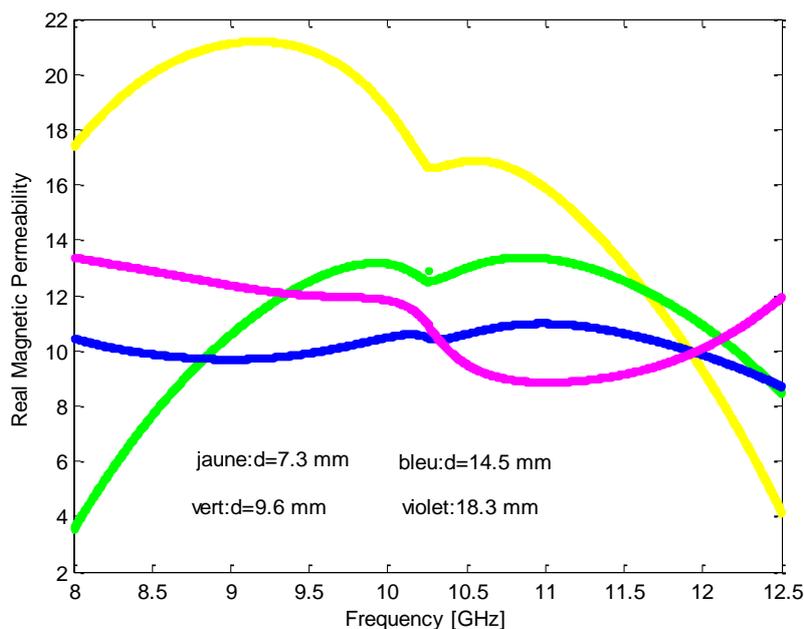


**Figure 3.15 : Permittivité relative diélectrique à différentes épaisseurs.**

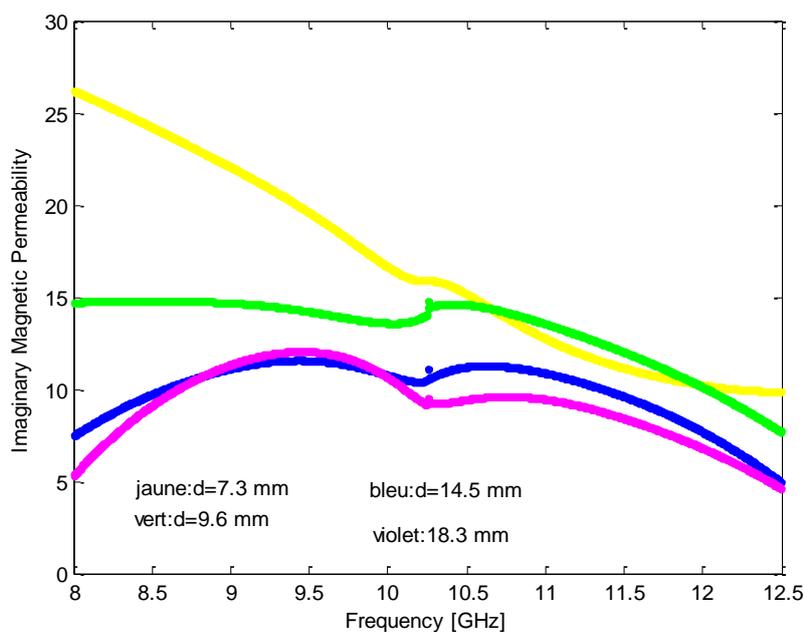


**Figure 3.16 : Pertes diélectriques à différentes épaisseurs.**

A partir des spectres 3.15 à 3.16 nous remarquons que la constante diélectrique et celle des pertes diélectriques adoptent une dépendance inversement proportionnelle avec l'épaisseur de l'échantillon. Plus cette dernière augmente, plus la permittivité diélectrique se dégrade. Ceci nous permet de dire que l'épaisseur la plus faible de l'échantillon et qui est de 7.3 mm favorise la capacité de stockage de l'énergie électromagnétique dans le milieu matériel provoquant ainsi les pertes diélectriques les plus importantes.

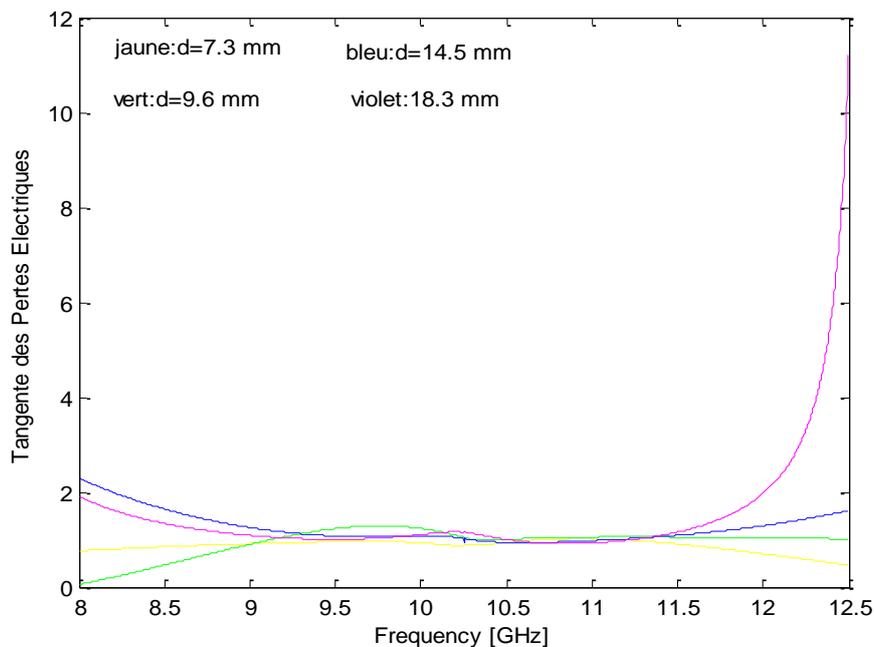


**Figure 3.17 : Perméabilité relative magnétique à différentes épaisseurs.**

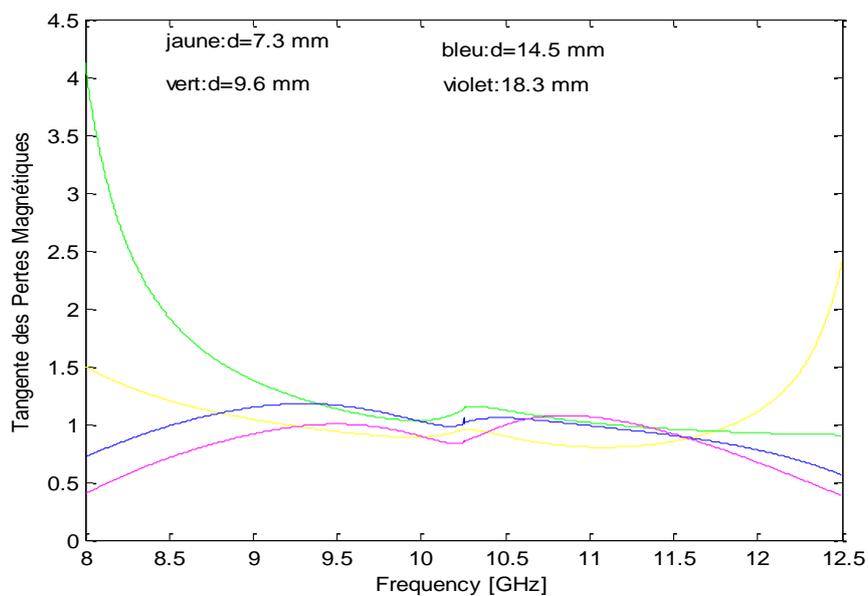


**Figure 3.18 : Pertes magnétiques à différentes épaisseurs.**

La même remarque a été soulignée pour la perméabilité magnétique ainsi que les pertes magnétiques. L'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon dégrade les propriétés magnétiques acquises comparativement à l'épaisseur de départ qui est de 7.3 mm. Mais il serait intéressant dans des travaux ultérieurs d'examiner l'effet de diminution de l'épaisseur par rapport à celle de départ.



**Figure 3.19 : Tangente des pertes diélectriques à différentes épaisseurs.**



**Figure 3.20 : Tangente des pertes magnétiques à différentes épaisseurs.**

A la fin, dans les figures 3.19 à 3.20 sont illustrés les spectres de la tangente des pertes diélectriques  $\tan\delta_E = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$  et la tangente des pertes magnétiques  $\tan\delta_M = \frac{\mu_r''}{\mu_r'}$ . La tangente des pertes diélectriques est considérée comme une mesure de l'absorption microondes, étant d'ordre de grandeur de 1 ou supérieure nous permet de considérer les échantillons composites comme milieux matériels à pertes diélectriques importantes. De même, la tangente des pertes magnétiques d'ordre de grandeur de 1 ou supérieure qualifie les échantillons composites à base de poudre fer-Silicium nanostructurée de milieux à pertes magnétiques importantes.

# CONCLUSION GENERALE

La génie des RAM est un champ d'activité qui s'impose dans l'industrie aéronautique dans le but de réduire la surface équivalente radar. Ce travail été entrepris dans le but de faire connaitre le principe de conception d'un matériau d'absorption radar. Une étude de l'état de l'art nous a permis d'avoir une idée sur beaucoup de disciplines à savoir la théorie radar, la science des matériaux, et les microondes.

Le développement de l'équation radar nous a permis d'explicitier le paramètre de surface équivalente radar et les mécanismes qui la gouvernent. Le choix des matériaux constituants joue un rôle dominant. Ceci nous a conduit à donner une idée sur les matériaux composites qui peuvent être utilisés pour le revêtement des aéronefs. Avec l'avènement des nanomatériaux, les choix se multiplient et s'orientent vers les nanocomposites pour faire profiter l'industrie aéronautique des nouvelles propriétés des nanomatériaux. Pour étudier le comportement d'un RAM soumis à l'action d'une onde électromagnétique dans une gamme de fréquences radar, il faut caractériser les propriétés électromagnétiques du RAM en termes de permittivité diélectrique et perméabilité magnétique.

Le choix de la méthode de caractérisation, la taille et la forme de l'échantillon de test disponible, la méthode et l'équipement de caractérisation électromagnétique ainsi que la bande de fréquences sont étroitement liés. Dans notre travail nous avons opté pour la technique de transmission/réflexion qu'on a accomplie en utilisant guide d'ondes métallique rectangulaire R100 associé à un analyseur de réseaux de 8719 ES de technologie Agilent. En conséquence la bande X (8.2 à 12.4 GHz) s'impose ainsi qu'une forme de cubes nanocomposites rectangulaires de section compatible avec celle du guide d'ondes et une épaisseur au choix. Durant ce travail, nous avons :

- Assister à l'élaboration de poudres nanométriques par broyage à billes au sein du laboratoire de science des matériaux à l'USTHB,
- Elaborer des nanocomposites pour test au sein de l'atelier de Propulsion de l'IAES,
- Mener une caractérisation électromagnétique de nos échantillons au sein de l'EMP.

- Etablir une routine de calcul sous Matlab pour l'extraction des spectres de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique.

Les conclusions générales qu'on peut souligner après l'accomplissement de ce travail sont les suivantes :

- L'élaboration des poudres nanométrique par broyage à billes qui est le procédé le plus simple est un procédé assez compliqué qui fait appel à des dispositifs de pointe pour l'élaboration et surtout la caractérisation de l'aspect nanométrique des poudres. Beaucoup de mesures de sécurité doivent être respectées,
- L'élaboration des nanocomposites doit respecter beaucoup de principe de la science des matériaux,
- La caractérisation électromagnétique met en œuvre des équipements microondes de pointe tel que le guide d'ondes métallique et l'analyseur de réseaux, la maîtrise de ces équipements constitue un grand acquis.
- La routine NRW de calcul des spectres de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique nous a permis de renforcer notre exercice du logiciel Matlab, vérifier les problèmes de cette méthode et essayer d'apporter des solutions.

Les perspectives qu'il est possible de déduire de ce travail peuvent être résumées en :

- L'extraction des spectres de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique par des méthodes numériques.
- Elargir l'étude pour des échantillons moins faibles en épaisseur
- Elargir l'étude pour d'autres bandes de fréquences, ce qui imposera d'autres formes d'échantillons (d'autres techniques d'élaboration) et d'autres méthodes de caractérisation électromagnétique.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1]:Kevin Gaylor Radar Absorbing Materials-Mechanism and materials Australia, AR N°005-686 1989 p8
- [2]:Cihangir Kemal Yuzcelik : "Thesis : radar absorbing material design", naval postgraduate school monterey, california, "septembre 2013" pp.5-14
- [3]:[https://fr.wikipedia.org/wiki/Brouillage\\_et\\_d%C3%A9ception\\_radar](https://fr.wikipedia.org/wiki/Brouillage_et_d%C3%A9ception_radar) "25-02- 2019"
- [4]:<https://fr.wikipedia.org/wiki/Furtivit%C3%A9> "02-03-2019"
- [5]:Defense Technical Information Center, Ft. Belvoir, Virginia
- [6]:Eugene F. Knott, John F. Schaeffer, Michael T. Tuley:"Radar Cross Section, 2nd edition", Artech House, 1993.
- [7]:[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau\\_absorbant\\_les\\_ondes\\_%C3%A9misses\\_par\\_les\\_radars](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_absorbant_les_ondes_%C3%A9misses_par_les_radars) "02-03-2019"
- [8]:<http://tpeavionsfurtifs.e-monsite.com/pages/iii.html> "02-03-2019"
- [9]:<http://aviondufutur.e-monsite.com/pages/composites/qu-est-ce-qu-un-composite.html> "20-03-2019"
- [10]:<http://www.composite.free.fr/materiaucomposite2.html> "03-04-2019"
- [11]:<https://fr.wikipedia.org/wiki/Nanocomposite#targetText=Un%20nanocomposite%20est%20un%20mat%C3%A9riau,des%20diff%C3%A9rences%20structurales%20et%20chimiques> "16-05-2019"
- [12]:Sandrine HOPPE " THESE: CONTRIBUTION A' L'ETUDE DE DEUX PROCÉDES D'ELABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES PRESENTANT DES PROPRIETES D'ABSORPTION AUX ONDES HYPERFREQUENCES" INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE "01-02-1995".pp 9-32
- [13]:<https://www.aquaportail.com/definition-8015-resine.html> "20-05-2019"
- [14]:[https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sine\\_\(v%C3%A9g%C3%A9tale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sine_(v%C3%A9g%C3%A9tale)) "20-05-2019"
- [15]:<https://www.centexbel.be/fr/lexicon/resine-synthetique> "23-05-2019"
- [16]:<https://www.memoireonline.com/11/12/6461/Methodes-de-synthese-des-nanomateriaux.html> "22-05-2019"

- [17]:<https://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9#targetText=La%20permittivit%C3%A9%2C%20plus%20pr%C3%A9cis%C3%A9ment%20permittivit%C3%A9,l%C3%A9lectrodynamique%20des%20milieux%20continus> "30-05-2019"
- [18]:MANALLAH Kamel,"magister theme Techniques de mesure hyperfréquences large bande appliquées aux matériaux hétérogènes solides", UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF, "04-07-2012" pp 20
- [19]:Sandrine HOPPE:"introduction de la thèse : contribution a l'étude de deux procédés d'élaboration de matériaux composites présentant des propriétés d'absorption aux ondes hyperfréquences", institut national polytechnique de lorraine, "01-02-1995"
- [20]:Z. Zerrougui, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif, 2007
- [21]:Filippo costa "department of engineering, universite of pizza" italy 56126 09 11-2017
- [22]:T.Galek "Extraction of effective permittivity and permeability of metallic powders in the microwave range" Institute of General Electrical Engineering, Rostock University, Justus-von-Liebig-Weg 2, D-18059 Rostock, Germany 02-03-2010