

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



مركز تنمية التكنولوجيات المتطورة

Centre de Développement des Technologies Avancées

قسم هندسة الاتصالات

Division télécoms

قسم هندسة الاتصالات



جامعة سعد دحلب البليدة 1

université Saad Dahlab Blida 1

كلية التكنولوجيا

Département Electronique

قسم الالكترونىك

Référence : ...../BR/2023

المرجع: ...../م/م 2023

# Mémoire de Master

Présenté au

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electronique

Spécialité : Micro-électronique

Réalisé par :

**M. BEDDIAR ABDERRAOUF**

## Thème

***Modélisation et simulation d'un nouveau matériau absorbant  
électromagnétiques : application en chambre anéchoïque.***

Soutenu le : **06/07/2023**

Devant la commission d'examen composée de :

MM : M.Bensabti

B.Zoubiri

A.Aissat

Aliane

Professeur Univ.

Docteur Univ.

Professeur Univ.

Professeur Univ.

Président

Encadreur

Co-encadreur

Examineur

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents avec toutes mes gratitudes pour toutes ces années de Sacrifices et d'encouragement.*

*A tous ceux et celles qui m'ont soutenu parmi mes amis.*



## Remerciements

*En tout premier lieu, mes vifs remerciements s'adressent à **Messieurs le Président et membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu apporté à ce mémoire et au thème traité.*

*Mes remerciements s'adresseront, particulièrement à **mon encadreur, Monsieur Dr.Bachir Zoubiri**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien moral et scientifique qui m'a permis de mener à terme ce travail.*

*Je remercie également **le co-encadreur, Monsieur Abdelkader Aissat**, qui, à aucun moment du parcours d'élaboration de ce mémoire, n'a arrêté son suivi, avec un intérêt particulier, pour les aspects pratiques liés à la concrétisation du projet.*

*Mes remerciements sincères vont au **Centre de Développement des Technologies Avancées**, pour m'avoir permis d'effectuer mon projet de fin d'étude et de m'avoir confié des responsabilités pour cette étude qui m'a permis d'enrichir ma formation.*

*Je remercie toute **l'équipe pédagogique du département électronique**, pour son encouragement permanent.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à **mes enseignants** qui ont fait de leurs mieux pour nous donner une formation universitaire exemplaire qui nous a permis d'atteindre cet objectif.*

# Sommaire

Soutenu le : 06/07/2023.....	i
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>1 Chapitre</b>	<b>2</b>
<b>APERÇU SUR LES CHAMBRES ANECHOÏQUE</b>	<b>2</b>
1. Introduction.....	2
2. Les chambres anéchoïques.....	2
2.1. Définition.....	2
2.2. Les types de chambre anéchoïque.....	3
2.3. La Structure d'une chambre anéchoïque.....	3
2.4. Pourquoi une chambre anéchoïque ?.....	5
2.5. Pourquoi tester les antennes ?.....	6
2.6. La chambre anéchoïque du Microwave Lab.....	6
3. Le Phénomène d'absorption.....	7
3.1. Les ondes hyperfréquences.....	8
3.2. Mécanismes et conditions pour l'absorption électromagnétique.....	9
<b>CONCLUSION</b>	<b>11</b>
<b>2 Chapitre</b>	<b>12</b>
<b>APERÇU SUR LES ABSORBANTS</b>	<b>12</b>
1. Introduction.....	12
2. Définition.....	12
3. Classification des absorbants en fonction de la largeur de bande de fonctionnement.....	13
3.1. Les absorbants résonnants :.....	13
3.2. Les absorbants « large bande » :.....	14
4. Les absorbants pour les chambres anéchoïques :.....	15
4.1. Absorbants commercialisés pour les chambres anéchoïques.....	16
4.2. Les absorbeurs pyramidaux.....	18
5. La géométrie des matériaux absorbants.....	21
6. Impédance du matériau et coefficient de réflexion.....	21
<b>Conclusion</b> .....	<b>22</b>
<b>3 Chapitre</b>	<b>23</b>
<b>SIMULATION D'UN NOUVEAU MATERIAU ABSORBANT ELECTROMAGNETIQUES PAR CST-MWS</b>	<b>23</b>
1. Introduction.....	23
2. Aperçu sur le logiciel CST :.....	24
3. Un absorbant à base de Carbone.....	24
3.1. Description de l'absorbant.....	24
3.2. Etude comparative (matériaux).....	25
3.3. Cas d'un matériau conducteur :.....	26
3.4. Les Résultats de la simulation du matériau conducteur Cuivre et vaccum l'aire :.....	28
3.5. Les Résultats de la simulation du matériau semi-conducteur le FR-4 :.....	29

3.6.	Les Résultats de la simulation du matériau diélectrique (isolant) le bois Wood :.....	31
3.7.	Les Résultats de la simulation du nouveau matériau absorbant à base de carbone : .....	32
4.	Etude comparative (Géométrique).....	34
4.1.	La forme cubique.....	34
4.2.	La forme pyramidale avec différent hauteur .....	36
5.	Partie Réalisation :.....	38
5.1.	Réalisation du carbone Absorbant : .....	38
6.	Conclusion .....	40
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>		<b>41</b>

## Liste des figures

Fig. 1.1 photo d'une chambre anéchoïque .....	2
Fig. 1.2 Structure d'une chambre anéchoïque.....	4
Fig. 1.3 Antenne cornet pyramidale dans la chambre anéchoïque Cal Poly Microwave Lab .....	5
Fig. 1.4 Coupe transversale de la chambre anéchoïque Cal Poly Microwave Lab .....	7
Fig. 1.5 Le phénomène d'absorption dans une chambre anéchoïque.....	8
Fig. 1.6 Atténuation des ondes électromagnétiques par l'atmosphère .....	9
Fig. 1.7 Représentation schématique d'une onde électromagnétique .....	10
Fig. 2.1 (a) Schématisation d'un écran de Salisbury, (b) écran original de Salisbury et (c) coefficient de réflexion de trois écrans de Salisbury réalisés avec trois matériaux « espaceurs » de permittivités différentes .....	13
Fig. 2.2 Schématisation d'un matériau chargé progressivement et présentant des couches d'impédances Z différentes .....	14
Fig. 2.3 Inside view of the anechoic chamber .....	15
Fig. 2.4 Piégeage des ondes électromagnétiques par les pyramides .....	16
Fig. 2.5 Tuile ferrite commercialisée par Comtest, dimensions et masse : 602 mm* 602 mm* 20 mm, 17 kg .....	17
Fig. 2.6 Absorbants (a) pyramidaux et (b) dièdres de chez Siepel .....	17
Fig. 2.7 Variation de la réflectivité avec la variation de l'épaisseur du revêtement de carbone dans un absorbeur .....	19
Fig. 2.8 Dessin technique de l'absorbeur pyramidal de forme carrée [1].....	20
Fig. 3.1 L'absorbant forme pyramidale réalisé avec CST. ....	24
Fig. 3.2 Photo du pyramide conducteur Copper .....	26
Fig. 3.3 Démonstration de la géométrie du pyramide .....	27
Fig. 3.4 S11 du cuivre .....	28
Fig. 3.5 Coefficient d'absorption du cuivre .....	28
Fig. 3.6 S11 du Vacuum (l'aire).....	29
Fig. 3.7 Coefficient d'absorption du vacuum (l'aire).....	29
Fig. 3.8 Le S11 du Fr-4 .....	30
Fig. 3.9 Coefficient d'absorption du Fr-4.....	30
Fig. 3.10 Le S11 du Wood.....	31
Fig. 3.11 Coefficient d'absorption du wood.....	31
Fig. 3.12 S1.1 du Nouveau matériau carbone .....	32
Fig. 3.13 Coefficient d'absorption du carbone.....	33
Fig. 3.14 S1.1 du fr4 ,Wood, carbone.....	33
Fig. 3.15 la forme cubique absorbant carbone .....	34

Fig. 3.16 S1.1 du carbone avec a nouvelle forme (cubique) .....	35
Fig. 3.17 Coefficient d'absorption du carbone forme cubique .....	35
Fig. 3.18 Comparaison de S1.1 entre Carbone forme cubique et pyramidale .....	36
Fig. 3.19 pyramide du carbone avec nouvelle hauteur.....	37
Fig. 3.20 S1.1 des deux hauteurs de carbone .....	37
Fig. 3.21 S1.1 de carbone avec plusieurs hauteurs .....	38
Fig. 3.22 la poudre de charbon .....	38
Fig. 3.23 Préparation de carbone .....	39
Fig. 3.24 absorbant en carbone forme pyramidale.....	40

# Listes des Acronymes et Symboles

## Acronymes

AUT : "Antenne Sous Test"

CST : Computer Simulation Technology.

FCC : Federal Communications Commission

FR-4 : Flame Resistant 4.

GHz : Giga hertz

ITU (International Telecommunications Union)

l'IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

LNA : Low Noise Amplifier (amplificateur à faible bruit).

NF : Noise figure (Le facteur de bruit).

NSA (National Security Agency)

RF : Radiofréquence

WPAN : Wireless Personal Area Network

Wi-fi : Wireless Fidelity

## Symboles

$c$  : célérité de la lumière dans le vide.  $c = 299792458$  m/s.

$f$  : fréquence d'étude.

$T = 1/\nu$  : période de l'onde électromagnétique.

$\epsilon_0$  : permittivité du vide.  $\epsilon_0 = 8.8541878176 \cdot 10^{-12}$  F/m.

$\mu_0$  : perméabilité du vide  $\mu_0 = 1.2566370614 \cdot 10^{-6}$  H/m.

$\epsilon$  : permittivité.

$\mu$  : perméabilité.

$\epsilon_r$  : permittivité relative.

$\mu_r$  : perméabilité relative.

---

# Introduction générale

Avec le fort développement de l'électronique et des télécommunications et l'amélioration des dispositifs radars, les appareils électroniques deviennent de plus en plus sensibles et complexes. Ces appareils sont très sensibles aux interférences provenant de sources externes telles que les ondes électromagnétiques, le bruit et les réflexions. [1]

Cette étude a pour objectifs d'étudier théoriquement et expérimentalement les conditions nécessaires pour mesurer avec précision et fiabilité les performances des appareils sans aucune interférence externe. Pour cela, il est indispensable de créer l'environnement approprié. Ainsi, la chambre anéchoïque est le recours le plus indiqué. Il s'agit d'une pièce conçue pour absorber toutes les ondes sonores et électromagnétiques, créant un environnement complètement isolé pour tester et mesurer les appareils électroniques. Cet environnement contrôlé permet aux ingénieurs de mesurer avec précision les performances des appareils sans aucune interférence externe [1]. Par exemple, imaginez que vous testez un nouveau smartphone. Dans une pièce ordinaire, il peut y avoir des bruits extérieurs provenant de personnes qui parlent, de voitures qui passent ou même de signaux radio. Ces facteurs externes pourraient affecter la précision de vos résultats de test. Cependant, dans une chambre anéchoïque, tous les bruits extérieurs sont éliminés, ce qui vous permet d'obtenir des résultats précis et fiables.

L'étude du thème, que nous vous présentons, se fait en trois (03) chapitres structurés selon le plan suivant :

1. Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les chambres anéchoïques.
  2. Dans le deuxième chapitre, nous abordons les absorbants en détaillant leur principe de fonctionnement, leurs mécanismes d'absorption ainsi que leurs bandes de fréquences de fonctionnement.
  3. Le dernier chapitre est réservé à la simulation d'un absorbant à base de carbone. Les résultats de simulations sont présentés et discutés. Des études paramétriques ont été également effectuées.
-

# Chapitre 1

## Aperçu sur Les chambres anéchoïque

### 1. Introduction

Les ondes électromagnétiques sont des perturbations du champ électrique et magnétique qui se déplacent dans l'espace et peuvent être perçues comme de la lumière ou des signaux radio.

Les chambres anéchoïques sont utilisées pour mesurer les performances acoustiques ou électromagnétiques des équipements ou des dispositifs, sans que les résultats soient influencés par les réflexions d'ondes.

### 2. Les chambres anéchoïques

#### 2.1. Définition

Une chambre anéchoïque est une pièce qui est conçue pour absorber toutes les ondes sonores ou électromagnétiques qui y entrent. Cela signifie qu'il n'y a pas de réflexion des ondes sonores ou électromagnétiques à l'intérieur de la pièce, ce qui la rend idéale pour les expériences scientifiques et les tests de produits. Pour rendre une chambre anéchoïque, les murs, le plafond et le sol sont recouverts de matériaux spéciaux qui absorbent les ondes sonores et électromagnétiques. Les matériaux utilisés sont souvent des mousses acoustiques, des fibres de verre ou des panneaux de plâtre spéciaux. Lorsque vous entrez dans une chambre anéchoïque, vous pouvez avoir l'impression d'être dans un espace vide et étrange. Cela est dû au fait que vous n'entendez aucun écho ou réverbération, ce qui perturbe votre perception habituelle de l'espace. Les scientifiques utilisent souvent des chambres anéchoïques pour étudier les sons et les ondes électromagnétiques, car elles permettent d'isoler et de mesurer avec précision ces phénomènes. [4]

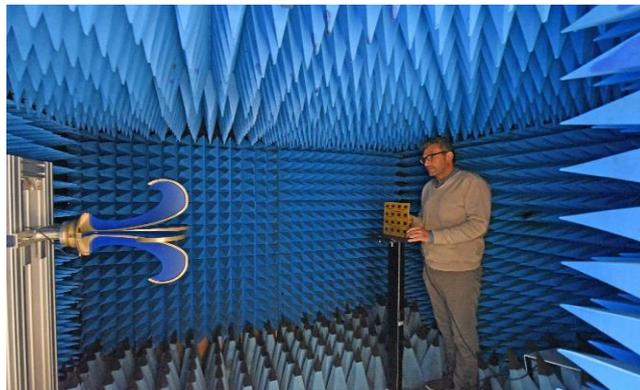


Fig. 1.1 photo d'une chambre anéchoïque .

---

## 2.2. Les types de chambre anéchoïque

Il existe plusieurs types de chambres anéchoïques, chacun avec ses propres caractéristiques et utilisations. Voici quelques exemples:

1. **Chambres anéchoïques pour les tests acoustiques:** Ces chambres sont utilisées pour mesurer les niveaux de bruit et les performances acoustiques des produits tels que les haut-parleurs, les microphones, les instruments de musique, etc. Elles sont généralement équipées de surfaces absorbantes de bruit et de matériaux spéciaux pour éliminer les interférences sonores extérieures.
2. **Chambres anéchoïques pour les tests de radiofréquences:** Ces chambres sont conçues pour les tests de radiofréquences, tels que les tests d'équipements de télécommunications, de télévision ou de satellites. Elles sont équipées de matériaux isolants pour bloquer les signaux RF extérieurs et minimiser les interférences.
3. **Chambres anéchoïques pour les tests de compatibilité électromagnétique (CEM):** Ces chambres sont utilisées pour tester la compatibilité électromagnétique des produits tels que les ordinateurs, les équipements médicaux, les automobiles, etc. Elles sont conçues pour empêcher les ondes électromagnétiques d'entrer ou de sortir de la chambre.

## 2.3. La Structure d'une chambre anéchoïque

La structure d'une chambre anéchoïque en microélectronique est conçue pour minimiser les interférences et fournir un environnement contrôlé pour tester les composants électroniques. Tout d'abord, les parois de la chambre doivent être revêtues de matériaux absorbant les ondes électromagnétiques. Cela peut inclure des matériaux comme la mousse ou d'autres revêtements spécialisés conçus pour absorber les ondes de radiofréquence (RF). Deuxièmement, la chambre doit être protégée des sources externes d'interférences électromagnétiques. Cela signifie que les parois de la chambre doivent être constituées de matériaux conducteurs capables de bloquer les signaux RF externes. Troisièmement, la chambre doit être conçue pour minimiser les réflexions des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la chambre. Ceci peut être réalisé grâce à l'utilisation de formes et de matériaux spécialisés qui absorbent ou redirigent les ondes dans la chambre. [1] La conception d'une chambre anéchoïque en microélectronique nécessite un examen attentif de plusieurs facteurs

différents, notamment la taille, les matériaux et le type de test. En créant un environnement complètement insonorisé, il est possible de garantir des résultats de test précis et fiables pour les appareils électroniques[5].

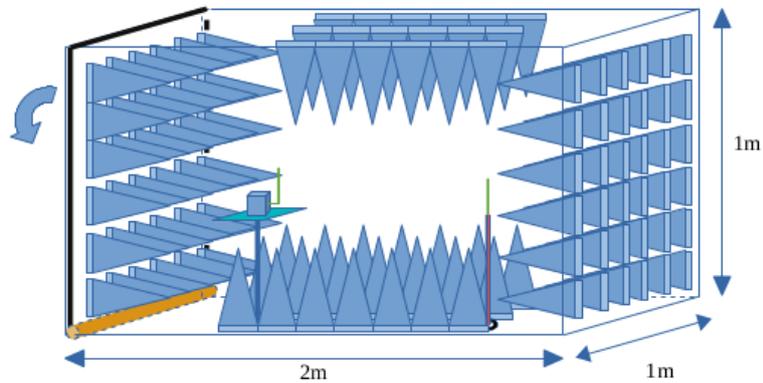


Fig. 1.2 Structure d'une chambre anéchoïque.

La construction d'une chambre anéchoïque pour les antennes de mesure nécessite des matériaux absorbants pour les ondes électromagnétiques, tels que des cônes de mousses, des panneaux de fibres minérales, des plaques de plâtre perforées, des tissus métalliques, des ferrites, etc.. Les murs et le plafond de la chambre anéchoïque sont recouverts de ces matériaux absorbants pour les ondes électromagnétiques[3]

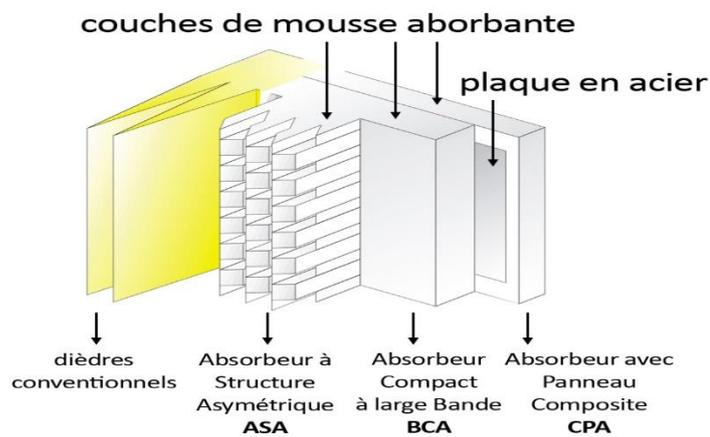


Fig. 1.3.2 Structure d'une chambre anéchoïque détaillée.

## 2.4. Pourquoi une chambre anéchoïque ?

Les antennes sont testées dans ce qu'on appelle les portées d'antenne, et tandis que divers Types de gammes existent, chacune s'efforce de créer un environnement de test idéal similaire.

Les deux variables environnementales les plus importantes dans les tests d'antenne sont le bruit et les réflexions.

Le bruit est une interférence électromagnétique indésirable qui peut provenir de diverses sources externe et interne au système d'antenne. Les reflets dévient le test

Surfaces de l'environnement et superposer avec le signal de voie directe.

Les chambres anéchoïques sont des pièces fermées revêtues d'un matériau absorbant conçu pour supprimer les reflets. Bien que plus chères que les cuisinières extérieures, les chambres anéchoïques offrent une isolation du monde extérieur et un environnement de test fermé et cohérent.

Les gammes extérieures sont exposées aux signaux RF ambiants et aux limitations météorologiques. Temps est imprévisible, affecte les caractéristiques (humidité et pluie) entre la transmission et recevoir des antennes et peut endommager l'équipement de test [2].

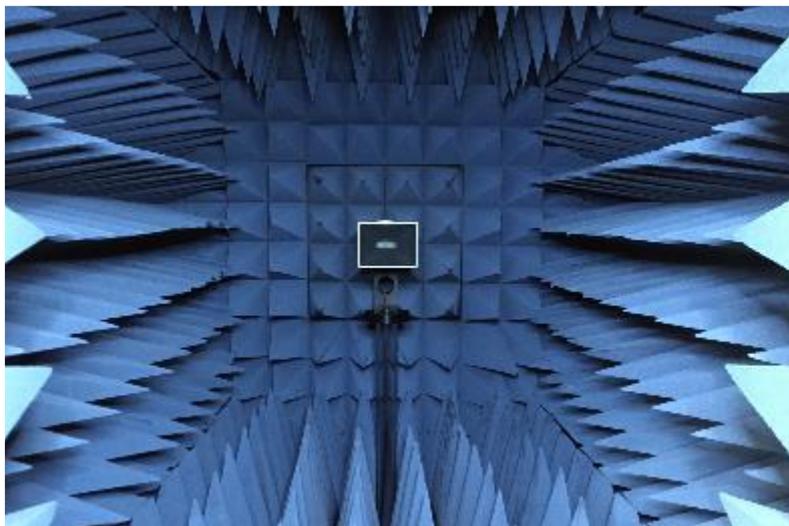


Fig. 1.3 Antenne cornet pyramidale dans la chambre anéchoïque Cal Poly Microwave Lab

La chambre anéchoïque Cal Poly Microwave Lab de la figure 1.3 utilise une mousse pyramidale blocs pour absorber les signaux parasites et supprimer les réflexions. Absorbent pyramidaux absorber progressivement l'énergie par pertes ohmiques en augmentant régulièrement l'impédance de l'espace libre à la surface de l'absorbent au matériau avec pertes à haute impédance.

En plus de tester les antennes, les chambres anéchoïques sont couramment utilisées pour la FCC tests d'émissions et d'immunité sur les téléphones portables. La FCC établit des directives sur la

puissance et les dispositifs de signaux de fréquence peuvent émettre pour ne pas interférer avec d'autres systèmes sans fil.

Les tests d'immunité garantissent qu'un système peut fonctionner normalement là où des sources RF étrangères sont présents. L'environnement sans bruit est idéal pour la précision scientifique de ces tests.

### **2.5. Pourquoi tester les antennes ?**

Tous les systèmes sans fil reposent sur des antennes pour transmettre et recevoir des signaux électromagnétiques. Selon le système de communication – GPS, Wi-Fi ou point à point liaisons de Données.

- les antennes sont utilisées pour optimiser la transmission des messages pour plusieurs systèmes. Il est important de tester les antennes pour vérifier les normes de performance requises par le système, y compris gain et directivité.

Les caractéristiques des performances de l'antenne comprennent le diagramme de rayonnement, la résonance, fréquence et sensibilité dans le cadre d'un système. Les mesures doivent être effectuées dans un environnement isolé et sans bruit.

Le bruit électromagnétique interdit une antenne précise mesure et est atténuée par une chambre anéchoïque .

Le test d'antenne implique des mesures répétitives lors de la rotation de l'antenne sous test (AUT) dans toutes les directions, ce qui se prête à l'automatisation. Mesurer le gain d'une antenne dans une seule dimension est simple à faire manuellement, mais mesurer manuellement son gain dans un plan sphérique de 360° à des intervalles de 1° devient chronophage et difficile à effectuer avec précision. L'automatisation de la mesure améliore donc le processus de conception en diminuant la durée des tests et en améliorant la qualité des résultats. En outre, l'automatisation améliore la répétabilité des tests et élimine de nombreuses possibilités d'erreur humaine

### **2.6. La chambre anéchoïque du Microwave Lab**

La nouvelle chambre anéchoïque du Cal Poly Microwave Lab mesure 6'x6'x8' et est fait d'un cadre en bois imbriqué. Des absorbeurs pyramidaux en mousse de 16 pouces tapissent l'intérieur de la chambre à l'exception d'une petite ouverture en bas pour la monture AUT. Il y a des panneaux

d'accès amovibles aux extrémités, en haut et sur les côtés de la chambre. Les panneaux permettent l'accès à l'AUT pendant le montage, fournissent une fenêtre pour la réception de l'antenne pour mesurer l'AUT à partir de, et permettre la visualisation de l'AUT pendant un test pour s'assurer le positionneur fonctionne correctement. La figure 1.4 montre une coupe transversale de la chambre lors d'un essai typique de mesure du diagramme de rayonnement [1] [2].

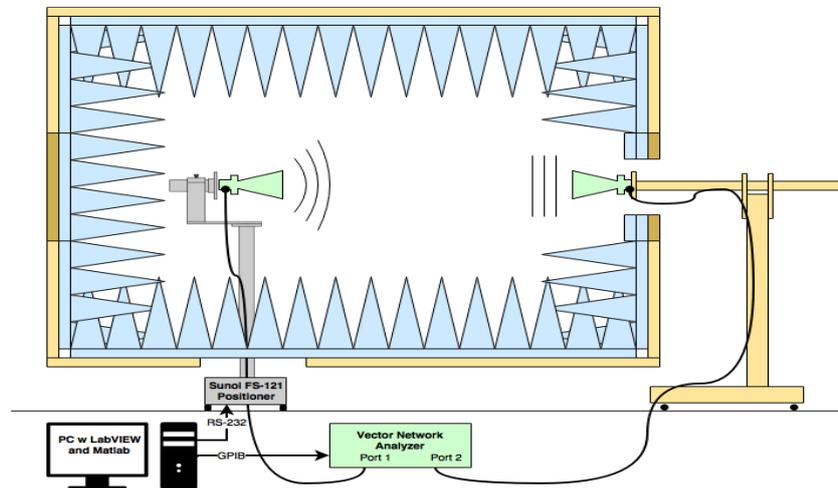


Fig. 1.4 Coupe transversale de la chambre anéchoïque Cal Poly Microwave Lab

### 3. Le Phénomène d'absorption

Quand on parle d'absorption, on fait référence à la façon dont les parois de la chambre sont conçues pour absorber les ondes électromagnétiques. Les parois sont généralement constituées d'un matériau conçu pour absorber autant d'énergie électromagnétique que possible. Ce matériau est généralement composé d'une combinaison de mousse, de caoutchouc et d'autres matériaux qui absorbent bien les ondes électromagnétiques. La raison pour laquelle l'absorption est importante dans une chambre anéchoïque est que nous voulons créer un environnement dans lequel nous pouvons tester des appareils électromagnétiques sans aucune interférence de sources externes. En absorbant toutes les ondes électromagnétiques dans la pièce, nous pouvons créer un environnement contrôlé où nous pouvons mesurer la sortie de l'appareil que nous testons sans aucune interférence [6].

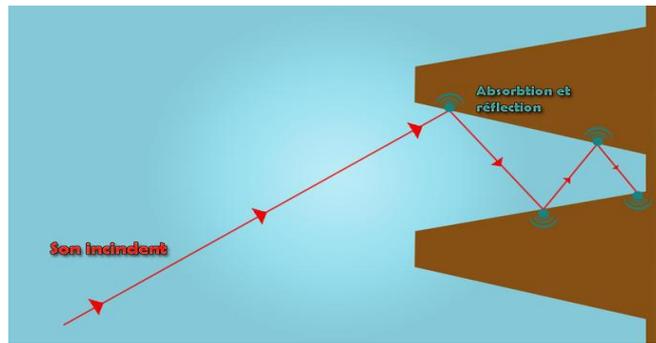


Fig. 1.5 Le phénomène d’absorption dans une chambre anéchoïque.

Les absorbants pour les chambres anéchoïques adoptent le plus souvent des géométries graduelles comme des pyramides ,dièdres. Ces géométries permettent de combiner plusieurs caractéristiques.

### 3.1. Les ondes hyperfréquences

Les ondes hyperfréquences, couramment appelées micro-ondes, sont des ondes Électromagnétiques situées entre les ondes radio et les infrarouges. Le domaine des micro-ondes se situe entre quelques centaines de MHz et quelques centaines de GHz. Une nomenclature à base de lettres a été proposée par l’IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en 1984 (Table 1). Ces désignations sont aujourd’hui plus utilisées que celles de la nomenclature ITU (International Telecommunications Union) et nous les retrouvons dans la plupart des articles scientifiques [1].

Tableau 1. Nomenclatures des ondes hyperfréquences proposées par IEEE et par ITU

Nomenclature Radar IEEE		Nomenclature ITU			
Lettres de désignation Radar	Bande de fréquences	Bande de fréquences	Numéro de bande	Désignation de la bande	Désignation métrique correspondante
HF	3-30 MHz	3-30 MHz	7	Hautes Fréquences (HF)	Ondes décimétriques
VHF	30-300 MHz	30-300 MHz	8	Très Hautes Fréquences (VHF)	Ondes métriques
UHF	300-1000 MHz	0,3-3 GHz	9	Ultra Hautes Fréquences (UHF)	Ondes décimétriques
L	1-2 GHz				
S	2-4 GHz	3-30 GHz	10	Super Hautes Fréquences (SHF)	Ondes centimétriques
C	4-8 GHz				
X	8-12 GHz				
Ku	12-18 GHz				
K	18-27 GHz				
Ka	27-40 GHz	30-300 GHz	11	Extrêmement Hautes Fréquences	Ondes millimétriques
V	40-75 GHz				
W	75-110 GHz				
mm	110-300 GHz				

Ces ondes trouvent leurs applications dans les télécommunications et la détection Radar car elles sont relativement peu absorbées par l'atmosphère terrestre [1].

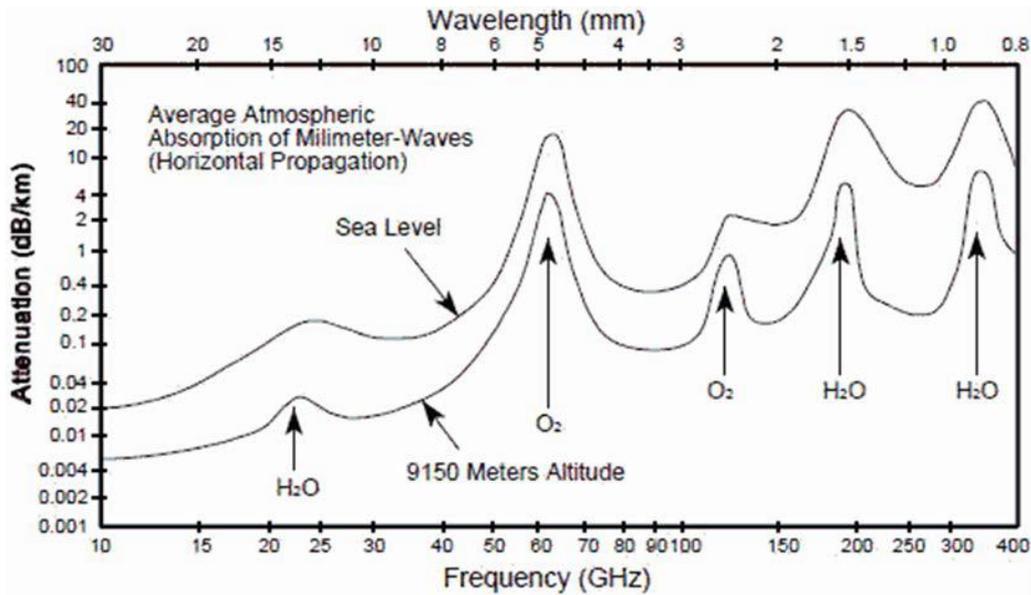


Fig. 1.6 Atténuation des ondes électromagnétiques par l'atmosphère

### 3.2.Mécanismes et conditions pour l'absorption électromagnétique

#### 3.2.1.Permittivité diélectrique, perméabilité magnétique et pertes associées

Afin d'appréhender les mécanismes d'absorption électromagnétique, deux grandeurs physiques doivent être introduites : la permittivité diélectrique  $\tilde{\epsilon}$  qui s'exprime en F.m-1 et la perméabilité magnétique  $\tilde{\mu}$  qui s'exprime en H.m-1. Ces grandeurs sont complexes (signalées par un tilde), elles présentent donc une partie réelle et une partie imaginaire :

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \dots \dots \dots (1)$$

$$\tilde{\mu} = \mu' - j\mu'' = \mu_0(\mu_r' - j\mu_r'') \dots \dots \dots (2)$$

On définit alors  $\epsilon_r'$  et  $\epsilon_r''$  : permittivités réelle et imaginaire relatives (sans dimension) telles que  $\epsilon_r' = \epsilon'/\epsilon_0$  et  $\epsilon_r'' = \epsilon''/\epsilon_0$  ainsi que  $\mu_r'$  et  $\mu_r''$  : perméabilités réelle et imaginaire relatives (sans dimension) telles que  $\mu_r' = \mu'/\mu_0$  et  $\mu_r'' = \mu''/\mu_0$ , avec  $\epsilon_0$  la permittivité du vide qui vaut

8,854187.10-12 F.m-1 et  $\mu_0$  la perméabilité du vide qui vaut  $4\pi.10^{-7}$  H.m-1.

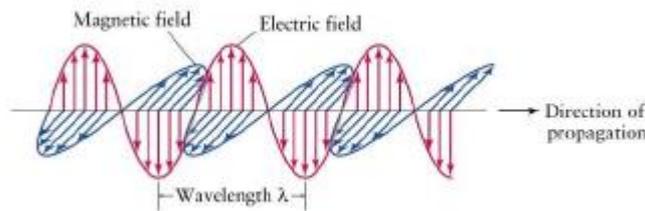
La partie réelle et la partie imaginaire de ces grandeurs traduisent respectivement le stockage et la dissipation d'énergie par le matériau. Les pertes diélectriques et magnétiques d'un matériau sont définies par les équations [1] :

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \text{ et } \tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \dots \dots \dots (3)$$

**3.2.2.Mécanismes de dissipation d'énergie**

Une onde électromagnétique plane est constituée d'un champ électrique et d'un champ

Magnétique perpendiculaires entre eux et oscillants comme cela est schématisé en figure 2.2.2 Les mécanismes de dissipation d'énergie découlent de l'interaction de l'un ou l'autre de ces champs avec le matériau absorbant [3].



**Fig. 1.7 Représentation schématique d'une onde électromagnétique**

La puissance dissipée par un matériau interagissant avec l'onde électromagnétique de fréquence f, de champ électrique d'amplitude E et de champ magnétique d'amplitude H est décrite au travers de la densité totale de puissance par :

$$P_{em} = 2\pi f (\epsilon' + (\tan \delta_\epsilon) E^2 + \mu' ((\tan \delta_\mu) H^2)) \dots \dots \dots (4)$$

## Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons vu la définition des chambres anéchoïque puis nous avons exposé les types de ces chambres, leur structure, leur fonctionnement et on a donné l'exemple avec la nouvelle chambre anéchoïque du Cal Poly Microwave Lab. Dans la suite de ce chapitre nous avons aborder le phénomène d'absorption, tout en indiquant les hyper fréquences. Dans la dernière partie nous avons cité les mécanismes et les conditions d'absorption électromagnétique.

# *Chapitre 2*

## **Aperçu sur les absorbants**

### **1. Introduction**

Les ondes électromagnétiques sont partout autour de nous, que ce soit les ondes radio, les ondes Wi-Fi, ou même les ondes émises par nos téléphones portables. Bien que ces ondes soient invisibles à l'œil nu, elles peuvent avoir des effets indésirables sur notre santé. Les absorbeurs électromagnétiques sont utilisés pour réduire ces effets indésirables en absorbant les ondes électromagnétiques. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que la télécommunication, l'aérospatiale, l'industrie automobile et même dans les vêtements. Il existe différents types d'absorbeurs électromagnétiques, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Certains sont fabriqués à partir de matériaux métalliques, tels que le fer ou le cuivre, tandis que d'autres sont fabriqués à partir de matériaux polymères, tels que le caoutchouc ou le silicone. Les absorbeurs électromagnétiques peuvent être utilisés pour protéger les gens des ondes électromagnétiques, mais ils peuvent également être utilisés pour protéger les appareils électroniques des interférences électromagnétiques [1].

### **2. Définition**

Les matériaux absorbants sont des matériaux qui absorbent les ondes électromagnétiques. Ces matériaux sont utilisés pour réduire la réflexion des ondes électromagnétiques et pour minimiser les interférences électromagnétiques. Ils sont utilisés dans une variété d'applications, y compris les antennes, les radars, les systèmes de communication sans fil et les équipements électroniques, ainsi dans la conception de chambres anéchoïques, qui sont des espaces où les ondes électromagnétiques ne sont pas réfléchies. Les matériaux absorbants sont souvent fabriqués à partir de matériaux tels que la ferrite, le carbone, le graphite et le caoutchouc de silicone. Les propriétés électromagnétiques de ces matériaux peuvent être ajustées pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application [7].

---

### 3. Classification des absorbants en fonction de la largeur de bande de fonctionnement

Il existe une grande diversité de matériaux absorbants. Ils peuvent être classés de différentes manières : selon leur application, selon les matériaux dont ils sont constitués (matériaux à pertes diélectriques ou à pertes magnétiques), selon leur forme (plaques, pyramides, nid d'abeilles...) selon la fréquence ou la largeur de leur bande de fonctionnement[1].

#### 3.1. Les absorbants résonnants :

Les absorbants résonnants fonctionnent en utilisant des structures résonnantes, qui sont des configurations spéciales de métal et de matériau diélectrique qui sont conçues pour résonner à une fréquence spécifique. Lorsque les ondes électromagnétiques frappent ces structures, elles sont absorbées et converties en chaleur, comme les écrans de Salisbury, les couches de Dällenbach, les couches de Jaumann ainsi que les absorbants à métamatériaux, sont des matériaux qui absorbent des longueurs d'onde discrètes ou des bandes de fréquences étroites [1][7][6].

- **L'écran de Salisbury :** Les écrans Salisbury sont un type d'absorbeur résonnant souvent utilisé dans les tests de compatibilité électromagnétique (CEM). Ils sont constitués de deux couches de matériau conducteur (généralement du métal) séparées par une couche d'isolant. Lorsque les ondes électromagnétiques frappent l'écran, les ondes induisent un courant dans les couches conductrices, les faisant résonner à une fréquence spécifique. Cette résonance absorbe et dissipe efficacement l'énergie de l'onde, réduisant ainsi la quantité d'interférences électromagnétiques (EMI) émises [1].

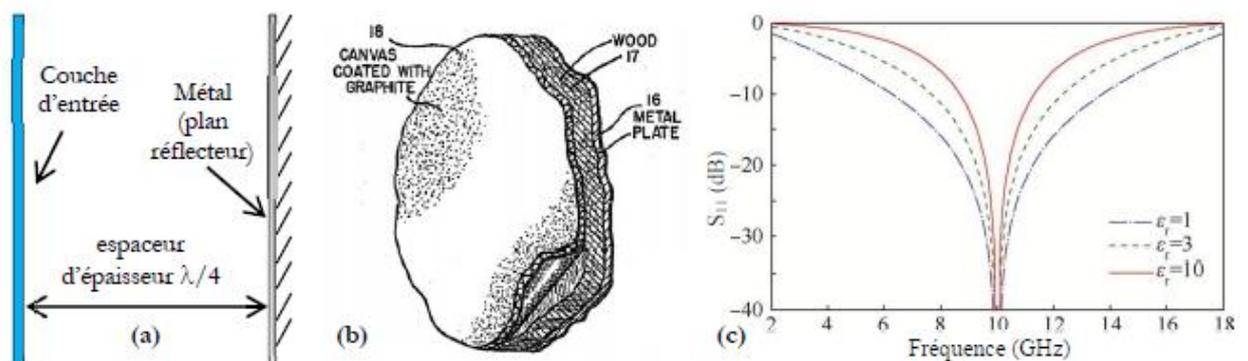


Fig. 2.1 (a) Schématisation d'un écran de Salisbury, (b) écran original de Salisbury et (c) coefficient de réflexion de trois écrans de Salisbury réalisés avec trois matériaux « espaceurs » de permittivités différentes

Cet absorbant est présenté en figure 2.1 À la surface de l'écran, se rencontrent donc les ondes incidences et réfléchies qui sont alors en opposition de phase : les deux ondes s'annulent et un coefficient de réflexion très faible est ainsi obtenu comme le montre la figure 1.7.c avec un coefficient de réflexion  $S_{11} \ll -40$  dB à la fréquence de 10 GHz.

Un exemple d'absorbant résonnant électromagnétique est le matériau utilisé dans les fours à micro-ondes. Ce matériau est conçu pour absorber les ondes électromagnétiques à une fréquence spécifique, ce qui permet au four de chauffer les aliments de manière efficace.

Une question à considérer est : pourquoi est-il important d'avoir des matériaux absorbants résonnants électromagnétiques ? Ces matériaux sont importants dans de nombreuses applications, notamment dans la conception de brouilleurs de communication pour le militaire, les radars, les antennes de télévision et même pour la protection contre les ondes électromagnétiques nocives.

### 3.2. Les absorbants « large bande » :

Les absorbants « large bande » sont, le contraire des matériaux résonnants, des matériaux qui peuvent absorber dans des gammes de longueurs d'ondes étendues. Ces matériaux sont généralement de forte épaisseur et cette épaisseur est d'autant plus importante que les fréquences à absorber sont faibles à cause de la profondeur de peau. Par ailleurs, ce type de matériau peut présenter un gradient d'impédance comme schématisé en figure 2.2 afin de présenter un minimum de discontinuité avec l'espace libre [1][5].

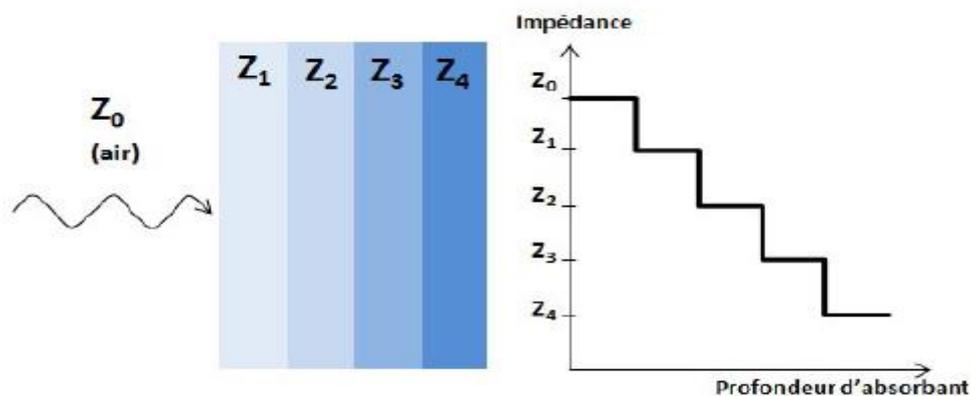


Fig. 2.2 Schématisation d'un matériau chargé progressivement et présentant des couches d'impédances  $Z$  différentes

---

Cette figure schématise un matériau chargé progressivement la surface du matériau est faiblement chargée ce qui rapproche son impédance de celle de l'air et qui permet de limiter la réflexion des ondes à la surface. On réalise alors ce qu'on appelle une adaptation d'impédance. Les ondes peuvent alors pénétrer dans le cœur du matériau qui est de plus en plus chargé, elles sont ainsi dissipées progressivement. Afin de réaliser ce type de matériau, on peut adopter une structure en multicouches ou en pyramides. Ces deux types de structures, particulièrement adaptés aux chambres anéchoïques, sont développés plus loin dans ce chapitre [3].

#### 4. Les absorbants pour les chambres anéchoïques :

Dans le monde des RF ou des micro-ondes, les absorbeurs sont les matériaux qui affaiblissent l'énergie dans une onde électromagnétique. En outre, la gamme de fréquences exploitée par une chambre anéchoïque est également déterminée par le type d'absorbeurs RF utilisés pour le revêtement du sol, du plafond et des murs de la chambre. Le premier absorbeur connu est un absorbeur de type résonnant quart d'onde fonctionnant dans la région de 2 GHz qui a été étudié à la Naamlooze Vennotschap Machinerieen, Pays-Bas en 1936 [15].

Il existe une variété d'absorbeurs d'ondes radio disponibles sur le marché pour une vaste gamme d'applications afin de diminuer les rayonnements indésirables qui pourraient entraver le fonctionnement d'un système. Les absorbeurs RF peuvent être utilisés à des fins externes et internes. Extérieurement, ils peuvent être utilisés pour atténuer la réflexion et la transmission vers certains objets. De même, ils peuvent être utilisés en interne pour atténuer les oscillations provoquées par la résonance de la chambre. De plus, ils peuvent être utilisés pour créer un environnement d'espace libre (chambre anéchoïque) indépendant des conditions météorologiques en réduisant les réflexions [1][3] [5].

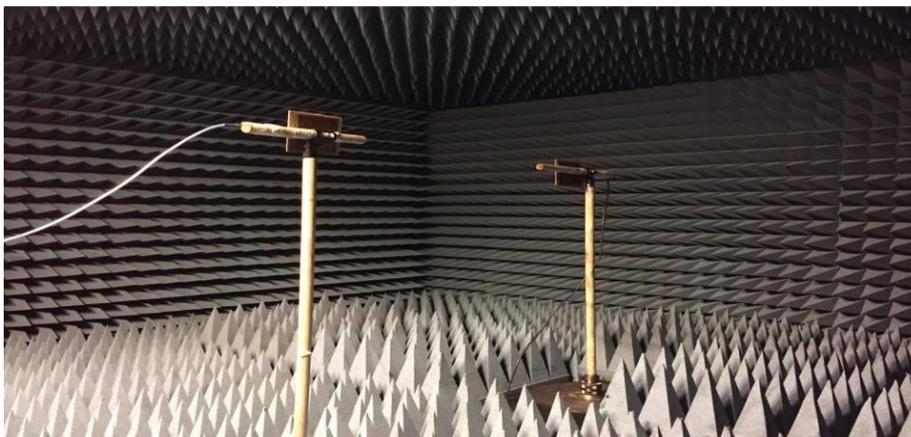
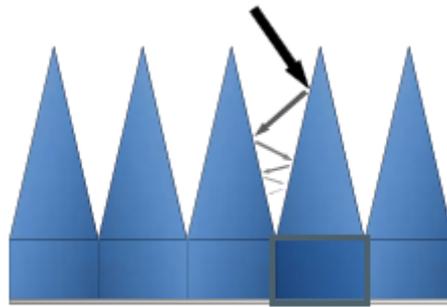


Fig. 2.3 Inside view of the anechoic chamber

Les absorbants pour les chambres anéchoïques adoptent le plus souvent des géométries graduelles comme des pyramides ou des dièdres. Ces géométries permettent de combiner plusieurs caractéristiques :

- La réflexion des ondes est minimisée car les pyramides piègent les ondes électromagnétiques en dirigeant les ondes réfléchies à leur surface vers l'intérieur de l'absorbant [1]



**Fig. 2.4 Piégeage des ondes électromagnétiques par les pyramides**

- L'accord d'impédance est favorisé : la forme de pyramide ou de dièdre permet une transition graduelle entre l'espace libre ( $Z_0$ ) et l'absorbant ( $Z_{abs}$ )
- Les dimensions des absorbants sont adaptées à la fois aux petites et aux grandes longueurs d'onde : les ondes électromagnétiques de plus hautes fréquences (plus petites longueurs d'onde) seront davantage absorbées par la pointe de la pyramide tandis que les ondes de plus basses fréquences seront absorbées par la base de la pyramide. De plus, la hauteur de l'absorbant est adaptée aux fréquences à absorber car la profondeur de peau augmente avec la longueur d'onde [2]

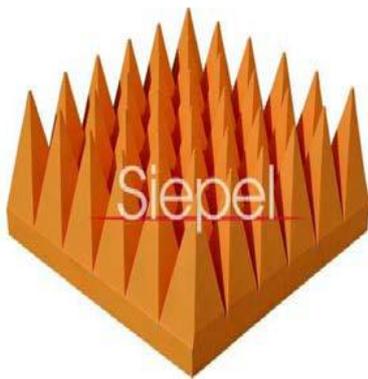
#### **4.1. Absorbants commercialisés pour les chambres anéchoïques**

Pour absorber les basses fréquences, des tuiles en ferrites (figure 2.5) sont généralement placées au dos des pyramides. Leur fréquence de fonctionnement est comprise entre 30 MHz et 1 GHz. Leur principal inconvénient est leur masse élevée.



**Fig. 2.5 Tuile ferrite commercialisée par Comtest, dimensions et masse : 602 mm\* 602 mm\* 20 mm, 17 kg**

Afin d'absorber les ondes électromagnétiques dans une gamme de fréquences allant de 1 GHz jusqu'à 40 GHz, des absorbants sous forme de pyramides ou de dièdres sont utilisés. Voici quelques entreprises qui en proposent. Siepel, entreprise française basée à la Trinité-sur-Mer développe des absorbants pyramidaux (figure 2.6. (a), dièdres 4.2 (figure b)) et multicouches réalisés en mousse polyuréthane chargée en noir de carbone. Elle développe également des absorbants piétonniers (pour circuler dans la chambre anéchoïque), des absorbants « forte puissance » réalisés avec une structure en « nid d'abeilles » en carbone ainsi que des absorbants en bande étroite de faible épaisseur réalisés dans un composite de polymère souple chargé en particules magnétiques [2]



(a)



(b)

**Fig. 2.6 Absorbants (a) pyramidaux et (b) dièdres de chez Siepel**

## 4.2. Les absorbeurs pyramidaux

Les absorbeurs pyramidaux sont des absorbeurs diélectriques et sont le type de produit absorbant le plus courant utilisé dans la plupart des chambres anéchoïques pour les mesures d'antenne et les mesures radar. Ils sont disponibles en différentes formes et tailles qui fournissent une correspondance d'impédance souhaitée entre le milieu absorbant résistif et l'espace libre.

Les absorbeurs pyramidaux sont généralement fabriqués à partir de mousse de polyuréthane ou de polystyrène remplie de carbone conducteur. L'absorption de l'énergie RF des fréquences micro-ondes à partir de 0,5 GHz peut être obtenue en équilibrant le carbone avec la forme de la mousse ; la longueur de la mousse peut être supérieure à une longueur d'onde. Lors de l'application de carbone sur la mousse ou comme traitement secondaire, l'absorbeur rempli de carbone doit être traité avec des substances inflammables conformément à la norme de sécurité [2].

Les mousses chargées de carbone sont peintes de différentes couleurs à la demande du client. Cependant, les mousses sont principalement peintes avec du bleu latex pour une bonne réflectivité de la lumière. Ces peintures ne semblent pas affecter le fonctionnement de l'absorbeur pour les longueurs d'onde longues et même modestes, mais cela peut être dérangent à des longueurs d'onde plus courtes (moins d'un pouce environ). Par exemple, la peinture bleu latex dégrade la réflectivité de la chambre d'environ 5 dB à une fréquence de 95 GHz [1].

La quantité de carbone introduite dans les absorbeurs au cours du processus de production peut faire varier considérablement le niveau de réflectivité des absorbeurs. Ces variations sont visibles sur la figure 2.7 ci-dessous qui illustre le changement de réflectivité lors du chargement de carbone avec différentes épaisseurs dans l'absorbeur en mousse correspondant à la fréquence de test.

Dans la figure 2.7, la réflectivité est la même que la perte de réflexion ou la perte de retour. Dans la figure, la ligne noire pleine représente la quantité favorable de charge de carbone dans la mousse. En augmentant la quantité de carbone dans la mousse, la réflectivité la courbe est décalée vers la gauche, ce qui signifie qu'une grande quantité de carbone doit être introduite sur la mousse pour obtenir la même quantité optimale de caractéristiques de réflectivité.

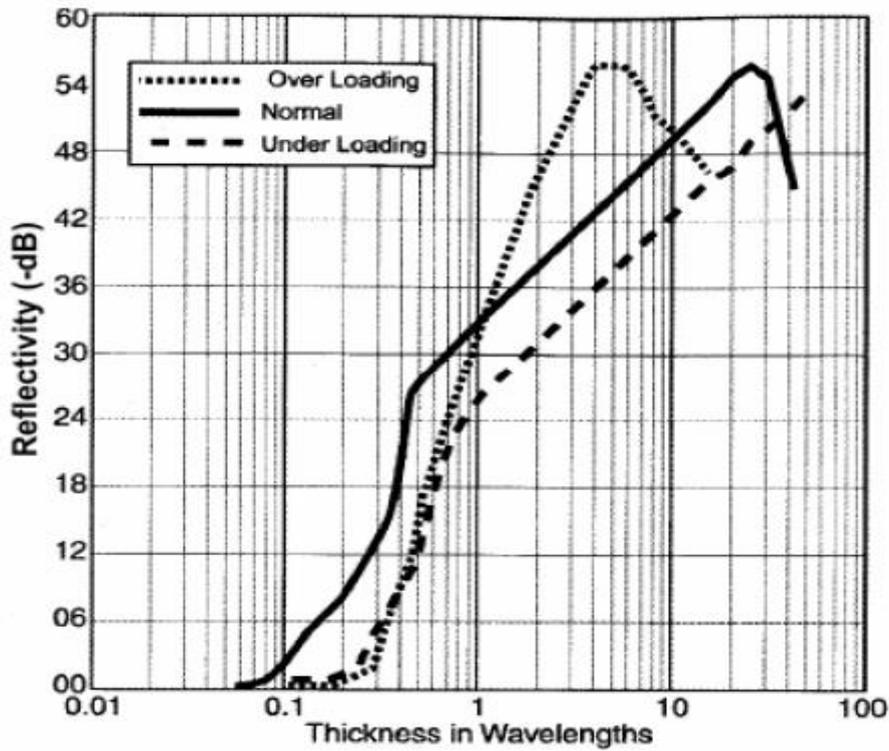


Fig. 2.7 Variation de la réflectivité avec la variation de l'épaisseur du revêtement de carbone dans un absorbeur

La longueur d'onde et la fréquence de l'onde radio sont inversement proportionnelles l'une à l'autre. Ainsi, la longueur de l'absorbeur pyramidal peut être de 10 cm à 25 cm en fonction de la longueur d'onde de la plus petite fréquence possible spécifiée pour la chambre anéchoïque. Les absorbeurs pyramidaux d'une longueur supérieure ou égale à 20 cm sont principalement utilisés pour mesurer la distance jusqu'à 10 m dans une chambre anéchoïque où l'exigence de corrélation NSA (National Security Agency) d'immunité RF rayonnée meilleure que  $\pm 4$  dB doit être remplie pour la fréquence comprise entre 30 MHz et 1 GHz. Selon CEI/EN 61000-4-3, l'exigence d'un test d'immunité à partir de 80 MHz peut déjà être satisfaite avec une pyramide de longueur 7,5 cm. Même des pyramides de tailles 20 cm à 30 cm suffisent pour la mesure dans la gamme de fréquence supérieure ou égale à 1 GHz. [7]

La figure 2.7 est un dessin technique d'un absorbeur pyramidal à large bande de forme carrée qui est utilisé dans la chambre anéchoïque.[2]

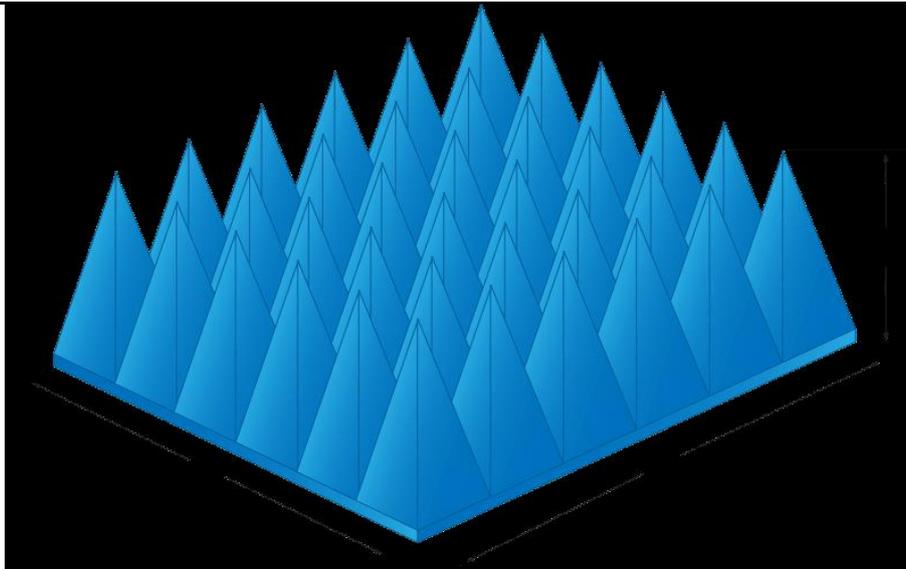


Fig. 2.8 Dessin technique de l'absorbeur pyramidal de forme carrée [1]

La hauteur minimale C (figure 15) de l'absorbeur pyramidal peut aller de 2 ou 3 pouces pour les absorbants à ondes millimétriques à 12 pieds pour les **absorbants UHF (Ultra Haute Fréquence) et VHF (Très Haute Fréquence)**. Presque tous les absorbants pyramidaux de forme carrée sont fabriqués avec une base de pieds 2 × 2 (A × B) qui est devenue la taille standard dans toutes les industries. [1]

La réflectivité typique de l'absorbeur pyramidal à incidence normale en fonction de son épaisseur et de la fréquence spécifiée peut être consultée dans le tableau 4.1. La réflectivité de l'absorbeur est indiquée dans le tableau en -dB [2].

**Table 3.1** Pyramidal Absorber Performance

Type	Height, cm (in.)	Weight, kg (lb)	Tips per piece	Normal Incidence Reflectivity, GHz									
				0.12	0.3	0.5	1.0	3.0	6.0	10.0	18.0	36	50
P-4	10.9(4.3)	1.4(3)	144					30	35	42	50	50	50
P-6	15.2(6)	1.6(3.5)	100					32	40	45	50	50	50
P-8	20.3(8)	2.0(4.5)	64				30	37	45	50	50	50	50
P-12	30.5(12)	2.7(6.0)	36				35	40	45	50	50	50	50
P-18	45.7(18)	5.4(12)	16			30	37	40	45	50	50	50	>45
P-24	61(24)	7.7(17)	9		30	35	40	45	50	50	50	50	>45
P-36	91.4(36)	10.9(24)	4		35	37	42	50	50	50	50	50	>45
P-48	121.9(48)	17(38)	2	28	35	40	50	50	50	50	50	50	>45
P-72	182.9(72)	23(50)	1	33	40	45	50	50	50	50	50	50	>45

Note: Base dimensions are 0.61 m<sup>2</sup>(2 ft<sup>2</sup>). Power rating is 0.08 W/cm<sup>2</sup>(0.5 W/in.<sup>2</sup>).

---

## 5. La géométrie des matériaux absorbants

La géométrie des matériaux absorbants est importante car elle détermine la quantité d'ondes électromagnétiques qui peuvent être absorbées par le matériau. Pour optimiser l'absorption, il est donc important de choisir une géométrie qui permet une interaction maximale entre les ondes et le matériau. Cela peut être réalisé en utilisant des formes géométriques spécifiques, telles que des structures en forme de pyramide, qui permettent une absorption maximale en raison de leur capacité à piéger et à réfléchir les ondes électromagnétiques. D'autres formes géométriques, telles que les structures en forme de cône, peuvent également être utilisées pour optimiser l'absorption[4].

## 6. Impédance du matériau et coefficient de réflexion

Disposer d'un matériau possédant des pertes magnétiques ou diélectriques élevées ne suffit généralement pas pour absorber l'onde incidente. En effet, pour que celle-ci soit absorbée, il faut d'abord qu'elle pénètre à l'intérieur du matériau, c'est-à-dire qu'il ne faut pas qu'elle soit réfléchi à sa surface. Pour supprimer la réflexion des ondes à l'interface entre l'air ambiant et le matériau en question, il est nécessaire d'adapter l'impédance  $Z$  de ce matériau, c'est-à-dire la rendre proche de celle de l'air ambiant [7]. On parle alors d'accord ou d'adaptation d'impédance. D'après la théorie de la ligne de transmission, l'impédance dépend des caractéristiques diélectriques et magnétiques du matériau ainsi que de son épaisseur  $d$  :

$$z = z_0 \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_r}{\tilde{\epsilon}_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi f d}{c}\right) \sqrt{\tilde{\mu}_r \tilde{\epsilon}_r} \dots\dots(4)$$

**avec :**

$Z_0$  : impédance caractéristique du vide qui vaut  $120\pi \approx 377\Omega$

$\mu_r$ : perméabilité relative magnétique complexe du matériau

$\epsilon_r$ : permittivité diélectrique relative complexe du matériau

$f$  : fréquence de l'onde incidente

$d$  : l'épaisseur du matériau

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide

---

Lorsque l'on considère un matériau d'épaisseur infinie devant la longueur d'onde, l'impédance devient :

$$z = z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \dots\dots(5)$$

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  à l'incidence normale à l'interface entre un milieu 1 d'impédance  $Z_1$  et un milieu 2 d'impédance  $Z_2$  est défini par le rapport des amplitudes du champ électrique incident et du champ électrique réfléchi

### Conclusion

Dans ce chapitre on a découvert plusieurs type d'absorbants dans la nature, et chaque absorbant adéquat a une largeur de fréquence bien définit, on a vu leurs classifications. Ensuite on a comparé quelques absorbants. On a démontré quelque le phénomène d'absorption avec quelques équations, ainsi que chaque absorbant est lié à une impédance et de coefficient de réflexion et bien sûr il faut qu'il est la géométrie adéquate, est ce qu'on va démontrer dans le chapitre suivant.

# *Chapitre 3*

## **Simulation d'un nouveau matériau absorbant électromagnétiques par CST-MWS**

### **1. Introduction**

Les simulations électromagnétiques des absorbants étudiés, ont été réalisées à l'aide du simulateur commercial CST-MWS.

Le simulateur CST-MWS est un outil spécialisé dans la simulation électromagnétique en trois dimensions (3D) des structures fonctionnant dans les hautes fréquences. Il se base sur la combinaison de la méthode de l'approximation des conditions aux limites "PBA" (Perfect Boundary Approximation) avec la technique d'intégration finie "FIT" (Finite Integration Technique).

L'un des avantages de ce simulateur, c'est bien la méthode utilisée pour le maillage des structures. L'utilisateur peut préciser la taille des mailles par rapport à la longueur d'onde et déterminer un rapport entre les plus grandes et petites mailles. Ensuite, le simulateur choisit habilement les endroits nécessitant plus ou moins de cellules. Bien entendu, l'utilisateur peut aussi forcer l'opération de maillage des dimensions particulières si cela s'avère nécessaire. Ce processus de maillage variable réduit considérablement le nombre total de mailles.

Ce chapitre abordera une étude détaillée de la méthodologie d'utilisation de MWS pour la modélisation d'un nouveau matériau absorbant

Le processus d'analyse numérique avec MWS peut être divisé en 3 étapes. Premièrement, la construction du modèle, ensuite la configuration générale du modèle et pour terminer la simulation et l'optimisation.

Dans ce chapitre, un absorbant à base de carbone a été dimensionné et simulé. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de cet absorbant.

Ce chapitre est organisé comme suit : Après la présentation de l'absorbant, les performances en termes de simulation de l'absorbant de carbone proposées seront présentées et discutées. Ensuite, des études paramétriques pour chaque absorbant seront présentées afin de comprendre le fonctionnement de ces absorbants.

---

## 2. Aperçu sur le logiciel CST :

Le logiciel de simulation CST est un outil qui permet aux ingénieurs et aux scientifiques de modéliser et de simuler des structures électromagnétiques complexes. Dans le domaine des absorbants, le logiciel CST peut être utilisé pour simuler comment les matériaux absorbent les ondes électromagnétiques. Le logiciel CST permet aux ingénieurs de modéliser et de simuler les propriétés électromagnétiques des absorbants, comme leur coefficient de réflexion et d'absorption. En utilisant ces simulations, les ingénieurs peuvent concevoir des absorbants plus efficaces et optimiser leur performance.

## 3. Un absorbant à base de Carbone

### 3.1. Description de l'absorbant

Le schéma de l'absorbant est présenté dans Figure 3.1.

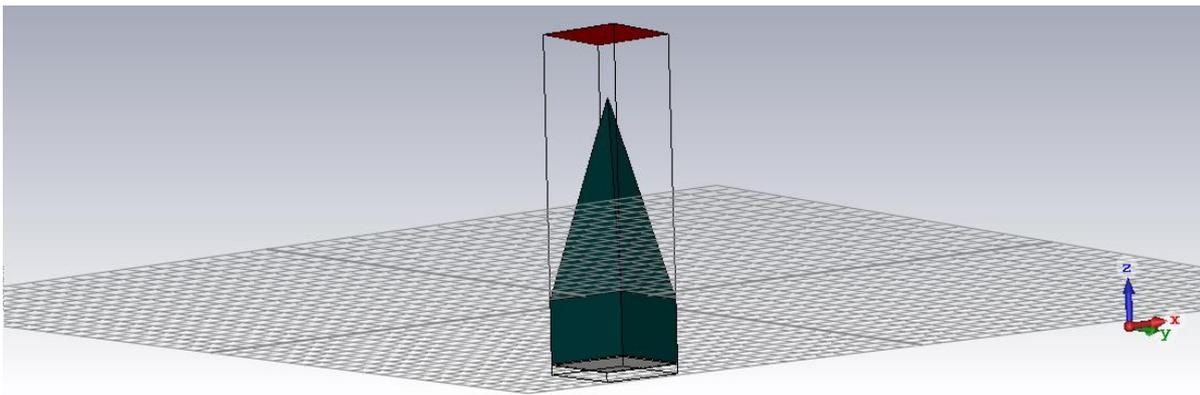


Fig. 3.1L'absorbant forme pyramidale réalisé avec CST.

Dans cette figure on remarque la structure pyramidale de cet absorbant, une pyramide a quatre face et une base cubique.

- Quel sont les étapes qu'on a suivi pour conclure que le carbone est un bon absorbant ?

On a fait une étude comparative, entre la réaction d'un conducteur, Semi-conducteur, Isolant, et le carbone (absorbant), on a propagé des ondes a un port (waveguide port) , et l'autre port on a fait du métal , donc les onde son orienté vers la pointe du pyramide.

### 3.2. Etude comparative (matériaux)

Cette étude va nous permettre la réaction de chaque type de matériau face à une onde électromagnétique propagé par une antenne pour une certaine bande de fréquences, si l'onde fait face au matériau et ce dernier la dissipe l'onde va être réfléchi (car on a mis du métal en bas du matériau) et on le saura en calculant le paramètre S11 (décrit toujours la réflexion. Il utilise simplement l'impédance d'entrée), il va y avoir Trois supposition :

- Réflexion de l'onde (l'onde va être réfléchi par le matériau) réflexion total  $S_{11}=0$  ou  $>-10\text{db}$ .
- Absorption de l'onde (l'onde va être absorber par le matériau)  $S_{11} <-10\text{db}$ .

Dans cette étude on va comparer la réaction de plusieurs types de matériaux y compris:

- Un matériau conducteur (on a choisi le Cuivre Copper)

component1:pyramid	
Material	Copper (annealed)
Type	Lossy metal
Mu	1
Electric cond.	5.8e+07 [S/m]
Rho	8930 [kg/m <sup>3</sup> ]
Thermal cond.	401 [W/K/m]
Heat capacity	0.39 [kJ/K/kg]
Diffusivity	0.000115141 [m <sup>2</sup> /s]
Young's modulus	120 [kN/mm <sup>2</sup> ]
Poisson's ratio	0.33
Thermal expan.	17 [1e-6/K]

- Un matériau diélectrique isolant (l'aire Vaccum et le Bois Wood)

component1:pyramid	
Material	Wood
Type	Normal
Dispersive eps	Nth order model, N=2 (fit)
Mu	1
Rho	500 [kg/m <sup>3</sup> ]
Thermal cond.	0.2 [W/K/m]
Heat capacity	2 [kJ/K/kg]
Diffusivity	2e-07 [m <sup>2</sup> /s]

- Un matériau semi-conducteur (Fr-4)

component1:pyramid	
Material	FR-4 (lossy)
Type	Normal
Epsilon	4.3
Mu	1
Electric tand	0.025 (Const. fit)
Thermal cond.	0.3 [W/K/m]

- Un matériau absorbant (Carbone)

component1:pyramid	
Material	carbon
Type	Normal
Dispersive eps	Nth order model, N=2 (fit)
Mu	1

### 3.3. Cas d'un matériau conducteur :

Le conducteur qu'on a choisi c'est le Cuivre (Copper) , la forme géométrique choisie est la forme pyramidale à quatre faces , avec une base cubique et un métal (port 2) sous le pyramide pour réfléchir toutes les onde dissiper, et le premier port 1 pour calculer le S11 comme montrer dans la photo .

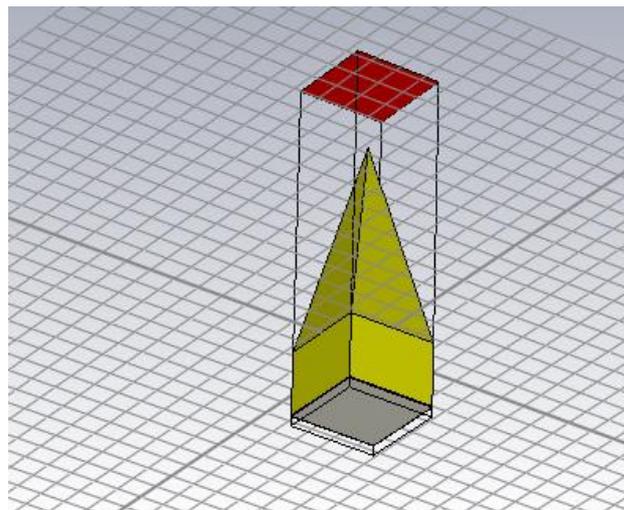


Fig. 3.2 Photo du pyramide conducteur Copper

- La géométrie utiliser :

Nom	Valeurs	Discription
A	50 mm	Largeur du carreau
H	160 mm	La hauteur du pyramide
HB	50 mm	La hauteur de la base

Tab . Les valeurs géométriques

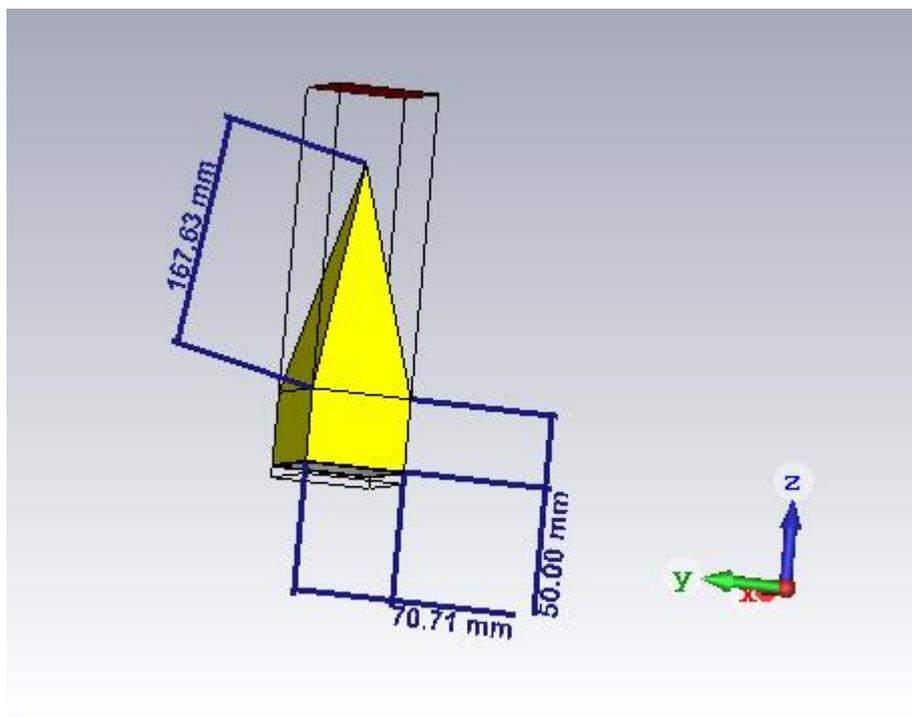


Fig. 3.3 Démonstration de la géométrie du pyramide

### 3.4. Les Résultats de la simulation du matériau conducteur Cuivre et vaccum l'aire :

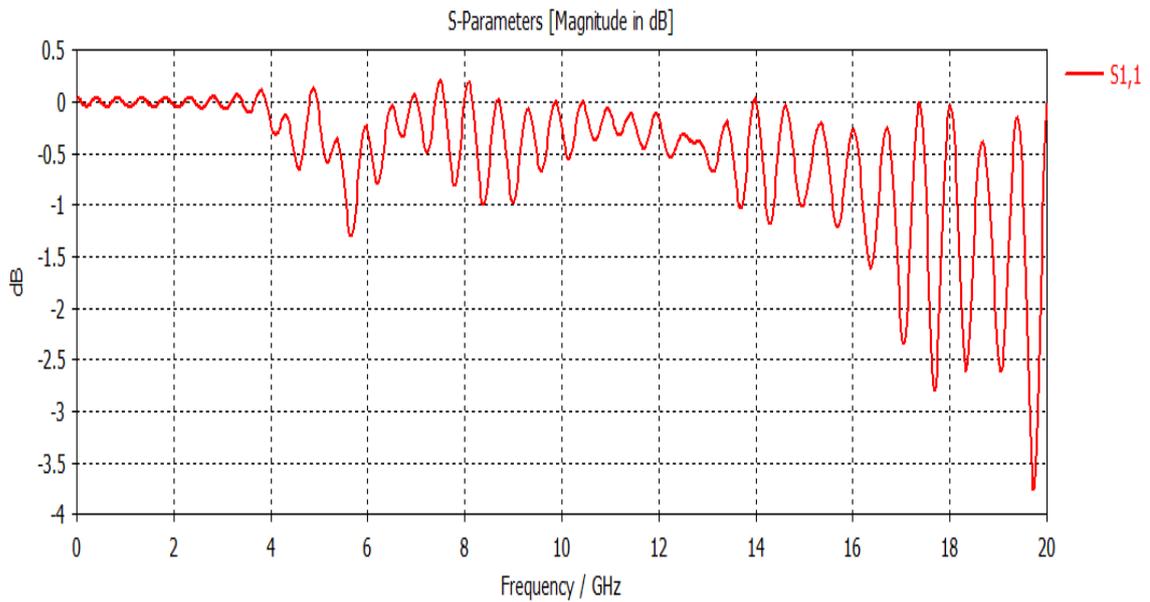


Fig. 3.4 S11 du cuivre

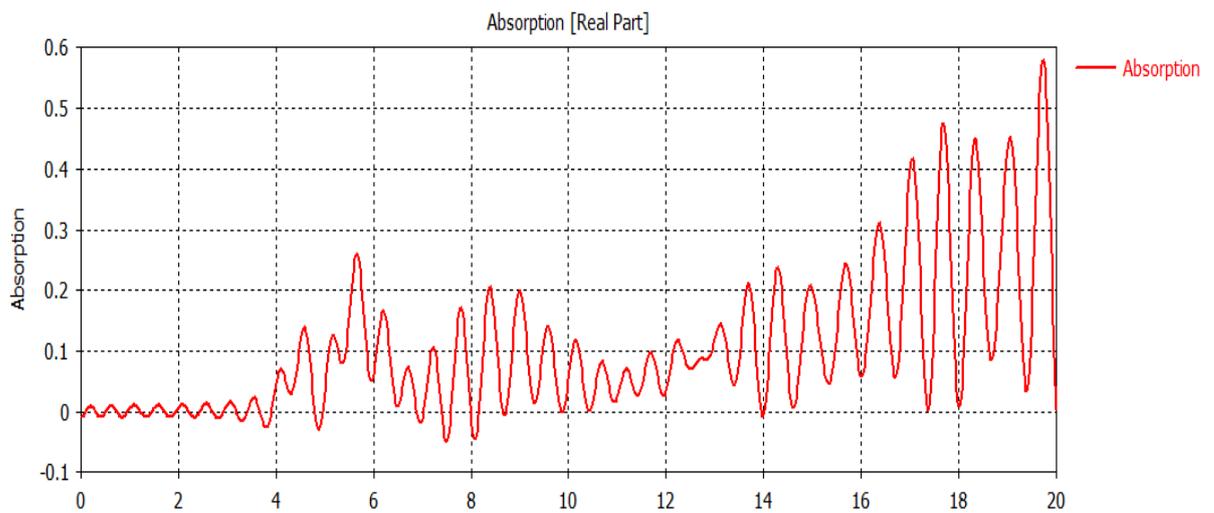


Fig. 3.5 Coefficient d'absorption du cuivre

D'après la figure 3.4 le coefficient de réflexion s11 sur toute la bande de fréquences de [0,20 ghz] est  $> -10$  db donc il y a une réflexion totale et non absorption. (Le cuivre n'absorbe pas).  
le D'après D'après la figure 3.5 coefficient d'absorption  $< 1$  pas d'absorption.

Vaccum :

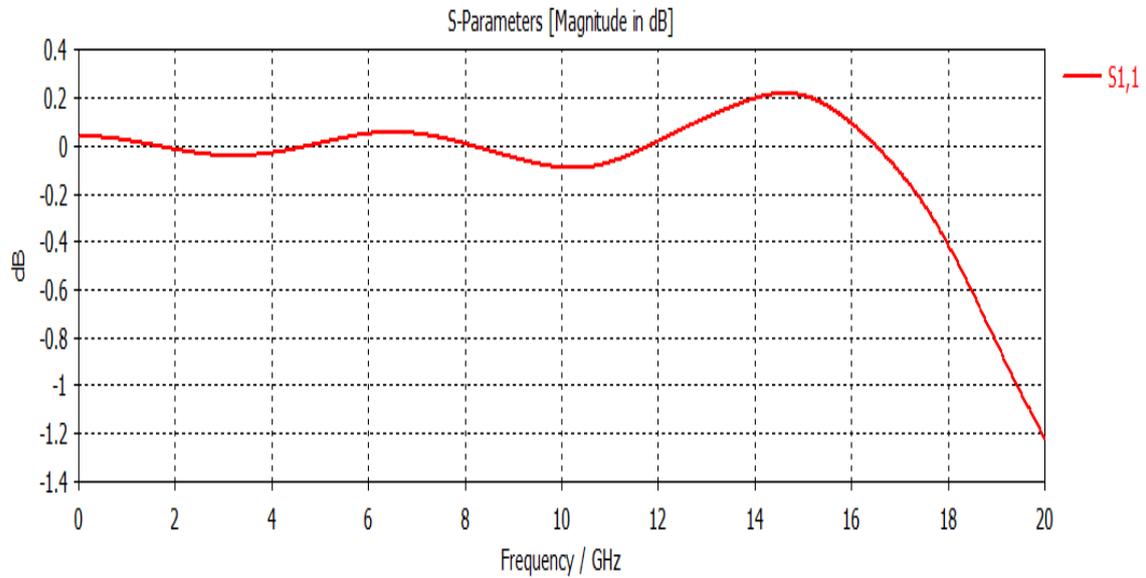


Fig. 3.6 S11 du Vacuum (l'aire)

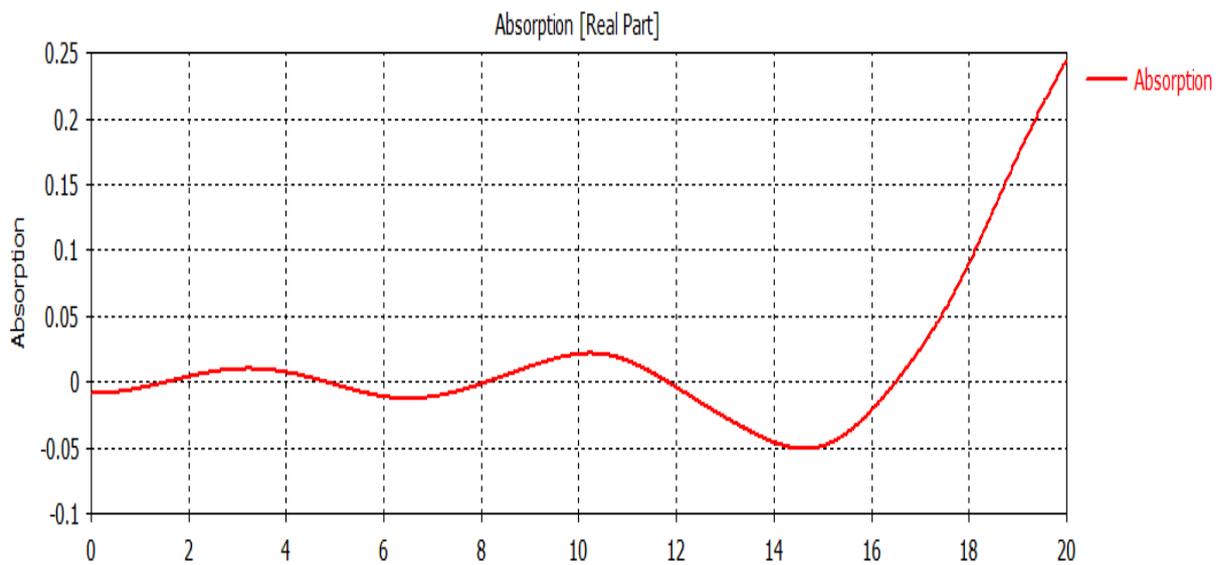


Fig. 3.7 Coefficient d'absorption du vacuum (l'aire)

Résultat : aucune absorption l'aire n'est pas un absorbant car son S11 > -10db et son coefficient d'absorption est inférieur à 1.

### 3.5. Les Résultats de la simulation du matériau semi-conducteur le FR-4 :

Avec la même géométrie.

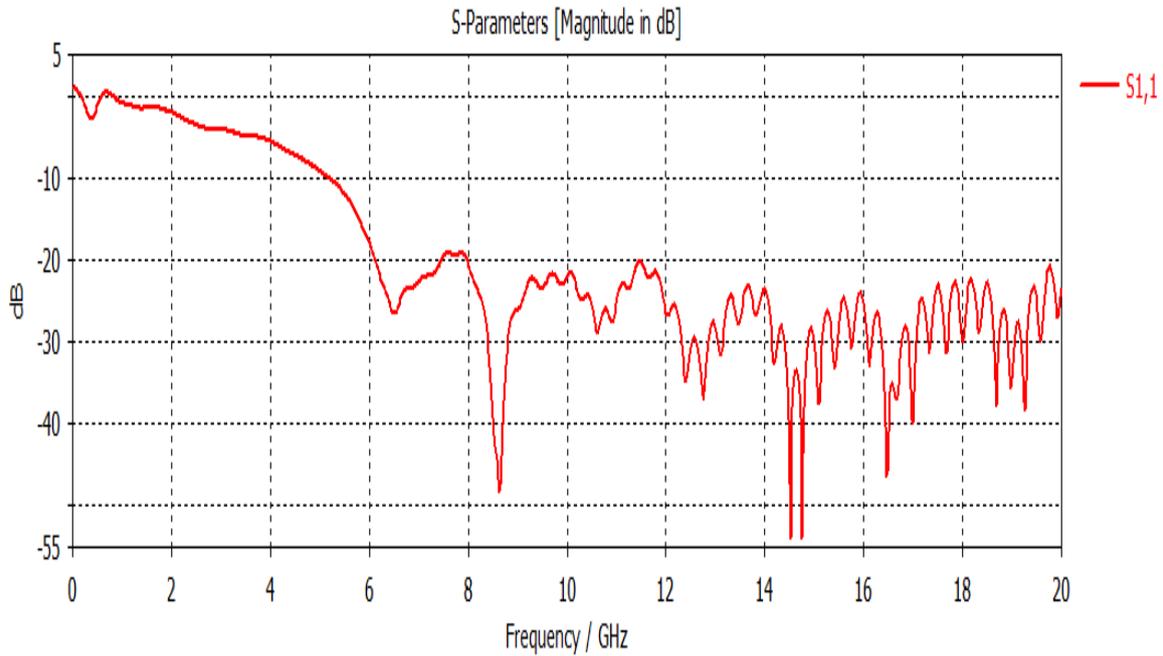


Fig. 3.8 Le S11 du Fr-4

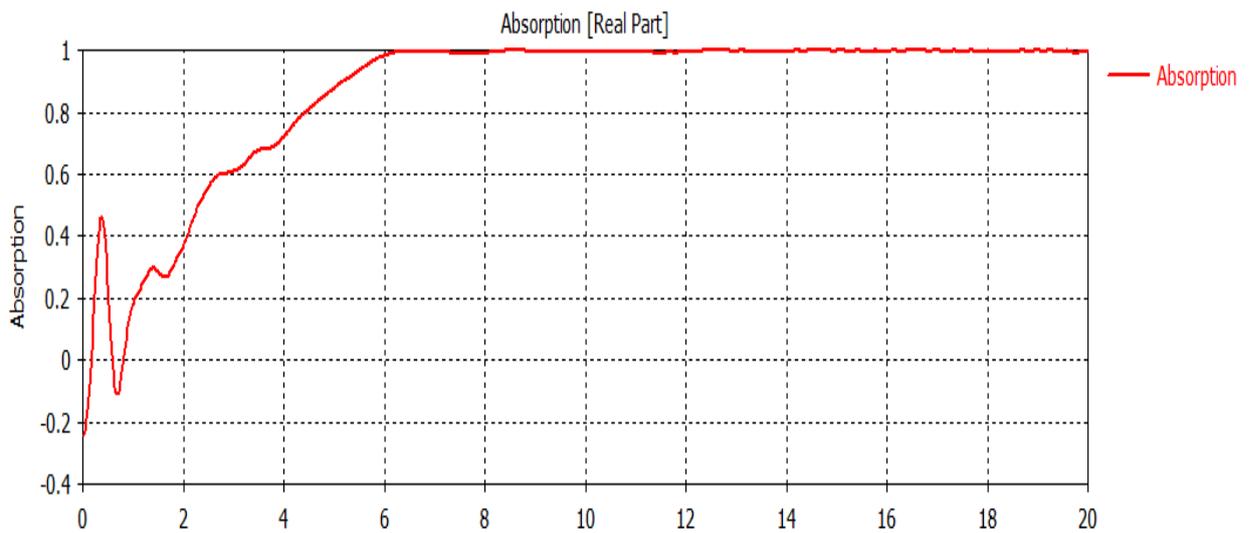


Fig. 3.9 Coefficient d'absorption du Fr-4

D'après la figure 3.8 le coefficient de réflexion le s11 sur toute la bande de fréquences de [0,6 ghz] est  $>-10$  db donc il y a une réflexion totale et non absorption. (Le cuivre n'absorbe pas).

Et le coefficient d'absorption de [0,6 ghz <1 pas d'absorption.

D'après la figure 3.9 De [6,20ghz] le coefficient d'absorption =1 donc-il une absorption.

Résultat : le semi-conducteur peut être un absorbant sur certaines fréquences

### 3.6. Les Résultats de la simulation du matériau diélectrique (isolant) le bois Wood :

Avec la même géométrie.

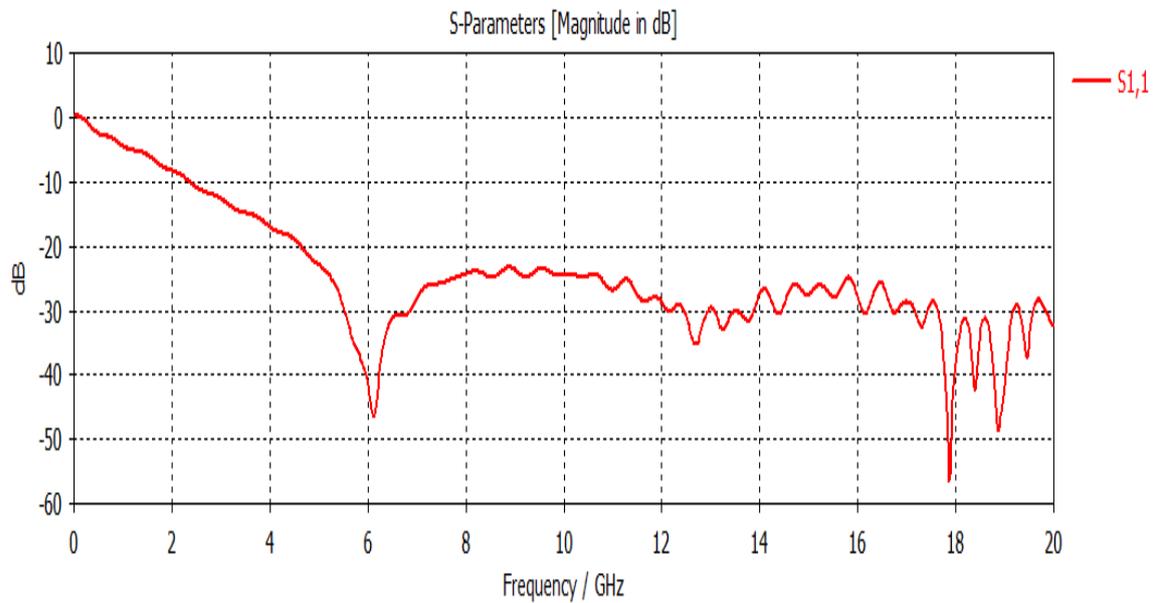


Fig. 3.10 Le S11 du Wood

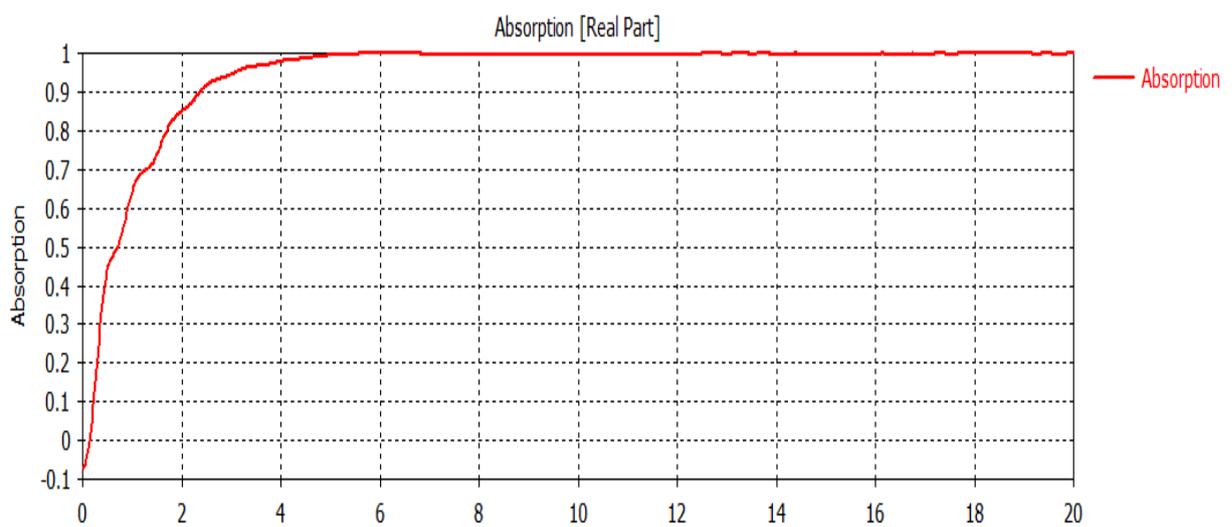


Fig. 3.11 Coefficient d'absorption du wood

D'après la figure 3.10 le s11 sur toute la bande de fréquences de [0,4 ghz] est >-10 db donc il

y a une réflexion totale et non absorption. (Le cuivre n'absorbe pas).

D'après la figure 3.11 le coefficient d'absorption de  $[0,4 \text{ ghz} < 1$  pas d'absorption. De  $[4,20\text{ghz}]$  le  $S_{11} < -10\text{db}$  et le coefficient d'absorption =1 donc-il une absorption.

Résultat : le diélectrique peut être un bon absorbant sur certaines fréquences

### 3.7. Les Résultats de la simulation du nouveau matériau absorbant à base de carbone :

Les résultats de la permittivité et la perméabilité et d'impédance de ce matériau sont inspirés de la thèse de monsieur Chloé Méjean intitulé *Élaboration de Nouveaux Matériaux Absorbants : Application en Chambres Anéchoïques*. Qui à mesurer son mélange de mousse de carbone et de proxy avec une sonde à chaque expérience.

Avec la même géométrie on obtient ce résultat :

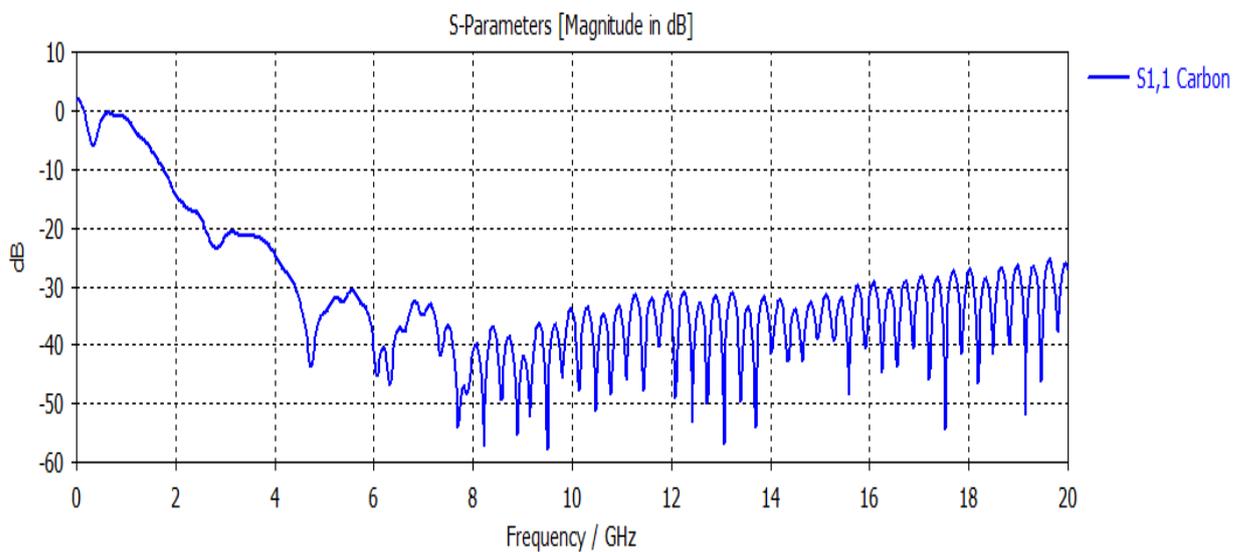


Fig. 3.12 S1.1 du Nouveau matériau carbone .

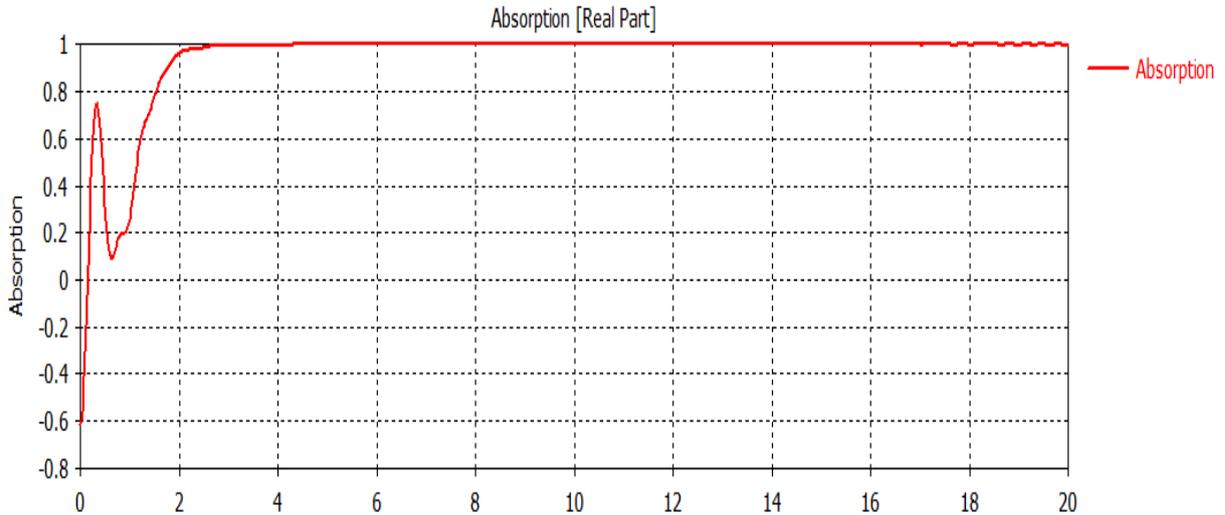


Fig. 3.13 Coefficient d'absorption du carbone

D'après la figure 3.13, De [2,20ghz] le  $S_{11} < -10\text{db}$  et le coefficient d'absorption =1 donc-il une absorption.

Résultat : le Nouveau matériau à base de carbone peut être un bon absorbant sur presque toute bande de fréquences.

Conclusion :

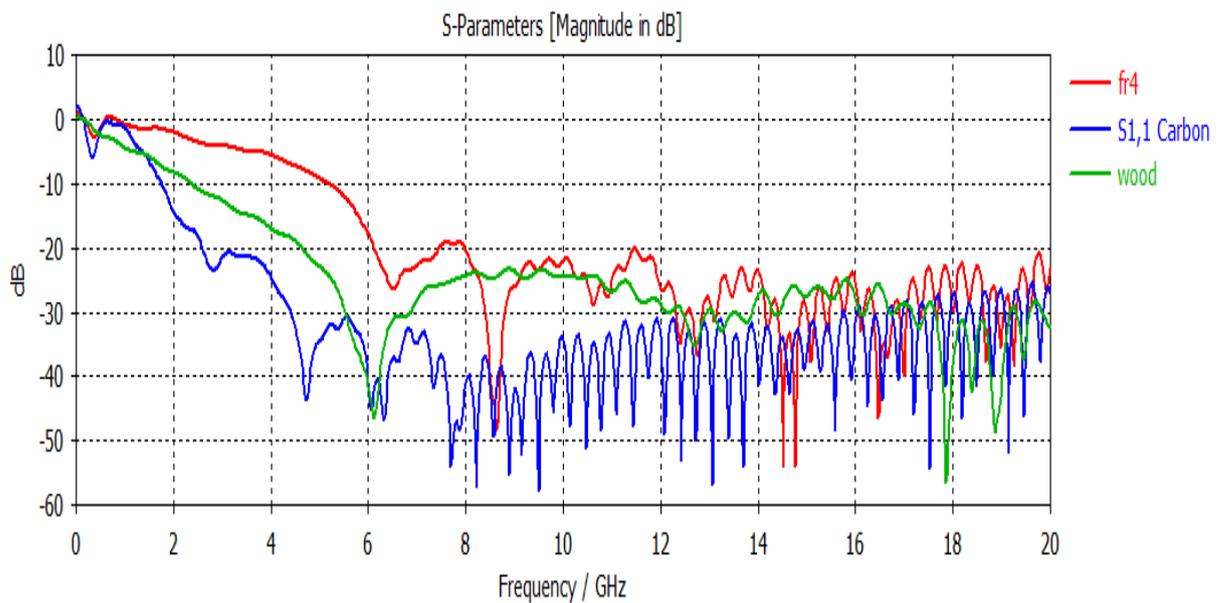


Fig. 3.14 S1.1 du fr4 ,Wood, carbone

Le nouveau matériau est le meilleur absorbant car il absorbe les ondes électromagnétiques sur toute la bande de fréquences.

#### 4. Etude comparative (Géométrie)

On a démontré théoriquement l'importance de la géométrie dans le deuxième chapitre, maintenant expérimentalement on va jouer sur la géométrie du nouveau matériau à base de carbone pour optimiser son absorption.

##### 4.1. La forme cubique

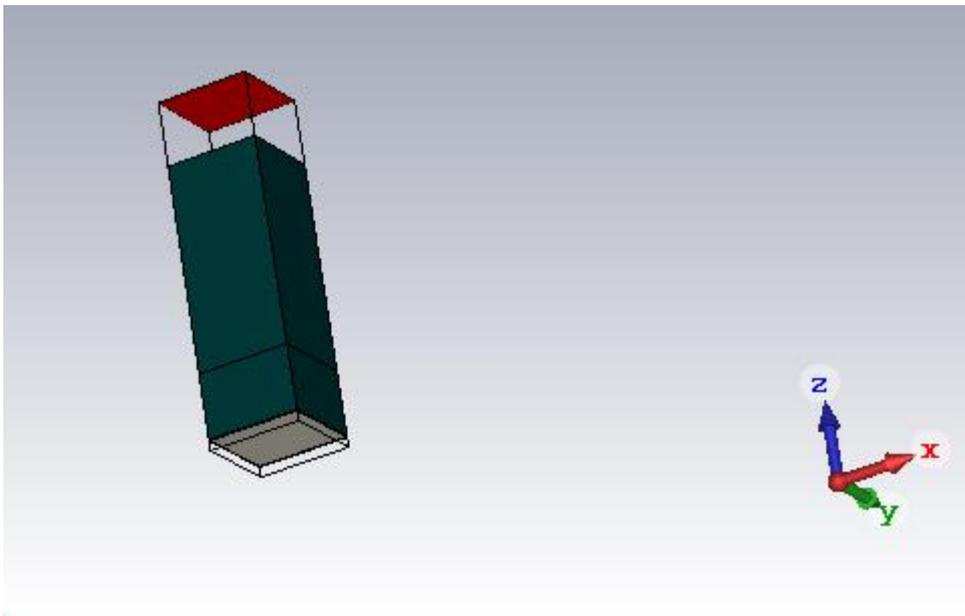


Fig. 3.15 la forme cubique absorbant carbone

On a changé la pyramide avec un cube du même matériau après simulation :

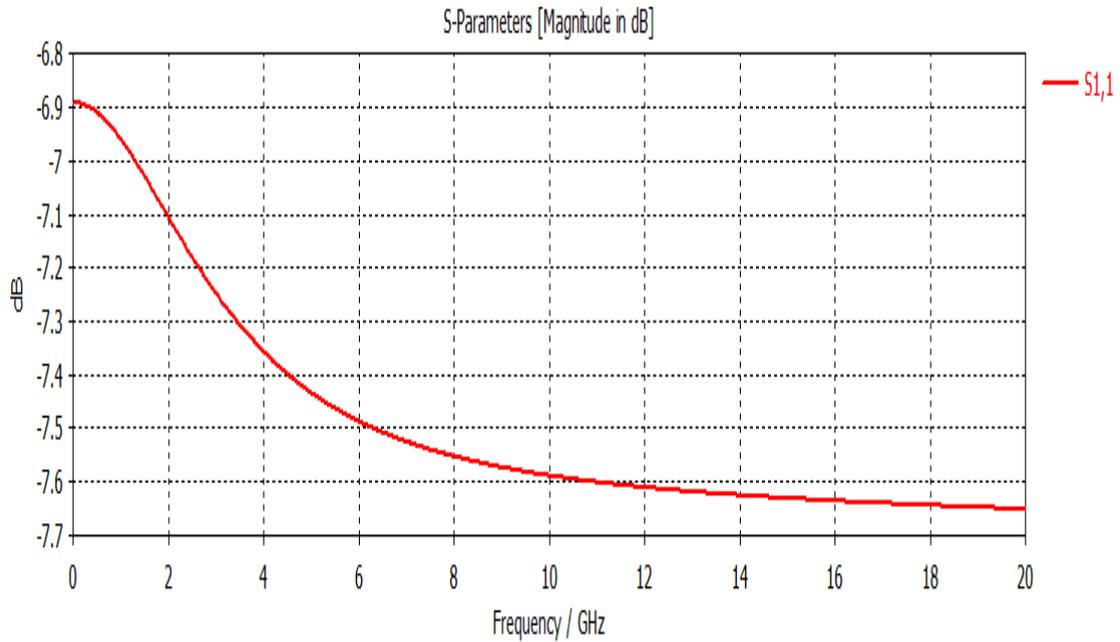


Fig. 3.16 S1.1 du carbone avec a nouvelle forme (cubique)

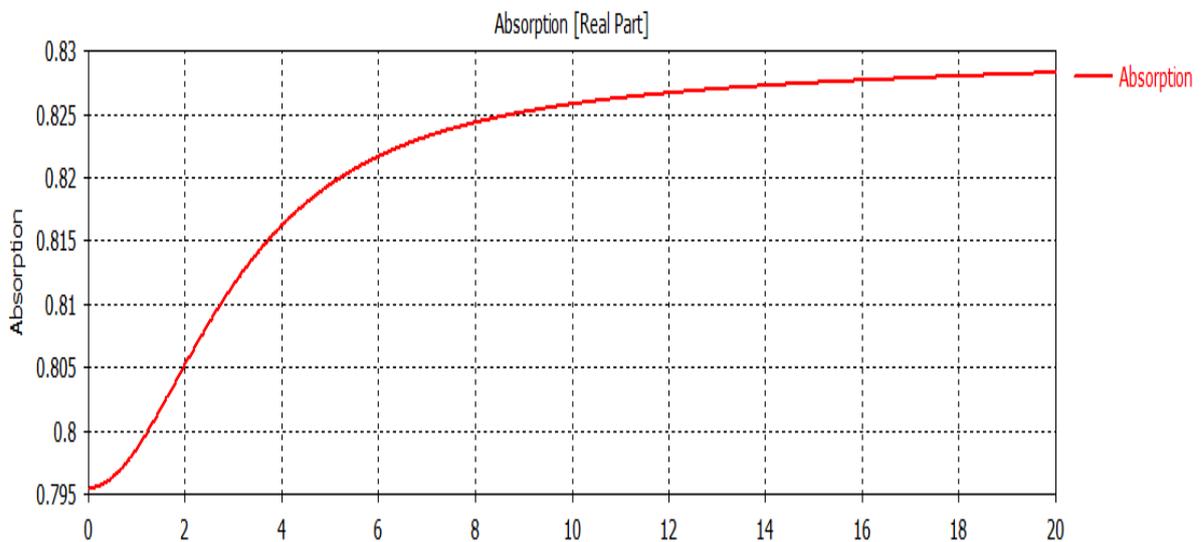


Fig. 3.17 Coefficient d'absorption du carbone forme cubique

D'après la figure 3.16 Le S1.1 est  $> -10\text{db}$  et d'après la figure 3.17 le coefficient d'absorption est  $< 1$ , donc il n'y a pas d'absorption.

- On conclut donc que le carbone a perdu sa capacité d'absorber juste en changeant sa forme géométrique.

Résultat : la forme pyramidale est la meilleure forme pour un absorbant à case des parois.

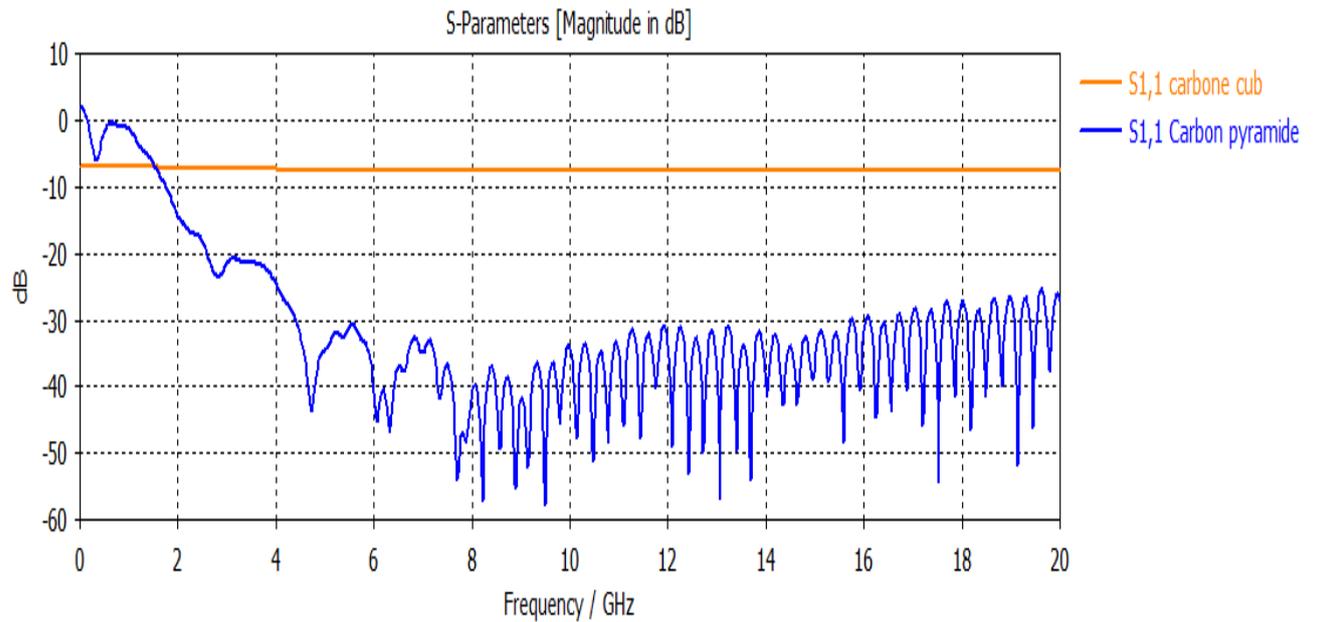


Fig. 3.18 Comparaison de S1.1 entre Carbone forme cubique et pyramidale

#### 4.2. La forme pyramidale avec différent hauteur

- La géométrie utiliser :

Nom	Valeurs	Discription
A	50 nm	Largeur du carreau
H	80 nm	La hauteur du pyramide
HB	50 nm	La hauteur de la base

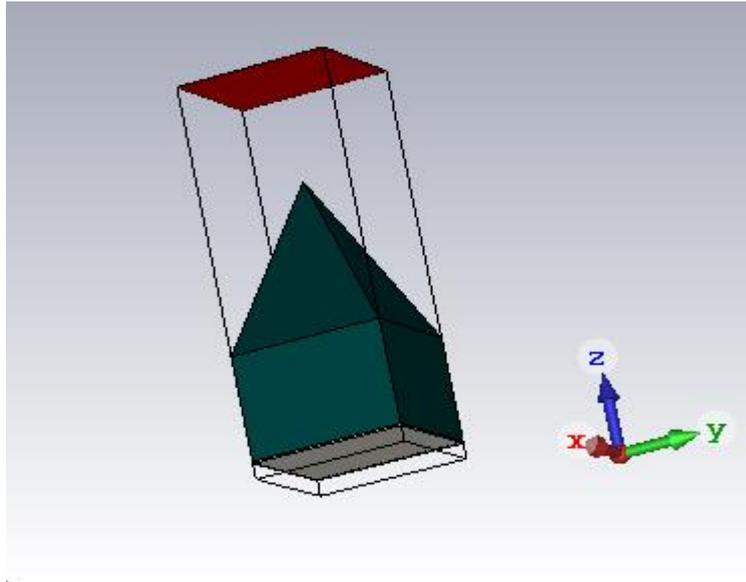


Fig. 3.19 pyramide du carbone avec nouvelle hauteur

Résultats de simulation :

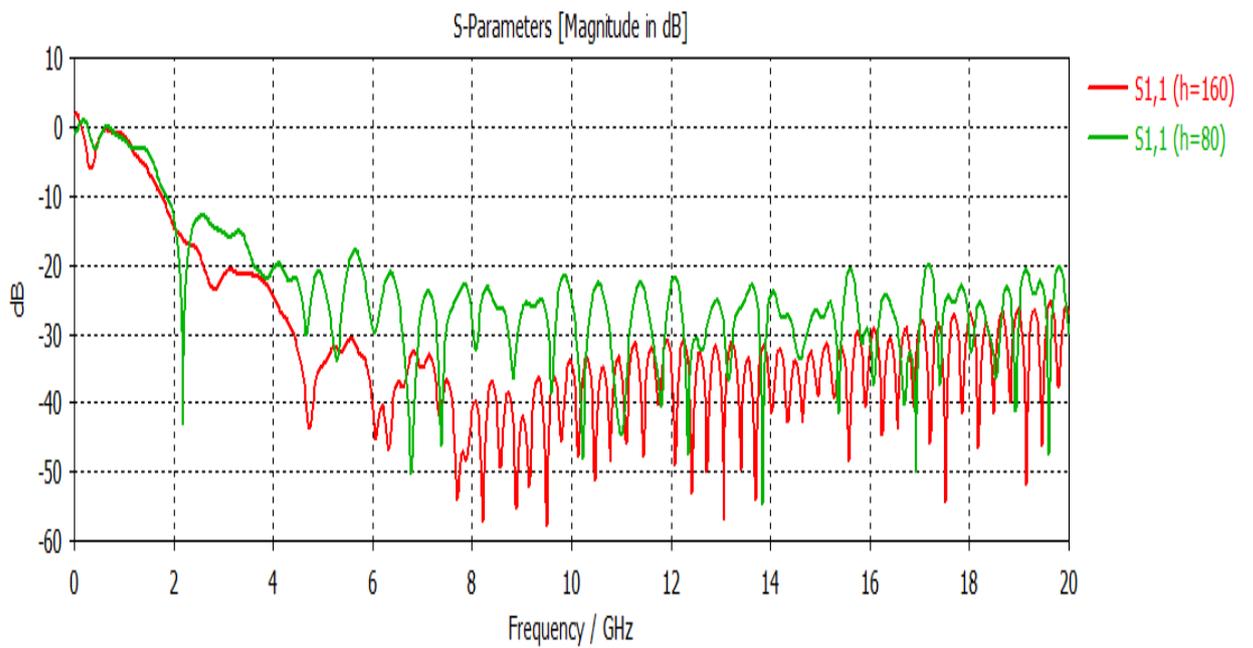
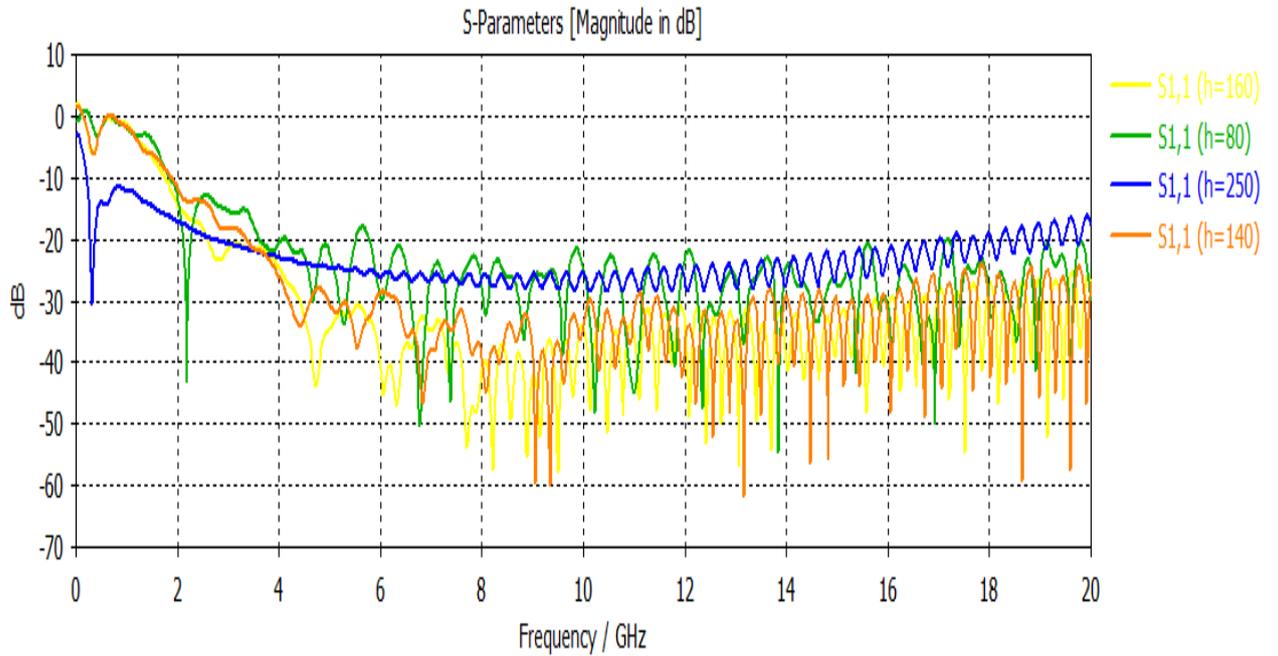


Fig. 3.20 S1.1 des deux hauteurs de carbone

Après plusieurs essais on obtient ce résultat :



**Fig. 3.21 S1.1 de carbone avec plusieurs hauteurs**

Résultat : la hauteur de la pyramide influe sur l'absorption.

## 5. Partie Réalisation :

### 5.1. Réalisation du carbone Absorbant :

Dans cette partie on a mis dans un Bole la poudre du charbon tout en rajoutant de la résille, comme monter dans la photo suivante :



**Fig. 3.22 la poudre de charbon**

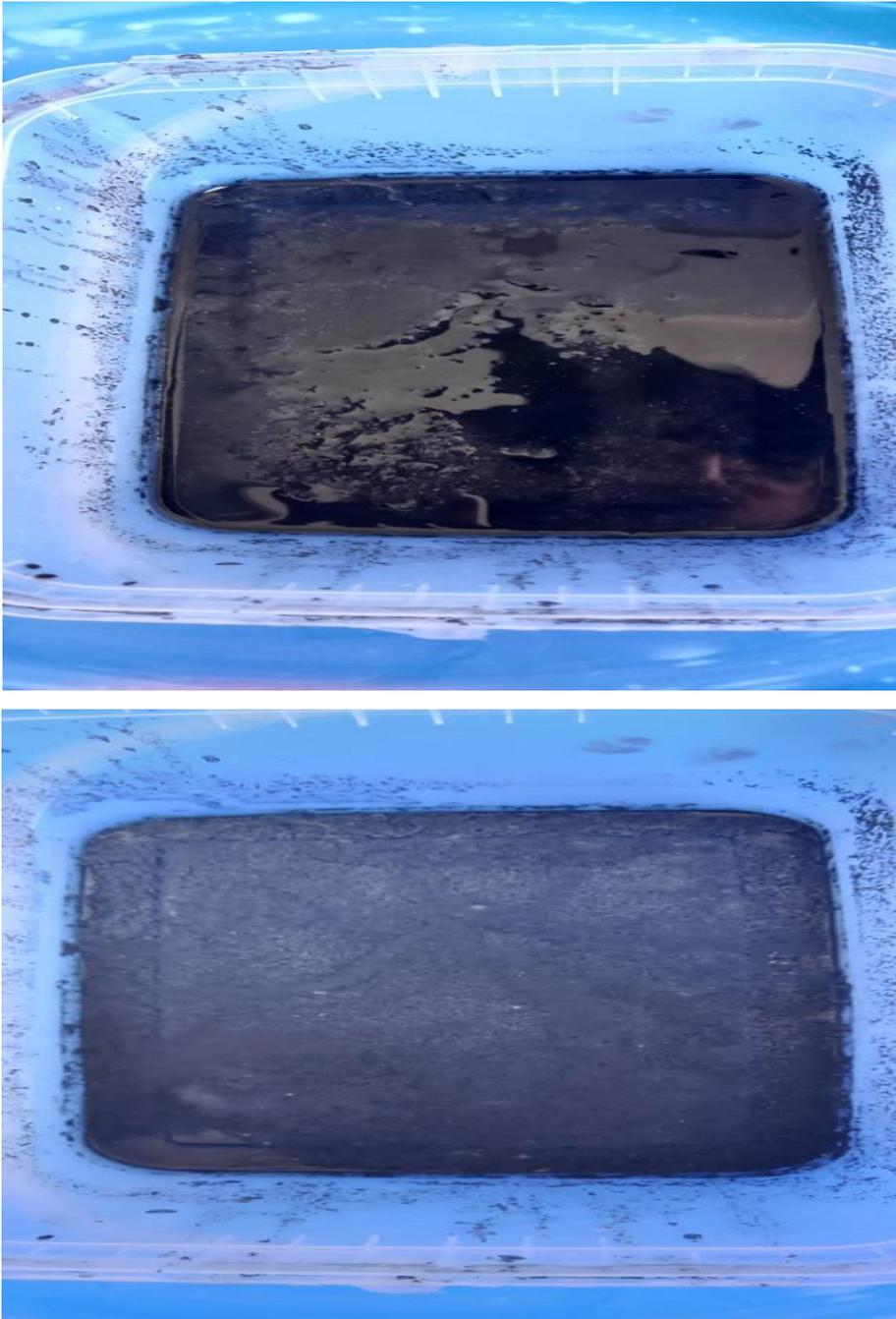


Fig. 3.23 Préparation de carbone

A la fin on a mis cette préparation dans un moule pyramidal et on la laissé un bon moment pour a la fin obtenir ce Résultat.



**Fig. 3.24** absorbant en carbone forme pyramidale

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre de conception et résultat, on a défini l'logiciel de simulation avec lequel on a travaillé et simulé beaucoup de cas, parmi ces derniers, tester les matériaux qui ont la capacité d'absorbé la différence entre l'absorption de plusieurs types de matériaux, comment la géométrie d'un matériau peut influencer sur son efficacité, par la suite on a démontré que même dans la même géométrie la hauteur et la largeur joue un grand rôle pour avoir la meilleure absorption.

## Conclusion générale

Initialement le mémoire avait pour objectif de modéliser et simuler un nouveau absorbant à expérimenter dans une chambre anéchoïque. Pour cela, la méthode voulait que soit définie la chambre anéchoïque dans un premier temps ainsi que sa structure, les types de chambres, comment les construire et à quoi servent-elles ?.

L'étape suivante s'intéressait aux absorbants, les types d'absorbants et au phénomène d'absorption, leurs caractéristiques principales leurs classifications, et surtout à démontrer l'importance de la géométrie des absorbants.

Enfin, il a été procédé à l'utilisation du simulateur CST-MWS 2019 afin de concevoir et étudier les absorbants. Ce simulateur a servi pour tester plusieurs types de matériaux pour voir s'ils sont dotés de capacités d'absorption ; Comment modéliser cette capacité et la rendre meilleure.

Se basant sur quelques paramètres tout en mesurant les coefficients de réflexion et d'absorption et optimiser notre résultat en jouant sur la géométrie jusqu'à l'obtention de la solution la plus adéquate. Ensuite, nous avons appliqué ces résultats dans un labo professionnel pour réaliser cet absorbant avec des étapes détaillées.

Comme perspective, nous envisageons de s'intéresser à optimiser cet absorbant à base de carbone.

## Références

- [1] Méjean, C. (2017, 26 octobre). Élaboration de nouveaux matériaux absorbants : application en chambres anéchoïques. <https://theses.hal.science/tel-02917990>.
  - [2] Bloom, D. C. (s. d.). Design and Verification of a LabVIEW Automated Antenna Radiation Pattern Measurement System. DigitalCommons@CalPoly. <https://digitalcommons.calpoly.edu/theses/1916/>
  - [3] Ammattikorkeakoulu, M. (2017). Evaluation of Radio Anechoic Chamber. Theseus. <https://www.theseus.fi/handle/10024/125741>
  - [4] A portable measurement system for antenna's radiation pattern. (2017, 1 novembre). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8251503>
  - [5] Experimental Evaluation of a Beamforming-capable System using NI USRP Software Defined Radios. (2019, 1 octobre). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8909456>
  - [6] Barde, C., Choubey, A., Sinha, R., Mahto, S. K., & Ranjan, P. (2020). A compact wideband metamaterial absorber for Ku band applications. *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, 31(19), 16898-16906. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04245-2>.
  - [7] Souikeur, A. (2014). Contribution à la modélisation des antennes multifonction à métamatériaux. <http://dSPACE.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/157>
-

الغرض من هذا العمل هو نمذجة ومحاكاة ماص جديد للغرفة عديمة الصدى.

في المقام الأول رأينا لمحة عامة عن الغرف عديمة الصدى وأنواعها وهيكلها ثم تناولنا أنواع الممتصات وخصائصها ، وأظهرنا ظاهرة الامتصاص وهذه المعلمات.

ثم قمنا بتطوير تصميم جهاز امتصاص جديد قائم على الكربون باستخدام برنامج محاكاة CST Micro Wave Studio. وأخيرًا نقترح التكوينات الهندسية المثلى بالإضافة إلى المعلمات الهندسية والفيزيائية للهيكل. الكلمات المفتاحية: الماص ، الغرف عديمة الصدى ، الكربون.

## Résumé :

Le but de ce travail est de modéliser et simuler un nouveau absorbant pour chambre anéchoïque.

Dans le premier lieu nous avons vu un aperçu sur les chambres anéchoïques leurs types et structure en suite nous avons abordé les types des absorbants et leurs caractéristiques, nous avons démontré le phénomène d'absorption et ces paramètres.

Ensuite nous avons élaboré la conception d'un nouveau absorbant à base de carbone en utilisant le logiciel de simulation CST Micro Wave Studio. Et enfin nous proposons les configurations géométriques optimales ainsi que les paramètres géométriques et physiques de la structure.

**Mots clé : absorbant, chambres anéchoïques, carbone.**

## Abstract:

The purpose of this work is to model and simulate a new absorber for anechoic chamber.

In the first place, we saw an overview of the anechoic chambers their types and structure then we approached the types of absorbers and their characteristics, we demonstrated the phenomenon of absorption and these parameters.

Then we developed the design of a new carbon-based absorber using the CST Micro Wave Studio simulation software. Finally, we propose the optimal geometrical configurations as well as the geometrical and physical parameters of the structure.

**Keywords: absorber, anechoic chambers, carbon.**