



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MÉMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de:

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité: Matériaux polymères, composites avancés à base de polymères
étude et applications

Par:

AMMOUR SOUMIA

Sur le thème

Mesure et analyse de l'efficacité du blindage électromagnétique à base de polystyrène conducteur à impact élevé associé à des charges de noir de carbone

Soutenu publiquement le 02/07/2017 à Tlemcen devant le jury composé de :

KHALDI Smaïn	Professeur	Université de Tlemcen	Président
BOUSSAID Abdelhak	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
BENHAMOU Sidi Mohamed	M.C.B	ESSAT de Tlemcen	Encadreur
HAMOUNI Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadreur

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules (LRM), département de physique, Faculté des sciences, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Sidi Mohamed BENHAMOU, Maître de conférences à l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, d'avoir assuré la direction de ce mémoire et ma profonde gratitude pour sa modestie, son aide précieuse et ses conseils judicieux.

J'adresse également mes vifs remerciements à Mohammed HAMMOUNI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour sa disponibilité, ses orientations fructueuses qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

Mes plus sincères remerciements vont à Monsieur Smain KHALDI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Sa présence m'honore.

J'exprime ma gratitude envers Monsieur Abdelhak BOUSSAID, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de participer à ce jury et avoir évalué ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

DEDICACES

Je dédie ce travail à:

*Mes très chers parents pour leur amour, leurs sacrifices,
leur encouragement et leur patience. Que dieu vous garde.*

Mon cher frère et mes chères sœurs pour leurs soutiens.

Mes fidèles amies et toute ma famille.

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles.....	4
Figure I.2: Schéma explicatif de la conductivité électrique des polymères conducteurs.....	5
Figure I.3: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K.....	6
Figure I.4: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère.....	8
Figure I.5: Variation de la conductivité électrique en fonction de la concentration des inclusions conductrices	9
Figure I.6: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2)..	10
Figure I.7: Blindage électromagnétique extérieur et intérieur.....	12
Figure I.8: Sources de perturbations électromagnétiques.....	13
Figure I.9: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source – écran de blindage.....	14
Figure I.10: Mécanisme du blindage électromagnétique.....	14
Figure I.11: Pénétration d'une onde électromagnétique à incidence normale.....	16
Figure I.12: Champs électromagnétiques aux interfaces.....	19
Figure II.1: Structure du polystyrène.....	29
Figure II.2: Polymérisation radicalaire du monomère de styrène.....	29
Figure II.3: Structure du noir de carbone.....	31
Figure II.4: Analyseur de réseau vectoriel de ZVA67 de Rohde & Schwarz.....	34
Figure II.5: Schéma de cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.....	34
Figure II.6: Cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.....	35
Figure II.7: Schéma de principe de la chambre anéchoïque.....	36
Figure II.8: Chambre anéchoïque.....	37
Figure III.1: Atténuation par réflexion de (HIPS/NC) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'onde rectangulaire.....	41
Figure III.2: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de la fréquence.....	42
Figure III.3: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence à une fréquence de 5 GHz.....	43
Figure III.4: Perte par absorption de (HIPS/NC) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'onde rectangulaire	44
Figure III.5: Variation de la perte par absorption en fonction de la fréquence.....	45
Figure III.6: Variation de la perte par absorption en fonction de l'angle d'incidence à une fréquence de 5 GHz.....	46

Figure III.7: Variation de l'atténuation par réflexion interne- multiple en fonction de la fréquence.....	47
Figure III.8: Variation de l'atténuation par réflexion interne- multiple en fonction de l'angle d'incidence à une fréquence de 5 GHz.....	48
Figure III.9: Efficacité du blindage de (HIPS/NC) en utilisant la chambre anéchoïque en fonction de la fréquence.....	49
Figure III.10: Efficacité du blindage en fonction de l'angle d'incidence à une fréquence de 5 GHz.....	50
Tableau II.1: Propriétés électriques du polystyrène.....	29
Tableau II.2: Les différentes caractéristiques du polystyrène à impact élevé associé au noir du carbone.....	33
Tableau III.1: Conductivité électrique, perméabilité relative, fréquence de coupure et épaisseur de (HIPS/NC).....	40

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I: Concepts généraux	
Introduction.....	3
1. Généralités sur les polymères conducteurs.....	3
1.1 Polymères conducteurs intrinsèques.....	4
1.1.1 Le dopage.....	4
1.1.2 Synthèses.....	7
a- Synthèse chimique.....	7
b- Synthèse électrochimique.....	7
1.2 Polymères conducteurs extrinsèques ou polymères conducteurs composites.....	7
1.3 Applications des polymères conducteurs.....	9
2. Notions sur le blindage électromagnétique.....	10
2.1 Quelques rappels sur les ondes électromagnétiques.....	10
2.2 Comptabilité électromagnétique.....	11
2.3 Définition du blindage électromagnétique.....	11
2.4 Sources de perturbations.....	12
2.5 Champ proche et champ lointain.....	13
2.6 Mécanisme du blindage électromagnétique.....	14
2.6.1 Atténuation par réflexion.....	15
2.6.2 Perte par absorption.....	15
2.6.3 Atténuation par réflexion interne multiples.....	15
2.7 Efficacité du blindage électromagnétique.....	15
2.8 Formalisme matriciel de la théorie de la ligne de transmission.....	16
2.8.1 La matrice caractéristique.....	16
2.8.2 Calcul des coefficients de transmission et de réflexion.....	19
2.8.3 Simplification de formalisme matriciel de la ligne de transmission.....	21
2.8.4 Cas d'une incidence oblique.....	22
Références bibliographiques.....	24
Chapitre II: Matériaux étudiés et méthodologie expérimentales	
Introduction.....	28
1. Matériaux utilisés.....	28

1.1 Polystyrène.....	28
1.1.1 Propriétés électriques.....	29
1.1.2 Types de polystyrène.....	30
a- Le polystyrène cristal.....	30
b- Le polystyrène choc.....	30
c- Le polystyrène expansé.....	29
1.1.3 Utilisation de polystyrène.....	29
1.2 Noir de carbone.....	31
1.2.1 Procédé de fabrication du noir de carbone.....	31
1.2.2 Domaine d'utilisation du noir de carbone.....	32
1.2.3 Conductivité électrique du noir de carbone.....	32
1.3 Le polystyrène à impact élevé associé au noir du carbone.....	32
2. Méthodes de mesure des propriétés de blindage électromagnétique.....	33
2.1 Analyseur de réseau.....	33
2.2 Guide d'onde rectangulaire.....	34
2.3 Chambre anéchoïque.....	36
Références bibliographiques.....	38
Chapitre III: Résultats et discussions	
Introduction.....	40
1. Atténuation par réflexion.....	40
1.1 Effet de la fréquence.....	40
1.2 Effet de l'angle d'incidence.....	42
2. Perte par absorption.....	43
2.1 Effet de la fréquence.....	43
2.2 Effet de l'angle d'incidence.....	45
3. Atténuation par réflexion internes multiples.....	46
3.1 Effet de la fréquence.....	46
3.2 Effet de l'angle d'incidence.....	47
4. Efficacité du blindage.....	48
4.1 Effet de la fréquence.....	48
4.2 Effet de l'angle d'incidence.....	49
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	51

Introduction générale

De nos jours, la prolifération des appareils électriques, électroniques ou des équipements qui contiennent des composants électriques et/ou électroniques (exemples: récepteurs de radio et de télévision, machines industrielles, etc.) accroît les problèmes d'interférences électromagnétiques (EMI). Pour éviter les dysfonctionnements des appareils et assurer un environnement électromagnétique satisfaisant aux radiocommunications, ceux-ci sont protégés par des écrans protecteurs, appelés blindages électromagnétiques, répondants aux normes internationales de la compatibilité électromagnétique (CEM). Les métaux classiques de bonne conductivité électrique tels que le cuivre, l'aluminium et le nickel exhibent de bonnes performances de blindage électromagnétique. Cependant, dans certaines applications, le matériel utilisé en blindage, en plus d'être efficace, doit être léger et souple, en particulier dans des applications électroniques et l'industrie aéronautique ou automobile. Par conséquent, une importante attention a été consacrée au développement de ces matériaux. En raison de leur faible densité, la facilité de synthèse, la possibilité de varier facilement les propriétés électriques et le prix de revient réduit, les polymères conducteurs peuvent être de forts candidats pour le blindage électromagnétique. Ces matériaux peuvent présenter des caractéristiques électriques relativement similaires aux conducteurs classiques avec un poids plus léger et une bonne stabilité environnementale. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs travaux de recherche de conception de matériaux de blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs ont été réalisés pour bénéficier les avantages qu'offrent ces matériaux par rapport aux métaux. Dans notre travail, nous nous intéressons aux propriétés du blindage électromagnétiques du polystyrène à impact élevé chargé avec le noir de carbone. A cet effet, nous mesurons l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage de ce polymère conducteur en utilisant deux méthodes expérimentales; la chambre anéchoïque et le guide d'ondes rectangulaire. Aussi, nous comparons ces résultats expérimentaux avec celles obtenus par l'utilisation du formalisme matriciel de la ligne de transmission.

L'organisation de ce mémoire se présente sous la forme suivante:

Le premier chapitre sera consacré à la présentation, en premier lieu, des généralités sur les polymères conducteurs et, en deuxième lieu, des notions sur le blindage électromagnétique. En effet, après avoir exposé une recherche bibliographique dédiée aux polymères conducteurs, nous rappelons les concepts relatifs au blindage électromagnétique. Nous présentons, en particulier, le calcul de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par

réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique à l'aide du formalisme matriciel de la théorie de la ligne de transmission.

Le deuxième chapitre est une présentation du polymère conducteur utilisé, il s'agit du polystyrène à impact élevé chargé avec le noir de carbone, ainsi que les méthodes expérimentales de mesure des propriétés du blindage électromagnétiques étudiés à savoir la chambre anéchoïque et le guide d'onde rectangulaire.

Le troisième chapitre traite les résultats obtenus et les discussions menées. Nous analysons l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique d'une couche de polystyrène à impact élevé chargé avec le noir de carbone en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique. Aussi, nous comparons les résultats de ces trois quantités mesurées avec leurs homologues obtenus à l'aide la théorie de la ligne de transmission sous la forme matricielle. En outre, une attention particulière est donnée à l'effet de l'angle d'incidence pour les deux types de polarisation de l'onde électromagnétique; électrique et magnétique sur ces trois quantités.

Ce mémoire s'achève par une conclusion générale sur les résultats obtenus, les questions résolues et les perspectives.

Chapitre I
Concepts généraux

INTRODUCTION

Les polymères sont connus pour être de très bons isolants électriques et sont notamment utilisés pour cette propriété dans diverses applications (isolation de câbles, tableaux et armoires électriques,...). A partir des années cinquante, les besoins en nouveaux matériaux ont conduit à élaborer des matériaux, appelés polymères conducteurs, associant les propriétés mécaniques des polymères isolants et les propriétés électriques des métaux. En fonction de la valeur de leurs résistivités électriques, les polymères conducteurs peuvent servir dans plusieurs applications à savoir, les matériaux antistatiques, les capteurs et, comme application qui fait l'objet de ce travail, le blindage électromagnétique [1]. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs travaux de recherche de conception de matériaux de blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs ont été réalisés pour bénéficier des avantages qu'offrent ces matériaux par rapport aux métaux, à l'instar de leur légèreté, leur faible coût, leur facilité de mise en forme, etc...[2]. La théorie de la ligne de transmission sous la forme matricielle est parmi les méthodes les plus utilisées pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau donné. Dans ce chapitre, après avoir présenté des généralités sur les polymères conducteurs, nous définissons, le blindage électromagnétique et les paramètres qui le caractérisent et nous rapportons aussi le calcul de l'efficacité du blindage électromagnétique d'une monocouche.

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES CONDUCTEURS

Les premiers travaux sur les polymères conducteurs ont été réalisés après l'observation selon laquelle la conductivité du polyacétylène, un polymère qui est au meilleur un semi-conducteur, augmente de 10 millions de fois lorsque le polyacétylène est oxydé en utilisant la vapeur d'iode [3, 4, 5]. C'est pour cette découverte et le développement des polymères conducteurs que de trois scientifiques: A.J. Heeger, A.G. Mac Diarmid et H. Shirakawa ont reçu le Prix Nobel de Chimie en 2000. Le processus qui permet d'augmenter la conductivité du polymère est appelé dopage. Comme le polyacétylène est difficile à synthétiser et instable à l'oxygène de l'air, d'autres polymères conducteurs, avec une stabilité plus importante à l'air, ont été développés, tels que le polyparaphénylène, le polythiophène, le polypyrrole ou la polyaniline [6]. Suivant la nature de la chaîne (conjuguée ou non conjuguée), nous distinguons deux classes de polymères conducteurs; intrinsèques et extrinsèques.

1.1. Polymères conducteurs intrinsèques (PCI)

Nous parlons des polymères conducteurs intrinsèques quand la chaîne principale est conjuguée, c'est-à-dire formée par une série d'alternance de liaisons simples et doubles [3]. Les liaisons simples contiennent une forte liaison chimique (type σ), les liaisons doubles contiennent en plus, une liaison moins forte (type π) [7], ceci est représenté sur la figure I.1. Ces polymères deviennent conducteurs grâce à la mobilité facile des électrons à l'intérieur et entre les chaînes du polymère [6].

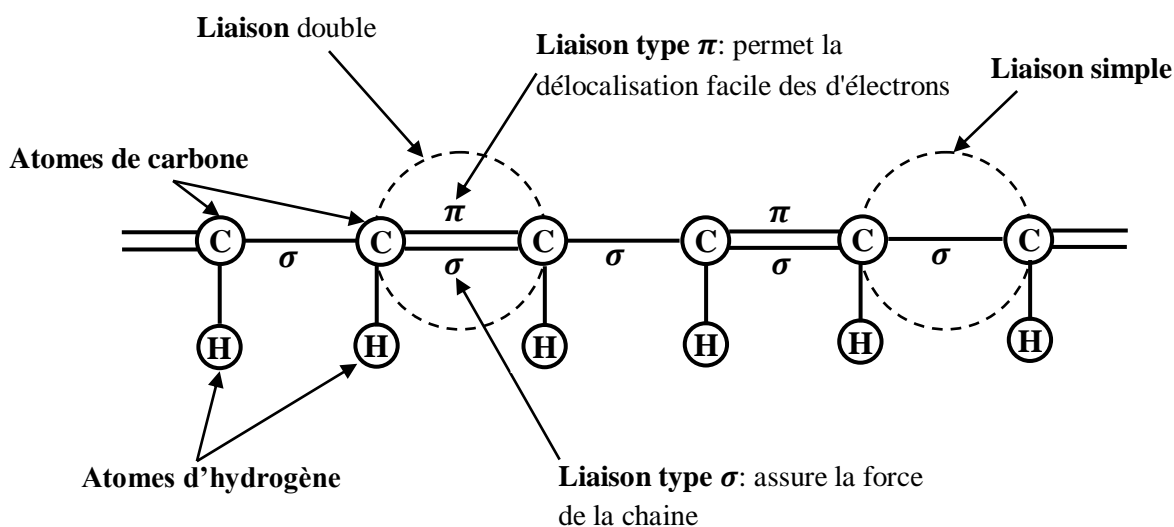


Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles [6].

La conductivité de ces polymères augmente par dopage avec des atomes donneurs ou accepteurs d'électrons, ils peuvent être, donc, obtenus soit à l'état oxydé ou réduit [8].

1.1.1. Le dopage

Le dopage est une réaction d'oxydation (type p) ou de réduction (type n) par voie chimique ou voie électrochimique. L'objectif du dopage est de faire apparaître des charges électriques sur les chaînes de PCI rendant ainsi le système plus conducteur [9]. La conductivité peut être augmentée en choisissant un dopant différent, mais cela aura un impact sur la surface et les propriétés structurales du polymère (par exemple la couleur, la porosité et le volume) [10]. Les dopants peuvent être classés en deux catégories en fonction de leurs tailles moléculaires: petits dopants (par exemple Cl) et grands dopants (par exemple le polystyrène sulfonate de sodium, PSS), les deux se comportent et affectent le polymère lui-même de façon différente [10, 11]. En plus de l'impact sur la conductivité et les propriétés

structurelles du polymère, le dopant de grande taille moléculaire peut influencer sur les propriétés des matériaux: par exemple, augmenter la densité. Ce type de dopant est le plus utilisé, car il offre au polymère une grande stabilité électrochimique [11]. Comme illustré par la figure I.2, l'injection d'une charge, positive ou négative, crée un «défaut» chargé et associé à une déformation locale de la chaîne (appelé ion radical pour les chimistes et polaron ou soliton pour les physiciens) apte à se mouvoir le long de la chaîne conjuguée (conduction intra-chaîne) ou de chaîne à chaîne (conduction inter-chaîne), sous l'effet d'un champ électrique. Les liaisons simples étant plus longues que les liaisons doubles, une déformation est créée par la permutation des ces liaisons. L'injection d'une nouvelle charge conduit à la présence de deux charges sur la chaîne qui s'associent et forment une nouvelle espèce appelée bipolaron [12, 13]. La présence de ces espèces (polaron, bipolaron et soliton), formées lors du processus de dopage, est confirmée par des différentes méthodes d'analyse à l'instar de la résonance paramagnétique électronique (RPE), de la spectroscopie d'absorption UV/visible/proche infrarouge et des spectroscopies infrarouge et Raman [14].

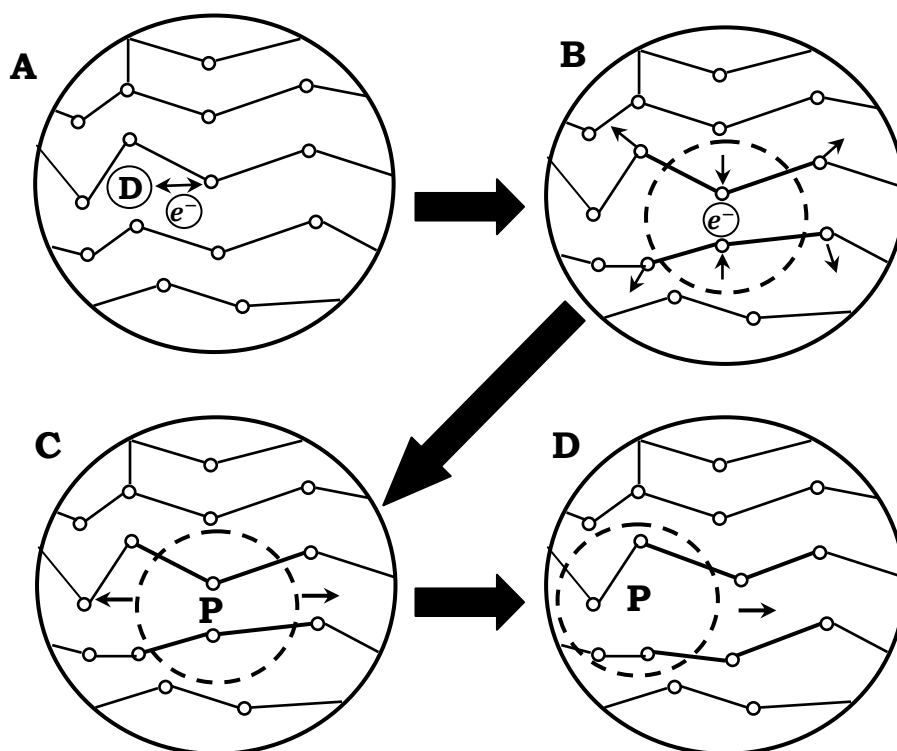


Figure I.2: Schéma explicatif de la conductivité électrique des polymères conducteurs [5, 6].

(A) Le dopant élimine ou ajoute un électron à partir de/à la chaîne du polymère, créant ainsi une charge délocalisée. (B) Localiser cette charge et la cerner d'une distorsion locale du réseau cristallin. (C) La charge entourée par une distorsion est connue sous le nom de polaron [15]. (D) Le polaron est capable de se déplacer le long de la chaîne polymère, permettant ainsi de conduire l'électricité [6].

La figure I.3 rapporte les valeurs de conductivité électrique des principaux PCI en comparaison avec celle des matériaux classiques, allant de l'isolant au conducteur, en passant par le semi-conducteur.

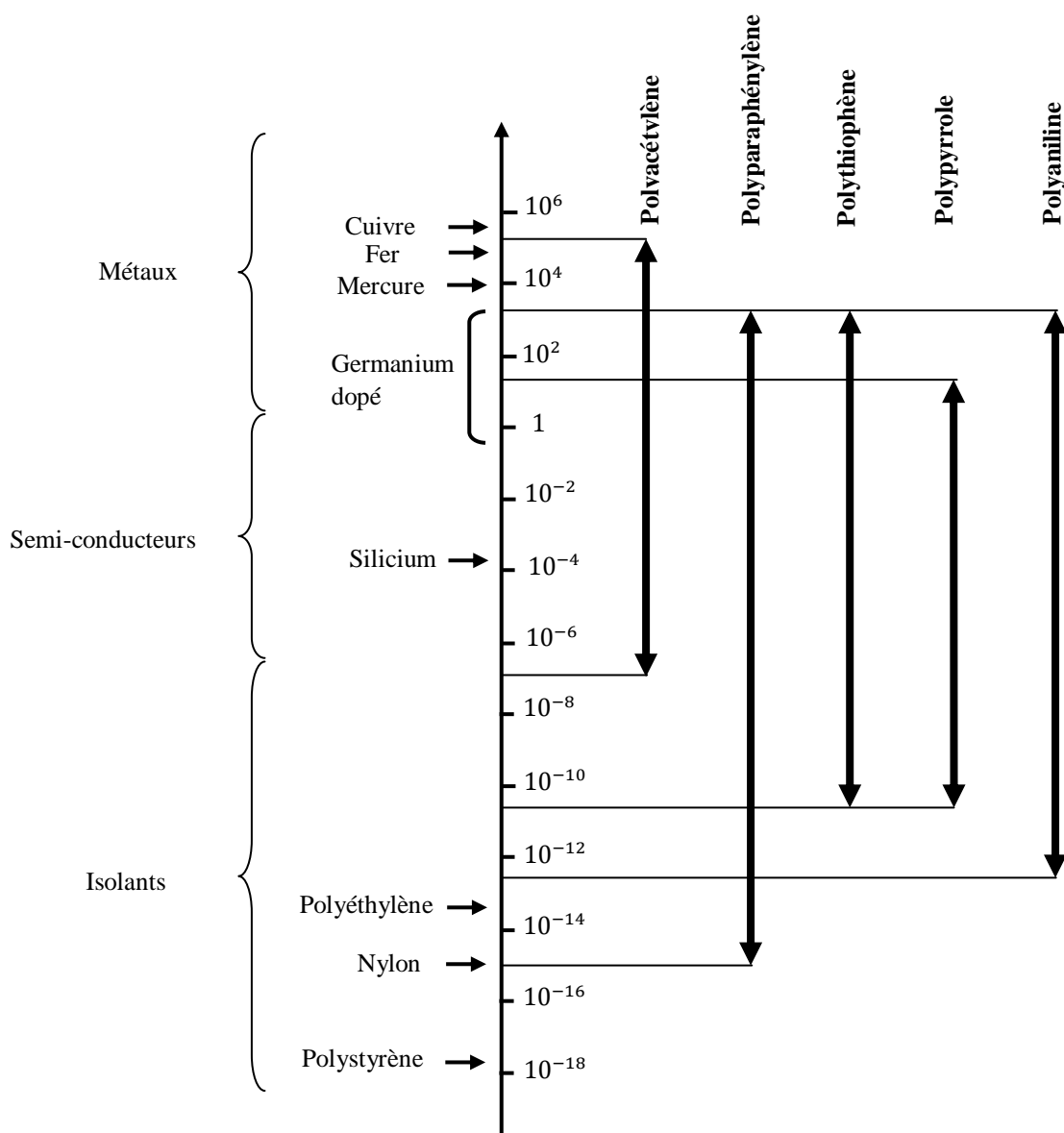


Figure I.3: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K [16].

1.1.2. Synthèses

Deux principales méthodes de synthèse de polymères conducteurs intrinsèques sont utilisées actuellement: la synthèse chimique et la synthèse électrochimique [7].

a- Synthèse chimique

La synthèse chimique est une réaction d'oxydoréduction qui consiste à introduire un oxydant (iode ou brome) ou un réducteur (métaux alcalins) dans la solution de monomère. Le polymère aura, donc, une charge positive ou négative [3].

b- Synthèse électrochimique

Dans cette méthode, le polymère et le dopant sont placés sur deux électrodes métalliques et plongés dans une solution électrolytique. L'application d'une tension entre ces électrodes provoque un mouvement des ions de la solution et des électrons qui se fixent sur le polymère traité, ou s'en échappent [9].

1.2. Les polymères conducteurs extrinsèques ou polymères conducteurs composites (CPC)

Un matériau composite est une combinaison d'au moins deux constituants non-miscibles; une matrice continue qui sert d'un support liant et des charges qui améliorent ses propriétés. Les propriétés de ces constituants se complètent afin de former un nouveau matériau aux performances mécaniques, électriques et thermiques améliorées par rapports aux matériaux de dépôts isolés [17].

Les polymères conducteurs composites (CPC) sont constitués d'une matrice de polymères isolante (ou semi-conductrices) dans laquelle nous dispersons des particules conductrices (tel que le noir de carbone, des particules métalliques (comme le cuivre et l'aluminium ou un polymère conducteur intrinsèque (comme la Pani) [15]. Ils existent un très grand nombre de polymères qui peuvent être utilisé comme matrice à l'instar des polymères amorphes (le polystyrène, le polycarbonate, Le polyméthacrylate de méthyle, etc.) et des polymères cristallins (le polyéthylène, le polypropylène, le sulfure de polypropylène, etc.).

La conductivité électrique dans les CPC est assurée par la formation des chemins conducteurs à partir des charges [18]. Ces matériaux ne deviennent conducteurs que pour des

concentrations en charges supérieures à une concentration particulière appelée seuil de percolation. Ce seuil dépend, en particulier, de la forme et de la géométrie des charges mais aussi du procédé de mise en œuvre. Il varie de quelques pourcent à une dizaine de pourcent en volume. Cependant, l'apparition des nano particules conductrices a conduit à des seuils de percolations très faibles inférieurs à 1% en volume [19].

- **Phénomène de percolation**

La conductivité électrique des polymères conducteurs extrinsèques dépend de la concentration des inclusions conductrices (fraction volumique ou massique). La transition de l'état isolant à l'état conducteur est interprétée par la théorie de percolation. Comme le montre la figure I.4, nous distinguons trois régions:

- Au dessous de seuil de percolation ($\phi < \phi_c$): les inclusions conductrices sont espacées et ne peuvent pas former des chemins conducteurs continus, la conductivité électrique est alors donnée par celle de polymère.
- Au seuil de percolation ϕ_c : nous assistons à la formation du premier chemin conducteur et le matériau passe de l'état isolant à l'état conducteur.
- Au dessus de seuil de percolation ($\phi > \phi_c$): les inclusions conductrices sont proches les une des autres et le nombre de chemins conducteurs augmente ce qui provoque une augmentation de la conductivité électrique.
- Au seuil de saturation: le nombre maximal des chemins conducteurs au sein de matériau composite est formé. Une augmentation supplémentaire de la concentration des particules conductrices, ne peut provoquer qu'une augmentation de volume des conducteurs sans augmentation significative des voies pour les électrons [5].

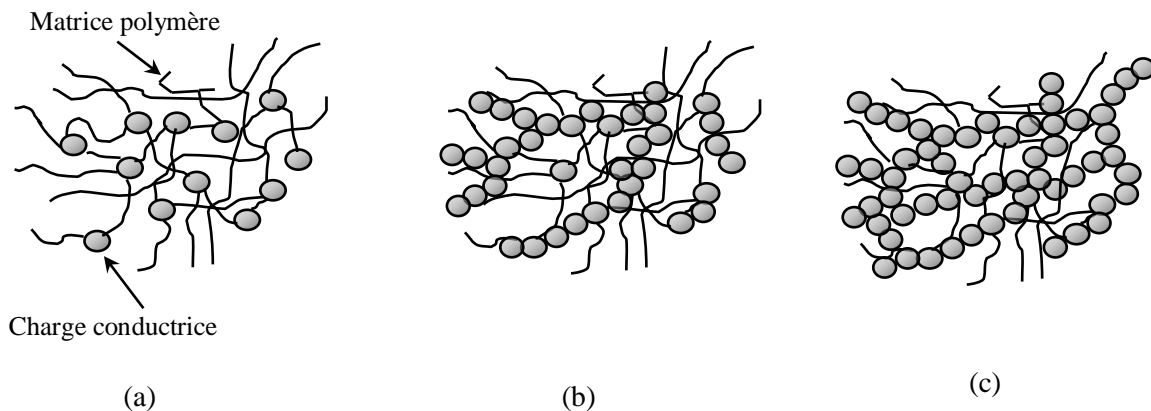


Figure I.4: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère: (a) $\phi < \phi_c$, (b) $\phi \approx \phi_c$ et (c) $\phi > \phi_c$ [15].

La figure I.5 décrit la variation de la conductivité électrique en fonction de la concentration des inclusions conductrices d'un polymère conducteur constitué de la polyaniline/Polyamide-11 [20].

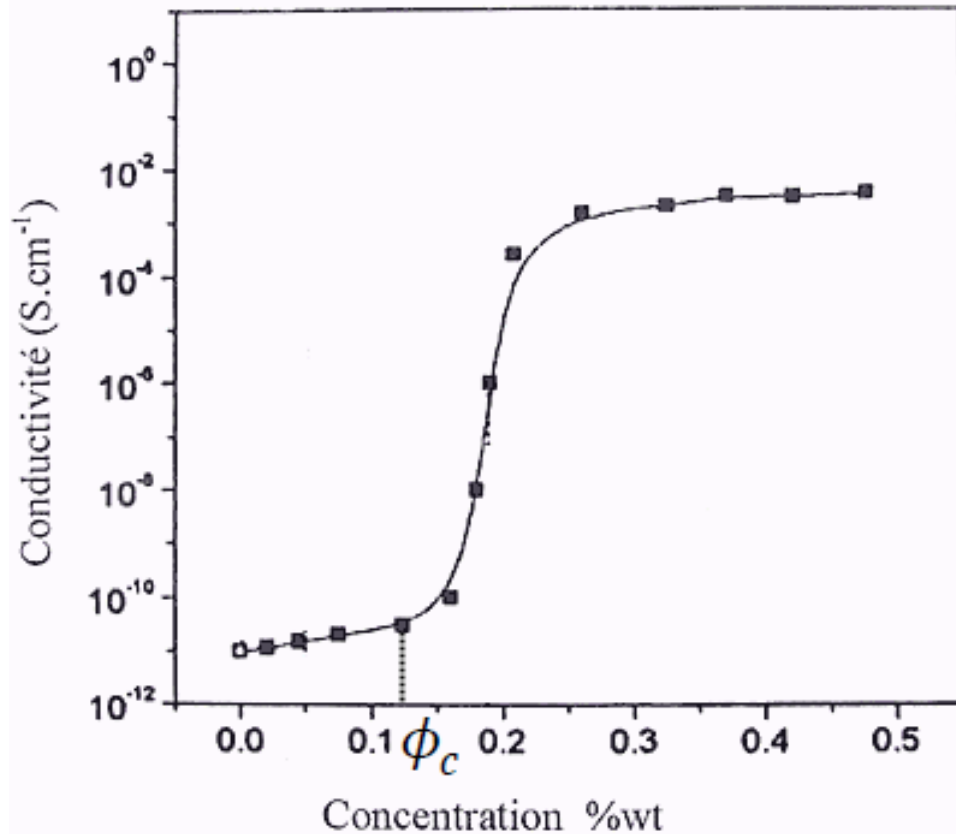


Figure I.5: Variation de la conductivité électrique en fonction de la concentration des inclusions conductrices [20]

La conductivité électrique d'un polymère conducteur composite peut être calculée par la relation suivante [18, 21]:

$$\sigma = \sigma_0 (\phi - \phi_c)^t \quad (\text{I.1})$$

où σ_0 et t sont, respectivement, la conductivité électrique des inclusions conductrices ($S.m^{-1}$) et l'exposant critique, $t = 1,3$ pour un réseau bidimensionnel ou $t = 2$ pour un réseau tridimensionnel.

1.3. Applications des polymères conducteurs

Les polymères conducteurs constituent aujourd'hui un domaine de recherche et d'innovation important au sein des nouvelles technologies. Grace à leurs bonnes propriétés

mécaniques (tel que l'élasticité et la flexibilité), électroniques et optiques et leurs faibles poids, ces matériaux trouvent un champ d'application de plus en plus vaste. On peut citer: les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs), les batteries à électrodes en polymères conducteurs, les cellules photovoltaïques organiques (OPVCs), les capteurs de gaz, les transistors à effet de champ, la protection contre les ondes électromagnétiques dite blindage électromagnétique [1].

2. NOTIONS SUR LE BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

2.1. Quelques rappels sur les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est l'association de deux champs perpendiculaire, un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{H} . Elle est exprimée, en régime harmonique, par la relation suivante:

$$\begin{cases} E(x, y, z) = E_0 e^{-ikr} \\ H(x, y, z) = H_0 e^{-ikr} \end{cases} \quad (I.2)$$

où E_0 et H_0 sont les amplitudes complexes et k est le vecteur d'onde.

La propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2) est illustrée par la figure I.6.

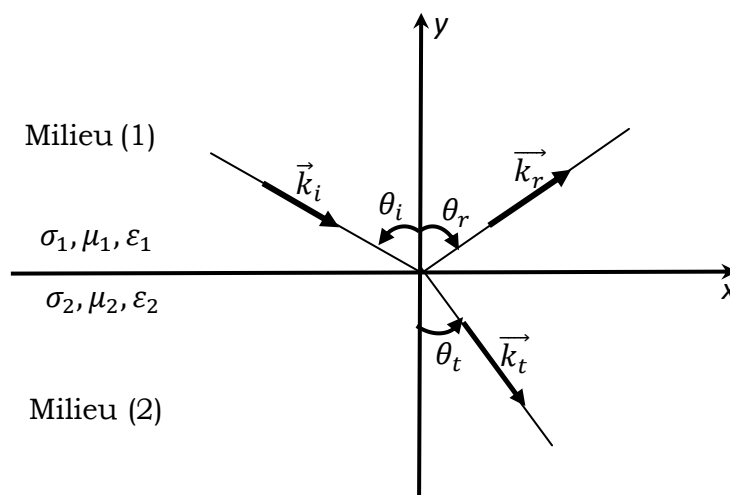


Figure I.6: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2).

Le phénomène de propagation est décrit par les équations de Maxwell:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + i\omega\varepsilon)\vec{E} \end{cases} \quad (I.3)$$

Le vecteur d'onde et l'impédance intrinsèque du milieu sont donnés, respectivement, par les relations suivantes [22]:

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{i\omega} \right)} \quad (I.4)$$

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}} \quad (I.5)$$

où ε , ω , μ , et σ représentent, respectivement, la permittivité diélectrique, la pulsation de l'onde électromagnétique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du milieu.

2.2. Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (C.E.M) est la capacité d'un dispositif ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement sans être perturbé et sans introduire lui-même des perturbations qui provoquent un dysfonctionnement des équipements voisins. Pour réduire les effets redoutables des champs électromagnétiques, nous pouvons soit diminuer l'amplitude du champ électromagnétique émis par le perturbateur, soit augmenter l'immunité électromagnétique de l'équipement perturbé en insérant un écran ou une barrière conductrice pour améliorer la compatibilité [23].

2.3. Définition du blindage électromagnétique

Le blindage électromagnétique est l'une des solutions employées pour réduire les interférences électromagnétiques. Il joue le rôle d'une enceinte conductrice isolant les équipements électriques ou électroniques des sources rayonnantes et les protégeant contre les effets indésirables de certains couplages électromagnétiques.

Comme le montre la figure I.7, il existe deux situations de blindage électromagnétique:

- De point de vue émission, contenir les sources rayonnantes à l'intérieur d'une enceinte blindée.

- De point de vue immunité, exclure les émissions rayonnées de la source se trouvant à l'extérieur de blindage.

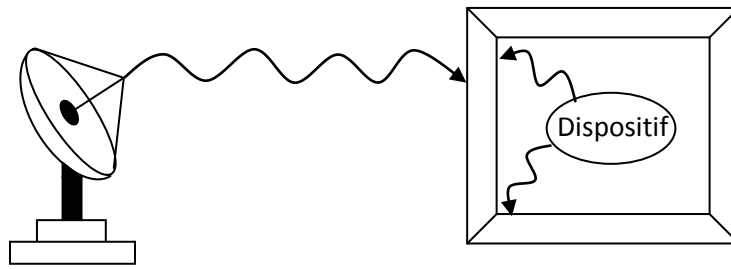


Figure I.7: Blindage électromagnétique extérieur et intérieur.

2.4. Sources de perturbations

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer deux grandes classes de sources de perturbations.

- Les sources de perturbations naturelles: foudre, décharges électrostatiques, bruit atmosphérique.
- Les sources de perturbations humaines, illustrées par la figure I.8, sont nombreuses et peuvent être divisées en deux types:
 - Sources externes de rayonnement: les radars, les émetteurs pour communications sans fils, les armes électromagnétiques de forte puissances (tel que les bombes électromagnétiques, et les impulsions électromagnétique), les lignes de puissances électriques, les écrans des appareils hautes tensions industriels, médicaux, scientifiques etc....
 - Sources internes de rayonnement: les circuits électroniques, en fonctionnement normale ces circuits émettent des rayonnements électromagnétiques par la piste de circuit imprimés ou circuit intégré [24].

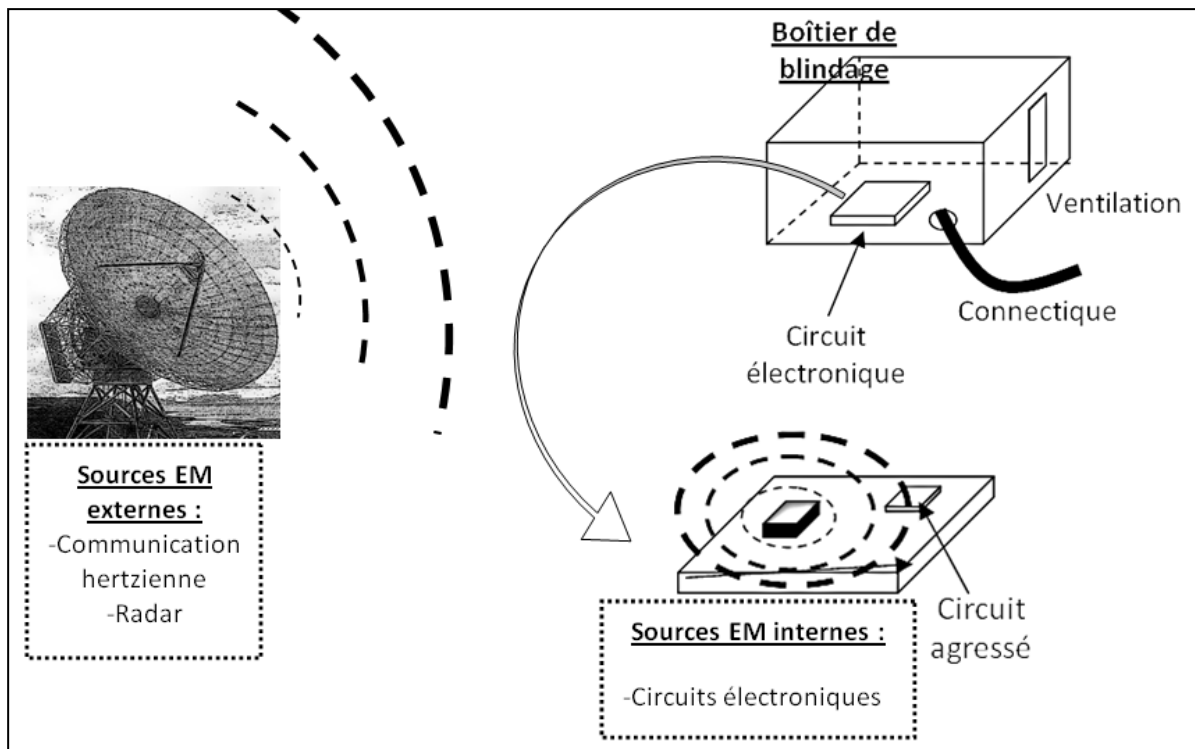


Figure I.8: Sources de perturbations électromagnétiques.

2.5. Champ proche et champ lointain

L'impédance d'onde électromagnétique $Z(\Omega)$ est définie comme le rapport entre la composante du champ électrique (E) et la composante du champ magnétique (H) ($Z = \frac{E}{H}$). La figure I.9 représente la variation de l'impédance en fonction de la distance source – écran de blindage. Nous distinguons trois zones: une zone de champ proche; lorsque la distance source – matériau est inférieure à la longueur d'onde dans l'air $r < \frac{\lambda}{2\pi}$, une zone de champ lointain; quand la distance source – matériau est plus grande que la longueur d'onde dans l'air $r > \frac{\lambda}{2\pi}$ et autour de $r = \frac{\lambda}{2\pi}$, on se trouve dans une zone transitoire [15, 24]. Si l'impédance de l'onde est supérieure à l'impédance du vide Z_0 , le champ est à dominance électrique et si l'impédance de l'onde est inférieure à l'impédance du vide Z_0 , le champ est à dominance magnétique. A partir d'une distance $r = \frac{\lambda}{2\pi}$, l'impédance d'onde rayonnée par un dipôle électrique Z_E et magnétique Z_H convergent vers l'impédance du vide $Z_0 = 377\Omega$.

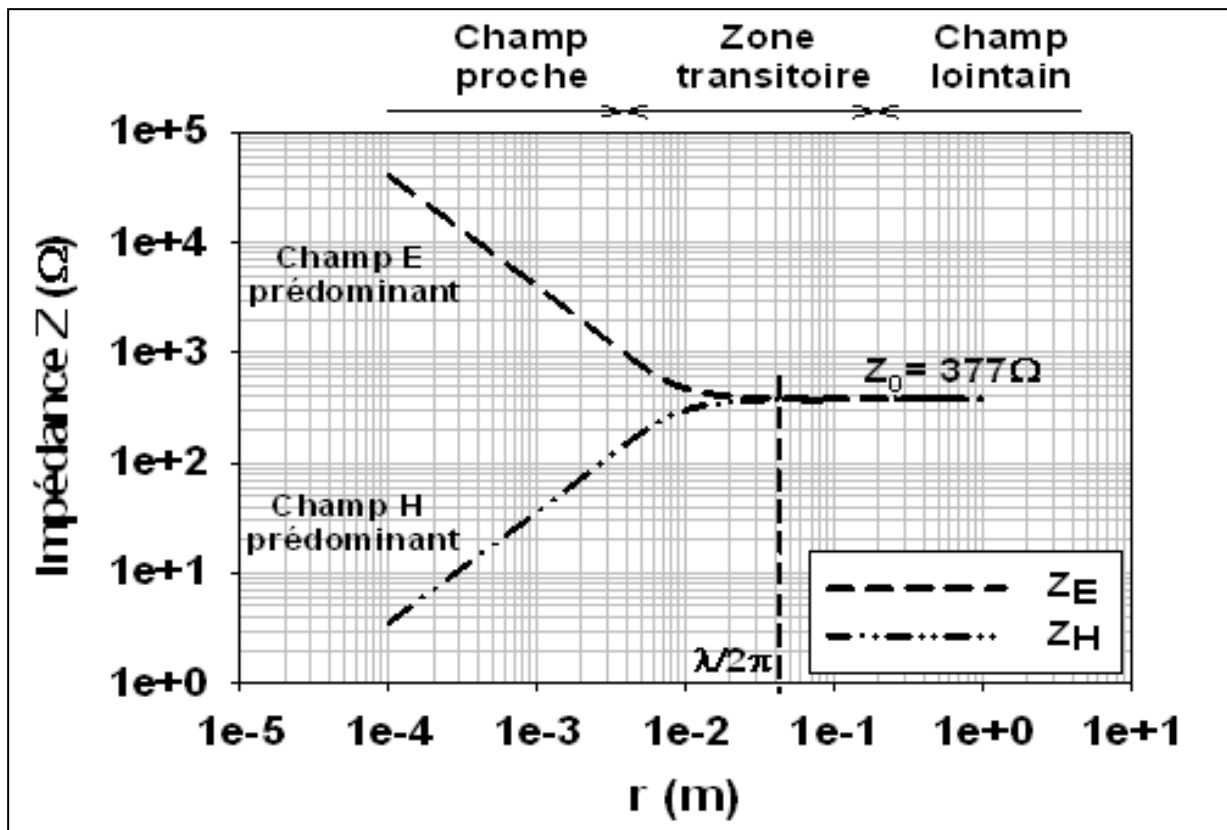


Figure I.9: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source – écran de blindage [24].

2.6. Mécanisme du blindage électromagnétique

Lorsqu'une onde électromagnétique percute une barrière conductrice, une partie est réfléchiée, une partie est absorbée par le matériau et l'autre partie est transmise de l'autre côté de la barrière (figure I.10).

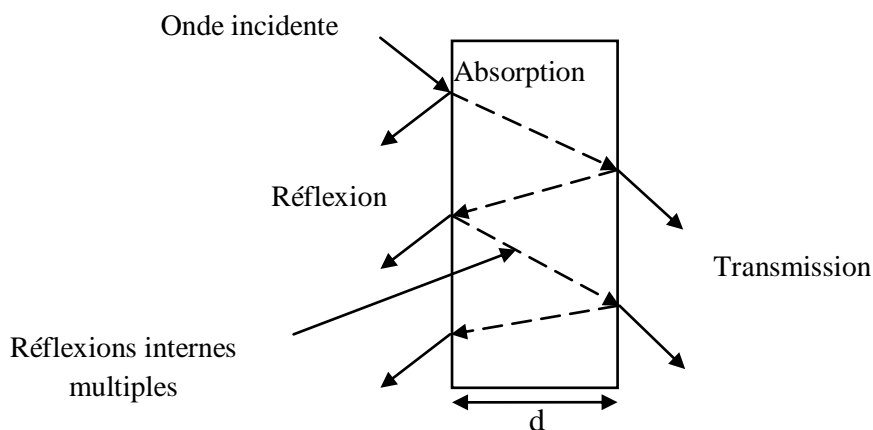


Figure I.10: Mécanisme du blindage électromagnétique.

Il existe trois phénomènes qui contribuent à la réduction de l'onde électromagnétique incidente: la réflexion, l'absorption et les réflexions internes multiples [22, 25].

2.6.1. Atténuation par réflexion

La réflexion est due à la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde électromagnétique et l'écran du blindage. La réflexion dépend fortement de la conductivité électrique du matériau constituant le blindage, en effet elle contribue à son amélioration [26].

2.6.2. Perte par absorption

L'absorption est une perte due à la traversée de l'onde électromagnétique d'une certaine épaisseur de blindage, elle se traduit par un échauffement du matériau. Quand les champs électrique et magnétique pénètrent un blindage, leurs amplitudes diminuent exponentiellement avec la profondeur de pénétration. L'atténuation des champs dépend de l'épaisseur de peau δ qui représente la profondeur à laquelle l'intensité du champ électrique est atténuée à $1/e$ de la valeur incidente. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence et définit par [22]:

$$\delta = \sqrt{1/(\sigma\mu\pi f)} \quad (I.6)$$

où f est la fréquence de l'onde électromagnétique.

2.6.3. Atténuation par réflexions internes-multiples

Les réflexions internes-multiples se produisent sur l'interface de sortie de blindage. Ces réflexions sont ignorées si l'épaisseur de blindage est beaucoup plus grande que l'épaisseur de peau $d \gg \delta$. Mais quand l'épaisseur de matériau est peu importante par rapport à l'épaisseur de peau, les réflexions internes multiples se produisent et la somme de ses termes provoque une diminution de l'efficacité de blindage [22].

2.7. Efficacité du blindage électromagnétique

L'efficacité du blindage électromagnétique (SE) mesure l'atténuation du champ électromagnétique incident. Elle est donnée en décibel et peut être calculée en utilisant les deux expressions suivantes [22, 27, 28]:

$$SE(\text{dB}) = -20 \log \left| \frac{E_t}{E_i} \right| \quad (\text{I.7})$$

$$SE(\text{dB}) = -20 \log \left| \frac{H_t}{H_i} \right| \quad (\text{I.8})$$

Le choix entre ces deux expressions est selon le type d'émission de la source; davantage de champ électrique ou de champ magnétique. Une forte tension est à l'origine d'un fort champ électrique et un fort courant est à l'origine d'un champ magnétique élevé. Ceci étant valable lorsqu'on est proche de la source. Cependant, pour une onde uniforme plane, ces deux expressions sont égales.

L'efficacité du blindage donnée par l'expression (I.7) peut être écrite en somme suivante [27, 29]:

$$SE(\text{dB}) = R(\text{dB}) + A(\text{dB}) + M(\text{dB}) \quad (\text{I.9})$$

où $R(\text{dB})$, $A(\text{dB})$ et $M(\text{dB})$ représentent respectivement l'atténuation par réflexion, les pertes par absorption et l'atténuation par réflexions internes multiples.

2.8. Formalisme matriciel de la théorie de la ligne de transmission

2.8.1. La matrice caractéristique

Nous considérons une onde électromagnétique plane incidente sur une couche j supposée homogène et isotrope avec une permittivité ϵ_j , une perméabilité μ_j , une conductivité électrique σ_j et une épaisseur d_j . Comme le montre la figure I.11, la couche j est en contact avec les milieux $j - 1$ et $j + 1$.

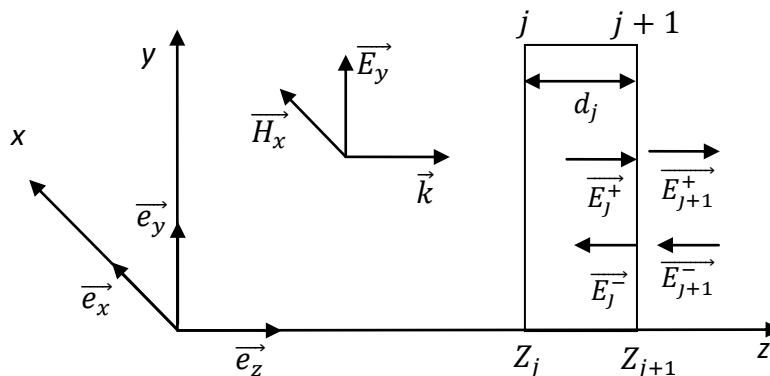


Figure I.11: Pénétration d'une onde électromagnétique à incidence normale.

A l'intérieur de cette couche, nous pouvons décomposer les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} . Les signes + et - renvoient au sens de propagation et la source du rayonnement se trouvant à l'amont de celle-ci selon la convention classique.

Les champs électriques et magnétiques s'écrivent:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{k_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \vec{H}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{H}_j^- e^{+ik_j d_j} \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

A partir des équations de Maxwell, nous avons:

$$\vec{H} = \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E} \quad (\text{I.11})$$

Le système d'équations (I.10) devient alors:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

D'autre part, nous avons:

$$\begin{cases} \vec{k} \cdot \vec{E}_j^+ = -k_j \cdot E_j^+ \vec{e}_x \\ \vec{k} \cdot \vec{E}_j^- = +k_j \cdot E_j^- \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = -\frac{k_j}{\omega \mu_j} (\vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} - \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j}) \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

Sur la première interface, nous avons:

$$d - d_j = 0 \rightarrow \begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^- - \vec{E}_j^+) \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

avec $Z_j = \frac{\omega \mu_j}{k_j}$, alors:

$$\begin{cases} (\vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^-) \frac{1}{Z_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^- - \vec{E}_j^+) \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

$$\begin{cases} \vec{E}_j^+ = \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} - Z_j \vec{H}_{x_j}) \\ \vec{E}_j^- = \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} + Z_j \vec{H}_{x_j}) \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

Sur la seconde interface, nous sommes à une épaisseur d_j , les composantes tangentielles des champs électriques \vec{E} et magnétique \vec{H} sont identiques (condition de continuité), ce qui impose que $H_{x_j} = H_{x(j+1)}$ et $E_{y_j} = E_{y(j+1)}$, par suite, nous aurons les deux systèmes d'équations suivants :

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \overrightarrow{E_{j+1}^+} e^{-ik_j d_j} + \overrightarrow{E_{j+1}^-} e^{+ik_j d_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x(j+1)} = \frac{1}{Z_j} (\overrightarrow{E_{j+1}^+} e^{+ik_j d_j} - \overrightarrow{E_{j+1}^-} e^{-ik_j d_j}) = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j}) \end{cases} \quad (\text{I.18})$$

L'insertion de la relation (I.18) dans la relation (I.17) donne:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} - Z_j \vec{H}_{x_j}) e^{-ik_j d_j} + \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} + Z_j \vec{H}_{x_j}) e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x(j+1)} = \frac{1}{Z_j} \left[\frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} - Z_j \vec{H}_{x_j}) e^{+ik_j d_j} - \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} - Z_j \vec{H}_{x_j}) e^{-ik_j d_j} \right] \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

Par suite:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \vec{E}_{y_j} \cosh(kd_j) - Z_j \vec{H}_{x_j} \sinh(ik_j d_j) \\ \vec{H}_{x(j+1)} = -\frac{1}{Z_j} \vec{E}_{y_j} \sinh(ik_j d_j) + \vec{H}_{x_j} \cosh(ik_j d_j) \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

Le système d'équations (I.20) peut être écrit sous une forme matricielle [25]:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+1)} \\ \vec{H}_{x(j+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(ik_j d_j) & -Z_j \sinh(ik_j d_j) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) & \cosh(ik_j d_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{y_j} \\ \vec{H}_{x_j} \end{bmatrix} \quad (\text{I.21})$$

où M_j est la matrice caractéristique associée à la couche j , définie comme suit [30,31]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cosh(ik_j d_j) & -Z_j \sinh(ik_j d_j) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) & \cosh(ik_j d_j) \end{bmatrix} \quad (\text{I.22})$$

Nous savons que l'impédance Z est le rapport entre les composantes orthogonales de \vec{E} et de \vec{H}

$$Z = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} \quad (I.23)$$

L'impédance effective Z_{j+1} de la couche $j + 1$ est défini par:

$$Z_{j+1} = -\frac{E_{y(j+1)}}{H_{x(j+1)}} = -\frac{M_{11}E_{yj} + M_{12}H_{xj}}{M_{21}E_{yj} + M_{22}H_{xj}} \quad (I.24)$$

avec

$$M_{11} = \cosh(ik_j d_j) \quad (I.25)$$

$$M_{12} = Z_j \sinh(ik_j d_j) \quad (I.26)$$

$$M_{21} = -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) \quad (I.27)$$

$$M_{22} = \cosh(ik_j d_j) \quad (I.28)$$

$$Z_j = -\frac{E_{yj}}{H_{xj}} \quad (I.29)$$

d'où:

$$Z_{j+1} = \frac{M_{11}Z_j - M_{12}}{M_{22} - Z_j M_{21}} \quad (I.30)$$

2.8.2. Calcul des coefficients de transmission et de réflexion

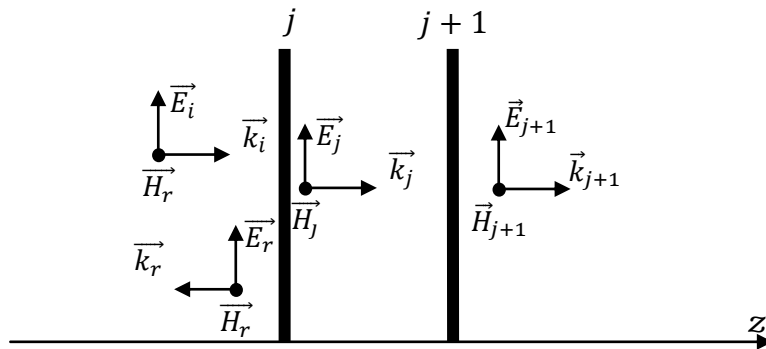


Figure I.12: Champs électromagnétiques aux interfaces.

A l'interface j , comme l'illustre la figure I.12, les conditions de continuité s'écrivent:

$$\begin{cases} \vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_j \\ \vec{H}_i + \vec{H}_r = \vec{H}_j \end{cases} \quad (\text{I.31})$$

$$\begin{cases} (\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_j) \frac{1}{Z_{j-1}} \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (\vec{E}_i - \vec{E}_r) = \frac{\vec{E}_j}{Z_j} \end{cases} \quad (\text{I.32})$$

$$\vec{E}_i = \left(\frac{Z_j + Z_{j-1}}{2Z_j} \right) \vec{E}_j \quad (\text{I.33})$$

La relation (I.33) nécessite la connaissance de \vec{E}_j , qui est calculé en inversant la matrice caractéristique.

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_j \\ \vec{H}_j \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}} \begin{bmatrix} M_{11} & -M_{12} \\ -M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{j+1} \\ \vec{H}_{j+1} \end{bmatrix} \quad (\text{I.34})$$

donc

$$\vec{E}_j = \left(M_{11} - \frac{M_{12}}{Z_{j+1}} \right) \vec{E}_{j+1} \quad (\text{I.35})$$

$$Z_j = \frac{M_{11}Z_{j+1} - M_{12}}{M_{22} - Z_{j+1}M_{21}} \quad (\text{I.36})$$

Le coefficient de transmission est le rapport entre les champs électriques transmis et incident, il s'écrit en injectant les équations (I.35) et (I.36) dans l'équation (I.33):

$$T = \left| \frac{\vec{E}_{j+1}}{\vec{E}_i} \right| = \frac{2Z_{j+1}}{(M_{11}Z_{j+1} - M_{12}) + Z_{j-1}(M_{22} - Z_{j+1}M_{21})} \quad (\text{I.37})$$

Le coefficient de réflexion est le rapport entre les champs électriques réfléchi et incident, s'écrit:

$$R = \left| \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} \right| = \frac{Z_j - Z_{j-1}}{Z_j + Z_{j-1}} \quad (\text{I.38})$$

L'insertion de l'équation (I.36) dans l'équation (I.38) donne:

$$R = \frac{(M_{11}z_{j+1} - M_{12}) - z_{j-1}(M_{22} - z_{j+1}M_{21})}{(M_{11}z_{j+1} - M_{12}) + z_{j-1}(M_{22} - z_{j+1}M_{21})} \quad (\text{I.39})$$

2.8.3. Simplification du formalisme matriciel de la théorie de la ligne de transmission

Le formalisme matriciel a été simplifié par Benhamou et al en considérant les deux approximations suivantes:

- Première approximation: représente l'approximation classique d'un matériau bon conducteur ($\sigma \gg \omega\epsilon$).
- Deuxième approximation: c'est l'approximation réalisée par Colaneri et Shacklett [32], qui correspond aux échantillons électriquement minces (épaisseur du blindage inférieure à l'épaisseur de peau) et échantillons électriquement épais (épaisseur du blindage plus grande que l'épaisseur de peau). Cette approximation repose sur la définition de deux intervalles de variation de la fréquence; inférieure ou supérieure à une fréquence caractéristique appelée fréquence de coupure f_c , qui correspond à l'égalité entre l'épaisseur d_j de la couche et son épaisseur de peau δ_j . Cette fréquence sépare la plage de fréquence où l'onde est atténuée de la plage de fréquence où l'onde peut se propager, sa formule est donnée ci-dessous:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sigma_j\mu_j d_j^2} \quad (\text{I.40})$$

L'impédance intrinsèque et le vecteur d'onde dans une couche conductrice j en fonction de δ_j s'écrivent, respectivement [33]:

$$Z_j = \frac{(1+i)}{\sigma_j\delta_j} \quad (\text{I.41})$$

$$k_j = \frac{(1-i)}{\delta_j} \quad (\text{I.42})$$

Par suite, la matrice associée à la couche j , donnée par l'expression (I.22), peut s'écrire sous la forme suivante:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & -Z_j \sinh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \end{bmatrix} \quad (I.43)$$

où encore

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & -Z_j \sinh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \\ -\frac{1}{Z_j} \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & 1 \end{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (I.44)$$

Benhamou et.al. ont aboutit à des expressions simples et faciles à appliquer de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage données, respectivement, par les relations suivantes:

$$R(dB) = 20 \log \left(\frac{Z_0}{10} \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}} \right) \quad (I.45)$$

$$M(dB) = 20 \log \left[\frac{1 + \frac{Z_0}{2} \sigma_j d_j}{1 + \frac{Z_0}{10} \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}}} \right] \quad (I.46)$$

$$A(dB) = 8.66 \frac{d_j}{\delta_j} \quad (I.47)$$

$$SE(dB) = \begin{cases} 8.66 \frac{d_j}{\delta_j} + 20 \log \left(1 + \frac{Z_0 \sigma_j d_j}{2} \right) & \text{si } d_j \ll \delta_j \text{ ou } f \ll f_c \\ 8.66 \frac{d_j}{\delta_j} + 20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{10} \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}} \right) & \text{si } d_j \gg \delta_j \text{ ou } f \gg f_c \end{cases} \quad (I.48)$$

2.8.4. Cas d'une incidence oblique

Dans le cas d'une incidence oblique, l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage évoluent selon les mêmes relations obtenues dans le cas d'une incidence normale, il suffit juste de remplacer l'impédance intrinsèque dans l'onde électromagnétique dans le vide Z_0 par l'une des deux

expressions suivantes, selon le type de polarisation; Z_E pour une polarisation transversale électrique et Z_M pour une polarisation transversale magnétique:

$$Z_E = \frac{Z_0}{\cos \theta_i} \quad (\text{I.49})$$

$$Z_M = Z_0 \cos \theta_i \quad (\text{I.50})$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Pang H., XU L., Yan D.X., Li Z.M., Conductive polymer composites with segregated structures. *Prog. Polym. Sci.* 2014; 39: 1908-33.
- [2] Thomassin J.M., Jérôme C., Pardeon T., Bailly C., Huynen I., Detrembleur C., Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Mat. Sci. Eng. R.* 2013; 74: 205- 210.
- [3] Shirakawa H., Louis E.J., MacDiarmid A.G., Chiang C.K. et Heeger A.J., Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x. *J.Chem. Soc. Chem. Commun.* 1977; 16: 578-80.
- [4] Zhou D., D., Cui X.T., Hines A., Greenberg R. J., Conducting polymers in neural stimulation applications. *Implantable neural prostheses.* Springer, Berlin; 2010: 2 : 217-52.
- [5] Benhamou S., Contribution à l'étude théorique de l'efficacité du blindage électromagnétique multicouche à base de polymères conducteurs: Cas d'une incidence oblique. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen. 2016; p.1.
- [6] Balint R., Cassidy N.J, Cartmell S.H., Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia.* 2014; 10: 2341-2353.
- [7] Ravichandran R., Sundarrajan S., Venugopal R., Mukherjee S., Ramakrishna S., Applications of conducting polymers and their issues in biomedical engineering. *J. R. Soc. Interface.* 2010; 7: S559-79.
- [8] Wallace G., Spinks G., Conducting polymers – bridging the bionic interface. *Soft Matter.* 2007; 3: 665–71.
- [9] Douha A., Etude de l'effet de la température sur les paramètres d'une cellule solaire organique. Thèse de doctorat, Université de Bechar. 2008; p 12.
- [10] Guimard N., Gomez N., Schmidt E., Conducting polymers in biomedical engineering. *Prog. Polym. Sci.* 2007; 32: 876 – 921.

- [11] Shi G., Rouabhia M., Wang Z, Dao L. H., Zhang Z., A novel electrically conductive and biodegradable composite made of polypyrrole nanoparticles and polylactide. *Biomaterials*. 2004; 25: 2477-88.
- [12] Su W. P., Schrieffer J. R., Heeger A., Solitons in polyacetylene. *Phys. Rev. Lett.* 1979; 42: 1698-1701.
- [13] Brédas J. L., Chance R., Silbey R., Theoretical studies of charged defect states in doped polyacetylene and polyparaphenylene. *Mol. Cryst-liq.* 1981; 77: 319-332.
- [14] Attias A. J., *Polymères conjugués et polymères conducteurs électroniques*. E1862; techniques de l'ingénieur. 2002.
- [15] Dai L., *Intelligent macromolecules for smart devices : from materials synthesis to device applications*. Springer-Verlag, London; 2004. p. 41- 80.
- [16] Payerne R., *Structure et propriétés électroniques à différentes échelles de systèmes modèles de polymères conducteurs et semi-conducteurs*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble. 2004; p. 18.
- [17] Fraichard L., *Nanotubes fonctionnalisés vers de nouveaux composites conducteurs*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse III. 2012; p 15.
- [18] Xu S., Rezvanian O., Peters K., Zikry M. A., The viability and limitations of percolation theory in modeling the electrical behavior of carbon nanotube-polymer composites. *Nanotechnology*. 2013; 24: 155706/1– 155706.
- [19] AGOUDJIL B., BOUDENNE A., KRUPA I., IBOS L., MAJESTE J., *Propriétés thermo physiques des composites polymères / charges isolantes métallisées*. 2007; 6 : 151– 706.
- [20] Zhang Q., Huifen J., Xianhong W., Xiabin J., *Morphology of conductive blend fibers of polyaniline and polyamide-11* *Synthetic Metals*. 2001; 123: 481-485.
- [21] Stauffer D., Aharony A. *Introduction to Percolation Theory*. Taylor and Francis , London. 1994; p. 192.

- [22] Celozzi S., Araneo R., Lovatr G., Clayton P., *Electromagnetic Shielding*. John Wiley & Sons, New Jersey. 2008; p 56.
- [23] Maitrise de la CEM, “Fondamentaux physiques et technique de la CEM,” Référentiels DUNOD, Partie 2, 2007.
- [24] Hoang N. N., *Réalisation et caractérisation de structure composite polyaniline-polyurethane dans le domaine micro-ondes, modélisation et optimisation de blindage électromagnétique multicouche en utilisant un algorithme génétique*. Thèse doctorat, Université Bordeaux 1. 2005; p 64.
- [25] Al-Saleh M. H., Influence Of conductive network structure on the EMI Shielding and electrical percolation of carbon nanotube/polymer nanocomposites. *Synth. Met.* 2015; 205: 78 – 84.
- [26] Chung D. L., Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *CARBON*. 2001; 39: 279 – 85.
- [27] Rubeziene V., Baltusnikaite J., Varnaite-Zuravliova S., Sankauskaite A., Abraitiene A., Matuzas J., Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives, *Journal of Electrostatics*. 2015; 75: 90 – 98.
- [28] Chen X., Lizi L., Liu J., Pan F., Microstructure, electromagnetic shielding effectiveness and mechanical properties of Mg–Zn–Y–Zr alloys, *Mater. Design*. 2015; 65: 360 – 369.
- [29] Wei-Li S., Mao-Sheng C., Li-Zhen F., Ming-Ming L., Yong L., Chan-Yuan W., Hong-Fei J., Highly ordered porous carbon/wax composites for effective electromagnetic attenuation and shielding. *CARBON*. 2014; 77: 130 –142.
- [30] Yuan B., Yu L., Sheng L., An K., Zhao X., Comparison of electromagnetic interference shielding properties between single-wall carbon nanotube and graphene sheet/polyaniline composites. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012; 45: 235108.
- [31] Arjmand M., Apperley T., Okoniewski M., Sundararaj U., Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites. *CARBON*. 2012; 50: 5126 –

5134.

[32] Boutar A., Contribution au développement de modèles circuits pour l'étude de couplages électromagnétiques à l'intérieur d'enceintes métalliques. Thèse doctorat, l'université de Limoges. 2014; p. 19.

[33] Schulz RB., Plantz VC., Brush DR., Shielding theory and practice. IEEE T. Electromagn. C. 1988; 30: 187 – 201.

Chapitre II

Matériaux étudiés et méthodologies expérimentales

INTRODUCTION

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre I, les polymères conducteurs peuvent servir dans plusieurs applications, entre autre nous avons cité, en particulier, le blindage électromagnétique. Par conséquent, plusieurs travaux de recherche de conception de matériaux de blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs ont été réalisés pour bénéficier des avantages qu'offrent ces matériaux par rapport aux métaux, à l'instar de leur légèreté, leur faible coût, leur facilité de mise en forme, etc...[1]. Parmi ces matériaux, nous citons le polystyrène à impact élevée chargé avec le noir de carbone, un matériau composite qui l'objet de ce travail. Les propriétés électriques des composites obtenus par incorporation du noir de carbone dans les polymères ont été étudiés depuis les années trente [1-6]. Grâce à sa faible densité proche de la matrice polymérique et son faible prix de revient, le noir de carbone est actuellement la charge conductrice la plus utilisée dans l'élaboration de composite conducteur [7]. En comparaison avec les charges conductrices métalliques, ces dernières provoquent une augmentation significative de la conductivité mais, en revanche, le poids du composite s'approche de celui du métal et ses propriétés mécaniques sont dégradées. Ainsi, et afin d'alléger le composite final, des charges de noir de carbone ont remplacé leurs homologues métalliques [8].

Dans ce chapitre nous présentons le polystyrène à impact élevée chargé avec le noir de carbone, le matériau composite que nous utilisons en blindage électromagnétique. En effet, nous rapportons quelques propriétés physiques, en particulier, électriques. Aussi, nous exposons les deux méthodes expérimentales qui nous ont permis de mesurer les propriétés du blindage électromagnétique de notre échantillon à savoir, le guide d'onde rectangulaire et la chambre anéchoïque.

1. MATERIAUX UTILISÉS

1.1. Le polystyrène

Le polystyrène (PS) est un polymère thermoplastique de formule brute $(C_8H_8)_n$. structurellement, comme le montre la figure II.1, il est composé d'une longue chaîne hydrocarbonée, avec un cycle de benzène accroché sur une chaîne $(CH-CH_2)$.

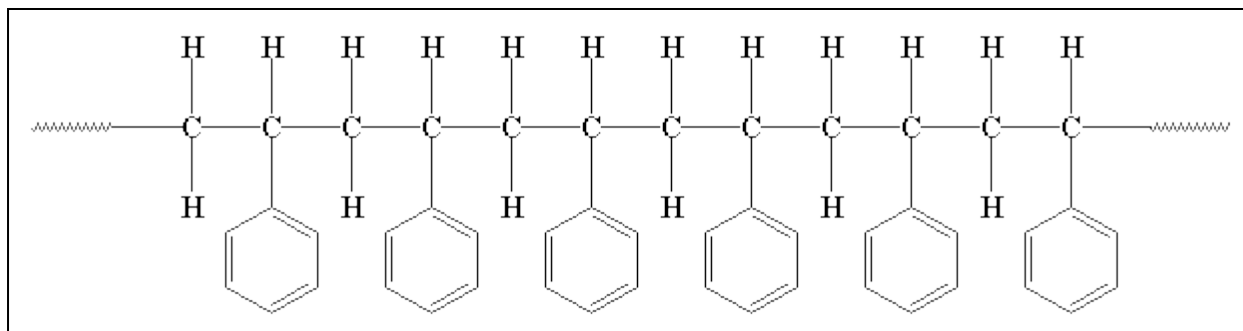


Figure II.1: Structure du polystyrène.

Le polystyrène est issu de la pétrochimie et fabriqué par polymérisation radicalaire à partir du son monomère: le styrène (figure II.2).

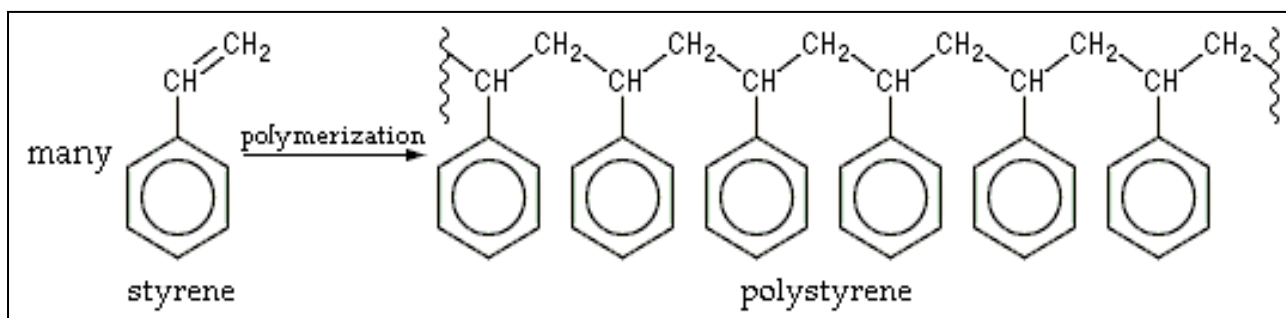


Figure II.2: Polymérisation radicalaire du monomère de styrène.

1.1.1. Propriétés électriques

Les propriétés électriques du polystyrène sont illustrées sur le tableau II.1 [9].

Les Constantes diélectriques à 1 MHz	2,4 – 3,1
Facteur de dissipation à 1 kHz	0,0002
Résistance diélectrique (kV.mm ⁻¹)	20
Résistivité volumique (ohm.cm)	> 10 ¹⁶

Tableau II.1: Propriétés électriques du polystyrène.

1.1.2. Types de polystyrène

Le polystyrène peut se présenter sous trois formes, classées comme suit:

a- Le polystyrène cristal

Appelé PS standard qui est un polymère amorphe, rigide et cassant, peut être transparent ou coloré. C'est le polystyrène de base obtenu suite à la polymérisation de styrène. Tous les autres types de PS sont obtenus par la modification de ce dernier [9].

b- Le polystyrène choc

Le polystyrène choc résulte de la polymérisation de styrène en présence d'un élastomère qui est en général le polybutadiène [10]. Le PS choc est opaque et présente un bon équilibre entre la rigidité et la résistance mécanique. La résistance au choc de ce matériau est liée à la teneur en polybutadiène [11].

c- Le polystyrène expansé

Il existe deux types de polystyrène expansé PSE: le PSE moulé et le PSE extrudé. Le PSE moulé est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on ajoute en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane). Le PSE extrudé est obtenu à partir d'un procédé d'extrusion par injection sous pression d'un gaz d'expansion (le pentane) dans le polystyrène cristal fondu [12].

1.1.3. Utilisations de polystyrène

A cause de ses bonnes propriétés et son faible coût, le PS est utilisé dans de nombreuses applications et dans différents secteurs, tel que:

- Emballages protecteurs des équipements électroniques
- Emballages alimentaires
- Isolation thermique des bâtiments
- Isolation acoustique
- Récipients, équipements récréatifs et beaucoup d'autres articles.

1.2. Noir de carbone

Le noir de carbone NC est une forme amorphe de carbone obtenue par deux procédés, l'un basé sur la combustion incomplète d'hydrocarbures et l'autre sur la décomposition thermique. Le noir de carbone se présente sous forme d'une poudre constituée de particules sphériques appelée nodules. Ces nodules s'agglomèrent en agrégats. Comme le montre la figure II.3, des forces électriques peuvent maintenir ces agrégats entre eux pour former des agglomérats [13]

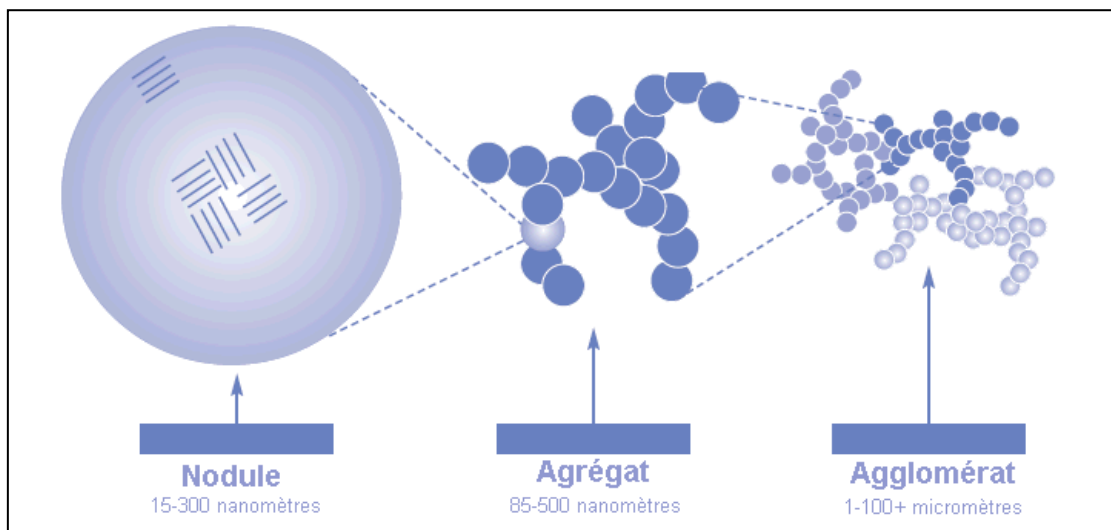


Figure II.3: Structure du noir de carbone.

1.2.1. Procédés de fabrication du noir de carbone

Les propriétés du noir de carbone dépendent de la matière première ainsi que du procédé de son obtention. Il dérive soit de la combustion incomplète, soit de la décomposition thermique [14, 15]:

- Le noir de fourneau, obtenu par combustion incomplète de résidus pétroliers lourds, est la forme la plus commercialisée (95 %).
- Le noir de fumée est obtenu par combustion incomplète d'hydrocarbures de goudron.
- Le noir au tunnel est produit par combustion incomplète de gaz naturel.
- Le noir thermique est obtenu par décomposition thermique de gaz naturel.

- Le noir d'acétylène, obtenu par craquage thermique de l'acétylène à des températures de plus de 2000 °C, est l'un des noirs de carbone les plus purs; il possède un caractère conducteur marqué.

1.2.2. Domaine d'utilisation du noir de carbone

Les utilisations du noir de carbone sont diverses et nombreuses, il peut agir comme:

- Agent de renforcement dans les produits en caoutchouc (tel que les pneus et les câbles) [5]
- Pigment dans les encres, les peintures, les laques, les plastiques, les fibres et les céramiques etc.
- Agent d'apprêtage du cuir.
- Stabilisateur des polyoléfines contre les rayonnements ultraviolets [5].
- Charge conductrice qui permet l'amélioration des propriétés électriques des polymères en les rendant conducteurs [6].

1.2.3. Conductivité électrique du noir de carbone

Le noir de carbone est actuellement la charge conductrice la plus utilisée dans l'élaboration des composites et nano composites conducteurs. En effet, sa dispersion dans une matrice polymère améliore, non seulement, ses propriétés électriques, mais également ses propriétés mécaniques telles que le module de traction et la résistance au vieillissement [16]. Généralement le noir de carbone se présente sous forme de poudre avec une densité qui varie entre 0,1 et 0,6. Le phénomène de conduction électrique est lié à la taille des particules. Mis à part la taille, le contact entre les particules favorise l'augmentation de la conductivité qui, à des pressions modérées, peut varier généralement entre 10^{-2} et 10 S.m^{-1} [19].

1.3. Le polystyrène à impact élevé associé au noir de carbone

Notre polymère conducteur composite que nous allons utiliser est le polystyrène à impact élevé associé au noir de carbone afin d'obtenir un degré modéré de conductivité électrique. Ce polymère composite est un produit commercialisé par la société canadienne Goodfellow [10]. Ces principales propriétés sont données sur le tableau II.2.

Caractéristiques mécaniques	Elongation à la rupture (%)	36
	Module de tension (MPa)	1,6
	Résistance à la traction (MPa)	27
	Résistance aux chocs- IZOD (J. m ⁻¹)	Pas de rupture
Caractéristiques électriques	Résistivité électrique (Ohm/carré)	10 ² – 10 ⁷
Caractéristiques physiques	Densité (g. cm ⁻³)	1,04

Tableau II.2: Les différentes caractéristiques du polystyrène à impact élevé associé au noir du carbone.

2. METHODES DE MESURE DES PROPRIÉTÉS DE BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

Pour mesurer les propriétés du blindage électromagnétique (l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage) d'une couche du (HIPS), nous allons utiliser deux dispositifs associés à un analyseur de réseau vectoriel, à savoir, le guide d'onde rectangulaire et la chambre anéchoïque.

2.1. Analyseur de réseau

L'analyseur de réseau, illustré par la figure II.4, est un dispositif électronique permettant la caractérisation des composants utilisés dans les circuits hyperfréquences, à l'instar des amplificateurs, des atténuateurs, des câbles et tous appareils ayant un impact sur le signal émis ou reçu. En effet, il permet de mesurer les paramètres de diffusion (Scattering parameters), notés S. A partir de ces paramètres, des grandeurs tel que la puissance, le gain, l'atténuation, le coefficient de réflexion ou l'impédance sont calculés. Il existe deux grandes familles d'analyseurs de réseaux: les analyseurs scalaires qui mesurent uniquement le module des paramètres S et les analyseurs vectoriels qui mesurent également leur phase [20].



Figure II.4: Analyseur de réseau vectoriel de ZVA67 de Rohde & Schwarz.

2.2. Guide d'onde rectangulaire

C'est une technique basée sur la structure quadripôle et permet de mesurer les paramètres S_{11} (coefficient de réflexion) et S_{21} (coefficient de transmission) à l'aide de l'analyseur de réseau. En outre, elle permet d'extraire la permittivité et la perméabilité de l'échantillon à caractériser ainsi que les propriétés du blindage électromagnétique. Une vue schématique de la cellule est donnée sur la figure II.5.

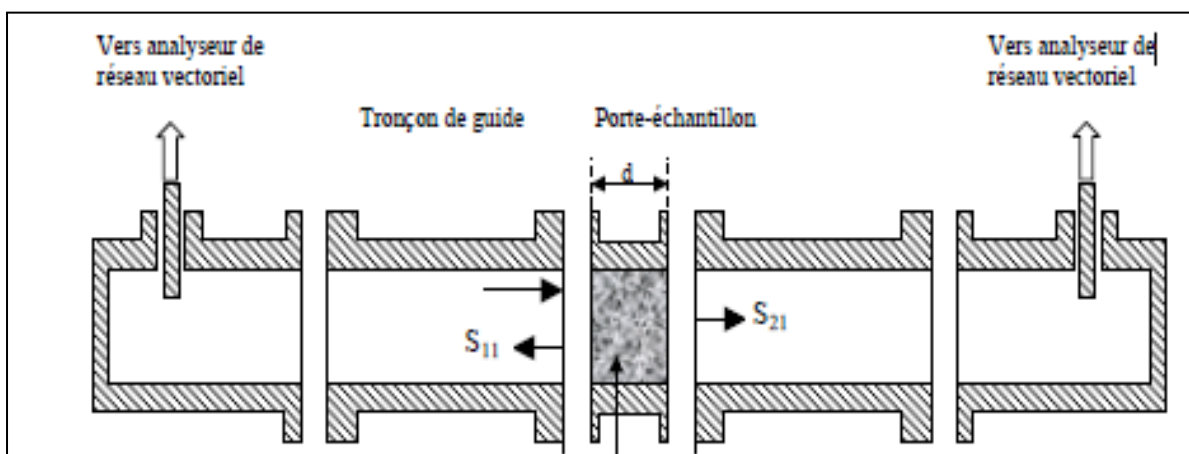


Figure II.5: Schéma de cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.

Dans notre mesure, nous avons utilisé le guide d'onde WR-340 dans une plage de 2 à 3 GHz branché à l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) ZVA67 pour obtenir les paramètres de diffusion S_{11} et S_{21} . La Figure II. 6 montre une plaque de (HIPS/NC) qui sera serrée entre les deux brides de guide d'onde rectangulaire.

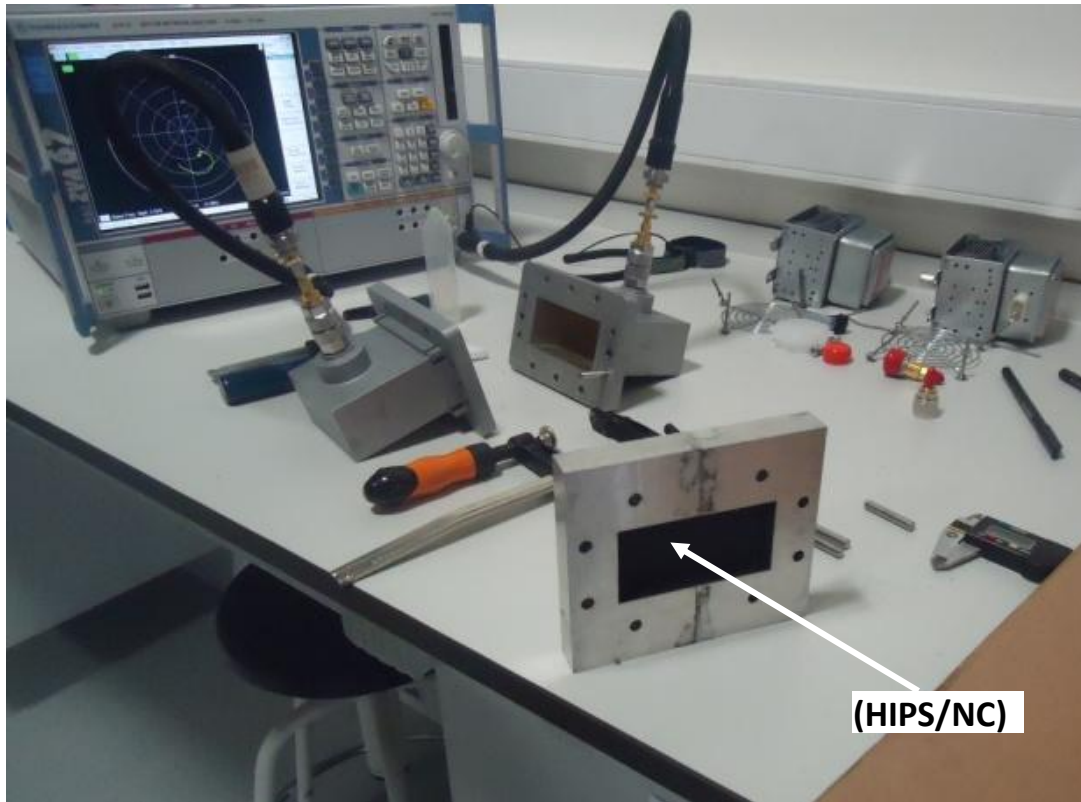


Figure II.6: Cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.

En fonction de ces paramètres de diffusion, l'efficacité du blindage, l'atténuation par réflexion et la perte d'absorption sont données, respectivement, par les expressions suivantes [21]:

$$SE(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{1}{|S_{21}|^2} \right| \quad (II.1)$$

$$R(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right| \quad (II.2)$$

$$A(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right| \quad (II.3)$$

2.3. Chambre anéchoïque

La chambre anéchoïque est utilisée pour déterminer l'efficacité du blindage électromagnétique du matériau testée sur une gamme de fréquences plus large. Le schéma descriptif de cette technique est présenté sur la figure II.7.

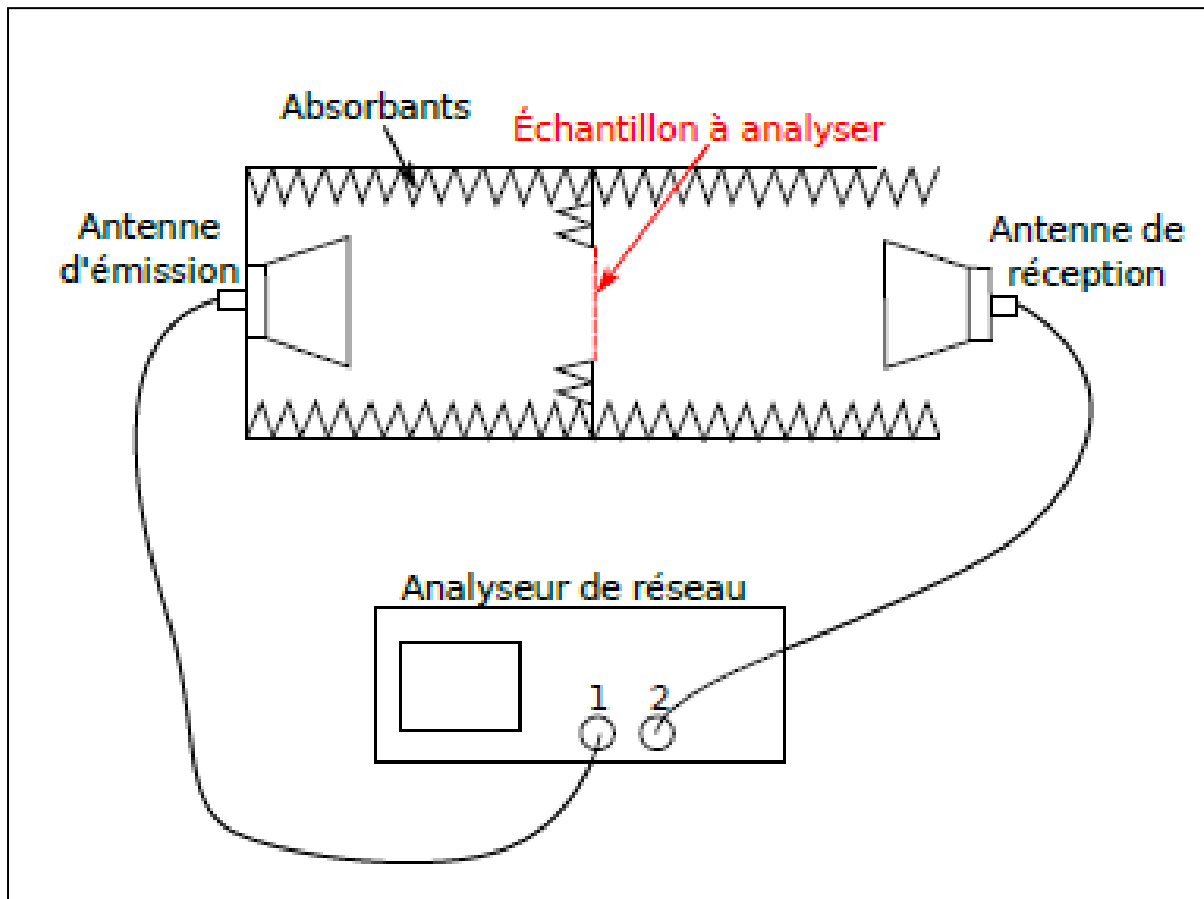


Figure II.7: Schéma de principe de la chambre anéchoïque [22].

Ce dispositif est constitué de deux antennes, une émettrice et l'autre réceptrice, qui sont liées à l'analyseur de réseau. L'antenne émettrice génère une onde électromagnétique pénétrant le matériau dont nous souhaitons déterminer son efficacité du blindage. Pour éliminer les réflexions et par suite focaliser l'onde électromagnétique sur l'échantillon, des absorbants en forme des pyramides sont placés sur les parois de la chambre anéchoïque [22].

Nos mesures, illustrées par la figure II.8, sont effectuées dans la chambre anéchoïque sur une gamme de fréquences allant de 10 MHz à 26 MHz.

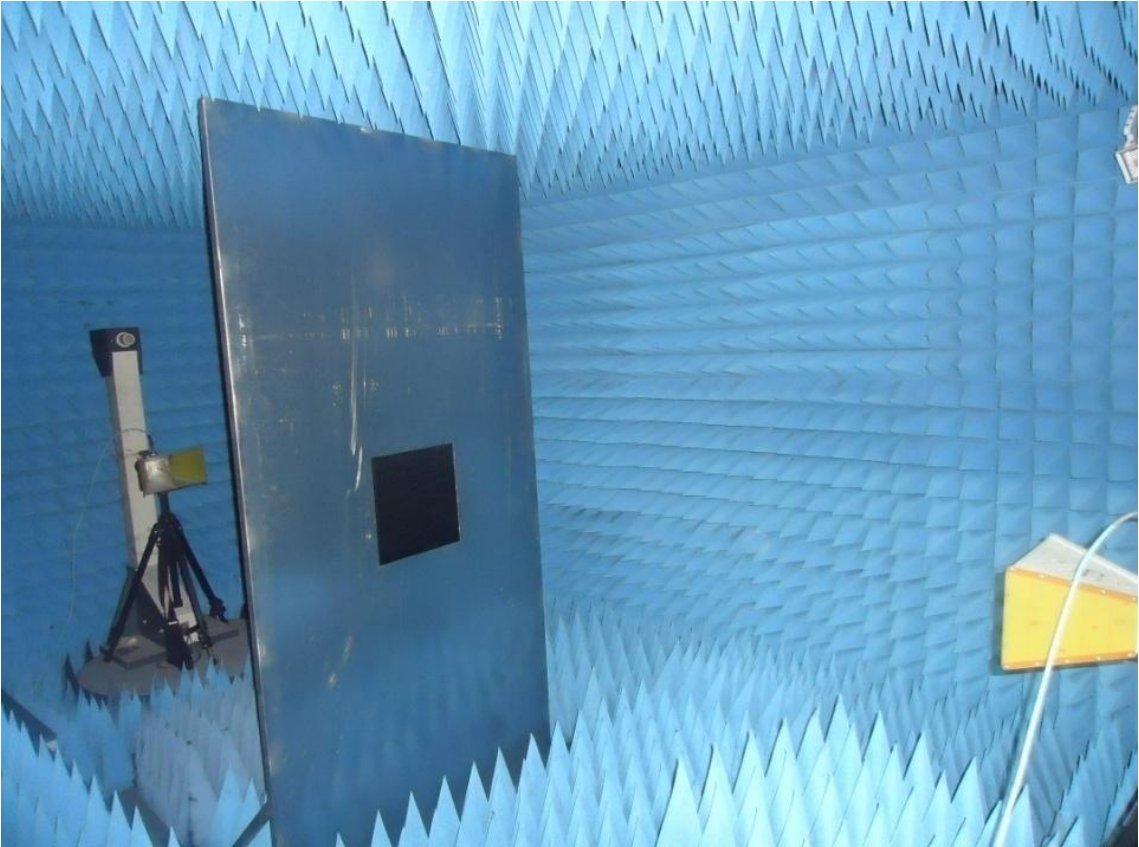


Figure II.8: Chambre anéchoïque.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Fang H., Mighri F., Aji A., Fluorescence quenching of phenanthrene and anthracene by maleic anhydride and n-octadecenylsuccinic anhydride in solution and in bulk polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 2007. 47(2): p. 192-199.
- [2] Amine M., et al., Fluorescence quenching of fluoranthene by maleic anhydride in solution and during nonreactive and reactive twin-screw extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 2013. 53(2): p. 295-300.
- [3] Song J., et al., Polyvinylidene fluoride/poly(ethylene terephthalate) conductive composites for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates: Crystallization, structure, and through-plane electrical resistivity. *Polymer Engineering & Science*, 2012. 52(12): p. 2552-2558.
- [4] Souissi M. A., Développement et caractérisation de matériaux électriquement conducteurs à base de mélanges polymères pour plaques bipolaires de piles à combustible de type pemfc, in *Génie chimique*. 2011, Laval p. 82.
- [5] Bonnard N., Miraval S., Roos F., O. Schneider. Fiche toxicologique: Noir de carbone. 2007, INRS.
- [6] McCunney R. J., et al., Carbon Black, in *Patty's Toxicology*. 2001, John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Antoine L., Nanocomposite conducteur polymère / nanofils métalliques: élaboration et analyse des propriétés physiques. Thèse de doctorat, université de Toulouse III. 2010; p10.
- [8] De Nobel R.W., Schurman D.G., Lindstast J., Koenig H.A., Payout coil impregnated with conductive adhesive. US patent n°3613619, (1971).
- [10] <http://www.goodfellow.com/E/Polystyrene.html>
- [9] Mahiout S., Mettre en valeur ou bannir le polystyrène – Approche dans un cadre de développement durable. Université de Sherbrooke. 2014 ; p
- [11] <http://www.vitasheetgroup.com>

- [12] Wyart D., Polystyrène expansé ou PSE. Techniques de l'ingénieur. 2008, AM3341 V1, P 2.
- [13] Roos F. et al, Toxicité de PUF de noirs de carbone. In : Nanoparticules ou particules ultrafines. EDP Sciences; chap. 6.
- [14] Noir de carbone. Base de données CSST, sur le site www.reptox.csst.qc.ca
- [15] Fiches toxicologiques. Base de données, sur le site de l'INRS : www.inrs.fr/fichetox.
- [16] Toumi J., Développement de systèmes polymères fonctionnels et caractérisation de leur résistivité électrique. Thèse de doctorat. Université de Québec, 2014; p. 4.
- [17] Pécastaings G., Contribution à l'étude et à la modélisation de la mésostructure de composites polymères-noir de carbone. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1, 2005 p. 194.
- [18] Medalia A., Electrical Conduction in Carbon Black Composites. Rubber Chemistry and Technology, 1986. 59(3): p. 432-454.
- [19] Voet A., New Dispersible Carbon Blacks. Rubber Chemistry and Technology, 1964. 37(4): p. 1006-1012.
- [20] http://www.actutem.com/produits/analyseur_reseau.html.
- [21] Benhamou S. M, Guerrero A., Díaz-Morcillo A., Hamouni M., Ortíz A., Measurements and Analysis of Electromagnetic Shielding Properties of a Conductive Polymer Double Shield. Cartagena, 2016.
- [22] Meynard A., Paladian F., Girard S, Détermination expérimentale de l'efficacité de blindage de matériaux par différentes méthodes. Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, BP 10448, F-63000.

Chapitre III

Résultats et discussions

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, Nous analysons l'effet de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la polarisation sur l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexion interne-multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique en utilisant les modèles simplifiés rapportés dans le chapitre 1 ainsi que les résultats expérimentaux que nous avons obtenus. Ces modèles concernent deux domaines de fréquences de part et d'autre de la fréquence de coupure et donc deux type de matériaux; électriquement mince ($d_j \ll \delta_j$ ou $f \ll f_c$) ou électriquement épais ($d_j \gg \delta_j$ ou $f \gg f_c$). Du fait que la fréquence de coupure de notre échantillon, calculée en utilisant la relation (I.40), est de l'ordre de $f_c = 23$ GHz, nous limitons notre étude qu'à des fréquences inférieures à cette valeur. La conductivité électrique, la perméabilité relative, la fréquence de coupure et l'épaisseur de (HIPS/NC) sont données dans le tableau III.1.

Conductivité ($S.m^{-1}$)	Perméabilité relative	Fréquence de coupure (GHz)	Epaisseur (mm)
1,2	1	23,4	3

Tableau III.1: Conductivité électrique, perméabilité relative, fréquence de coupure et épaisseur de (HIPS/NC)

1. Atténuation par réflexion

Nous examinons l'atténuation par réflexion en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence pour les deux types de polarisation; électrique et magnétique.

1.1. Effet de la fréquence

Les propriétés de réflexion d'une plaque de (HIPS/NC) ont été mesurées, en utilisant le guide d'ondes rectangulaire, dans une gamme de fréquences allant de 2 GHz jusqu'à 3 GHz. Les résultats de ces mesures ainsi que celles obtenus par modélisation sont présentés sur la figure III.1. Etant donné que nous avons $\pm 0,5$ dB d'incertitudes de mesure induites par la procédure d'étalonnage et de calibration, nous observons un bon accord entre les valeurs théoriques, tracés en utilisant l'expression (I.45), et les valeurs expérimentales. Nous constatons que, dans cette gamme de fréquences, la perte par réflexion est au alentour de 5 dB.

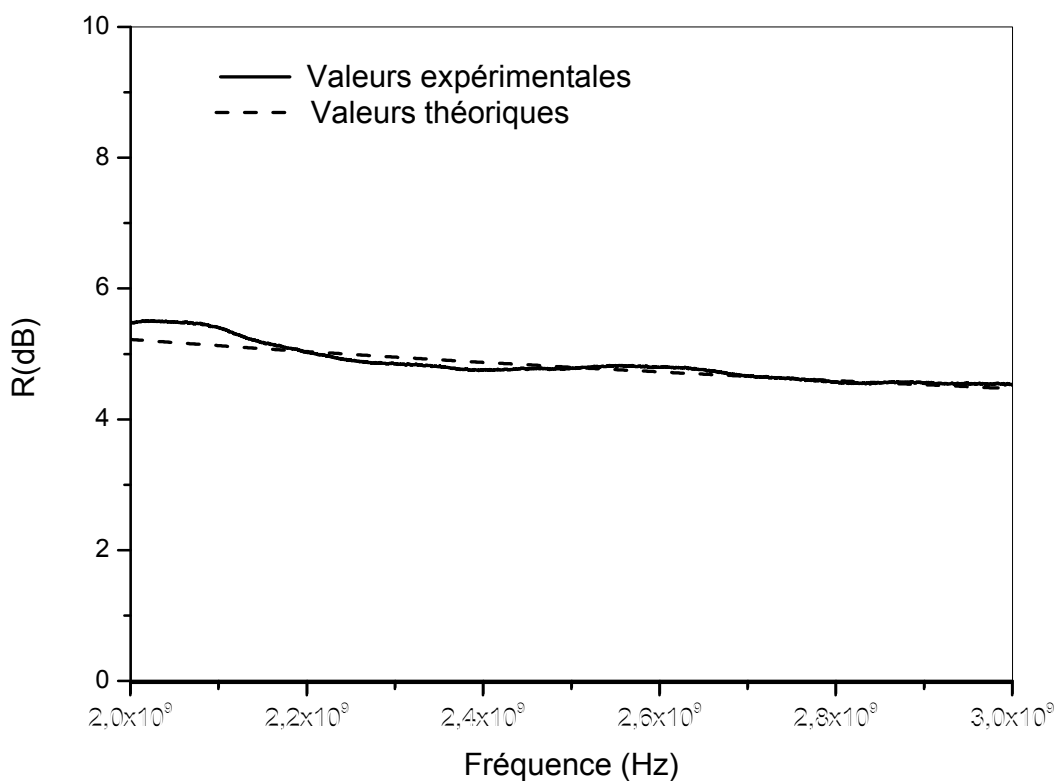


Figure III.1: Atténuation par réflexion de (HIPS/NC) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'ondes rectangulaire.

Dans le but de connaître l'allure de l'atténuation par réflexion dans une large gamme de fréquences, nous avons tracé sur la figure III.2, en utilisant la relation (I.45), l'atténuation par réflexion d'un blindage monocouche à base de (HIPS/NC). Nous observons que l'atténuation par réflexion est à $81,32 \text{ dB}$ à une fréquence de 10 Hz puis elle diminue considérablement jusqu'à la valeur de $0,95 \text{ dB}$ pour 10^{11} Hz . A basses fréquences, les ondes électromagnétiques sont fortement réfléchies à cause de la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde et l'écran du blindage. Mais avec l'augmentation de la fréquence, l'atténuation par réflexion diminue. Ceci est dû à la proportionnalité entre l'impédance intrinsèque du blindage et la fréquence. Lorsque la fréquence augmente, l'impédance augmente également, de ce fait l'atténuation par réflexion est plus importante à basses fréquences.

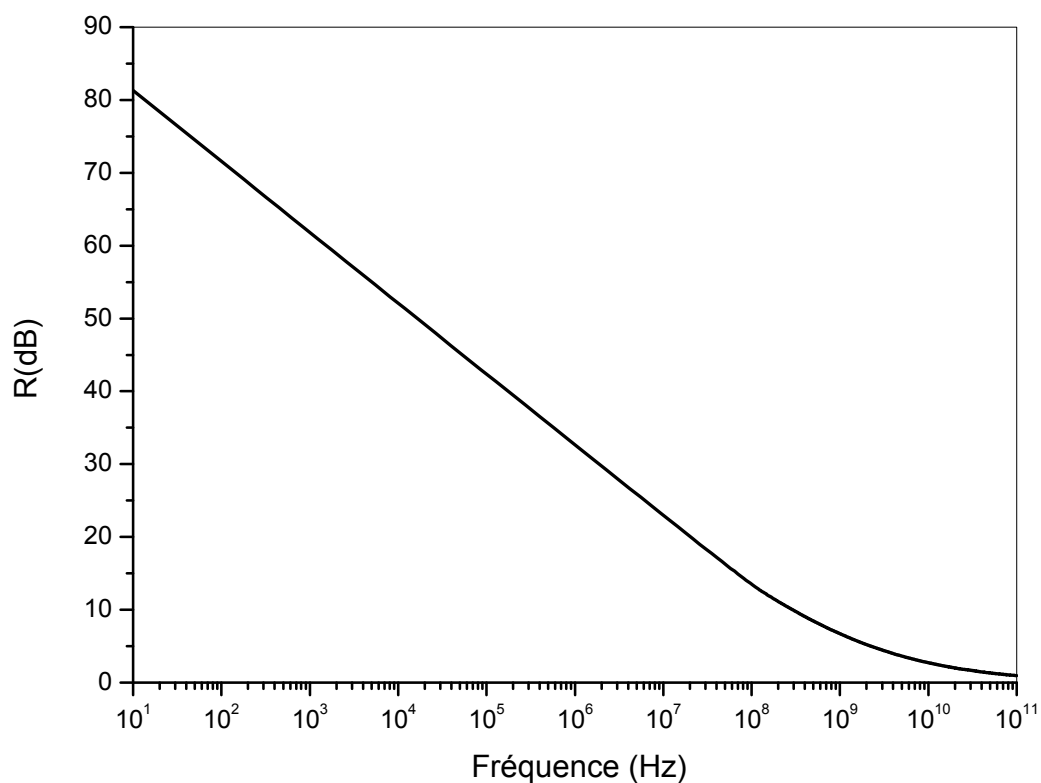


Figure III.2: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de la fréquence.

1.2. Effet de l'angle d'incidence

L'allure de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence et de la polarisation est illustrée, en utilisant l'expression (I.45), sur la figure III.3. Pour des valeurs de 0° à 30° , l'atténuation par réflexion est indépendante de l'angle d'incidences. Au dessus de ces valeurs, l'atténuation par réflexion augmente pour une polarisation transversale électrique et diminue pour une polarisation transversale magnétique. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de l'impédance du milieu de propagation de l'onde, dans le cas de la polarisation transversale électrique, avec l'accroissement de l'angle d'incidence.

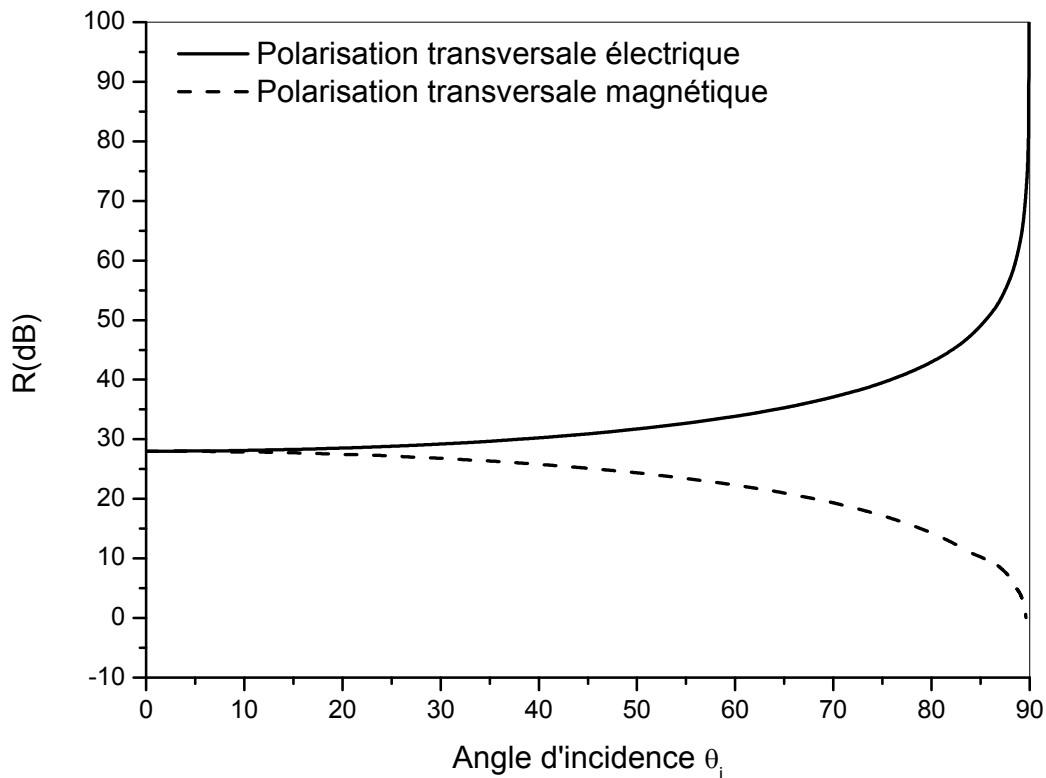


Figure III.3: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 5 GHz.

2. Perte par absorption

Nous étudions l'effet de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la polarisation sur la perte par absorption.

2.1. Effet de la fréquence

Les résultats théoriques, obtenus en utilisant la relation (I.47), et expérimentaux, acquis par le guide d'ondes rectangulaire, de la perte par absorption en fonction de la fréquence dans une gamme de 2 GHz à 3 GHz sont illustrés dans la figure III.4. Nous remarquons que la perte par absorption est d'environ 3 dB. Quoiqu'il existe une différence de $\pm 0,5$ dB due aux incertitudes de mesures, les valeurs théoriques sont en bon accord avec les valeurs expérimentales.

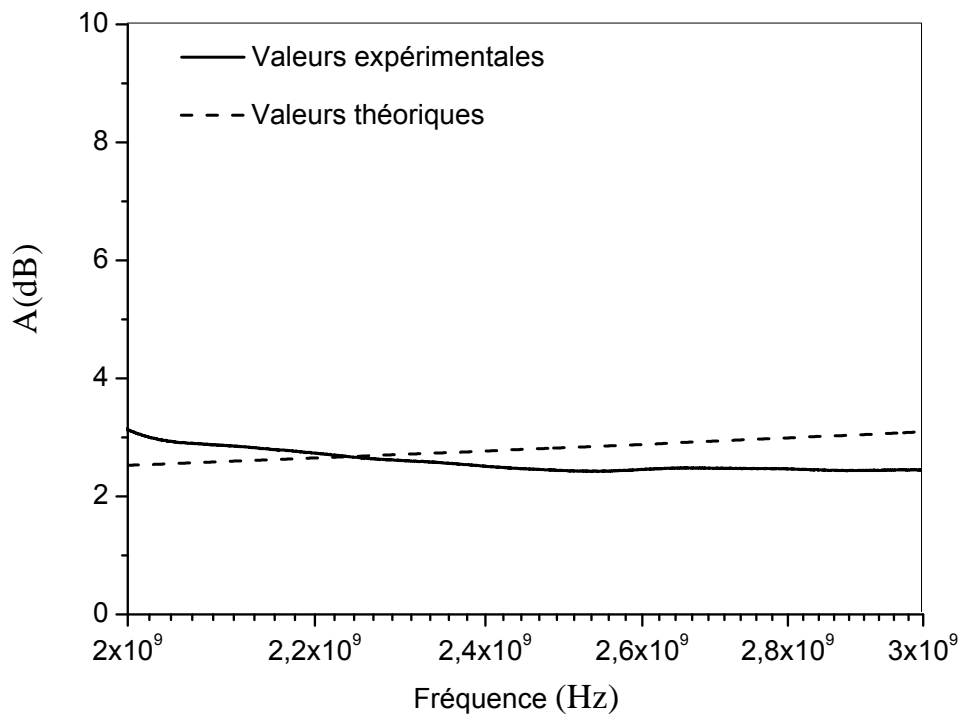


Figure III.4: Perte par absorption de (HIPS/NC) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'onde rectangulaire.

Afin d'élargir le domaine de variation de la fréquence, la perte par absorption d'une couche de (HIPS/NC) est représentée, en utilisant l'expression (I.47), sur la figure III.5 en fonction de la fréquence. Nous remarquons que la perte par absorption augmente exponentiellement avec la fréquence. Elle varie de $0,17 \text{ dB}$ à $17,87 \text{ dB}$ pour un domaine de fréquence de 10 Hz à 10^{11} Hz . A faible fréquences, la perte par absorption est considérée négligeable devant l'atténuation par réflexion et l'atténuation par réflexion internes multiples. Cependant pour des fréquences élevées ($f \gg f_c$) elle devient dominante.

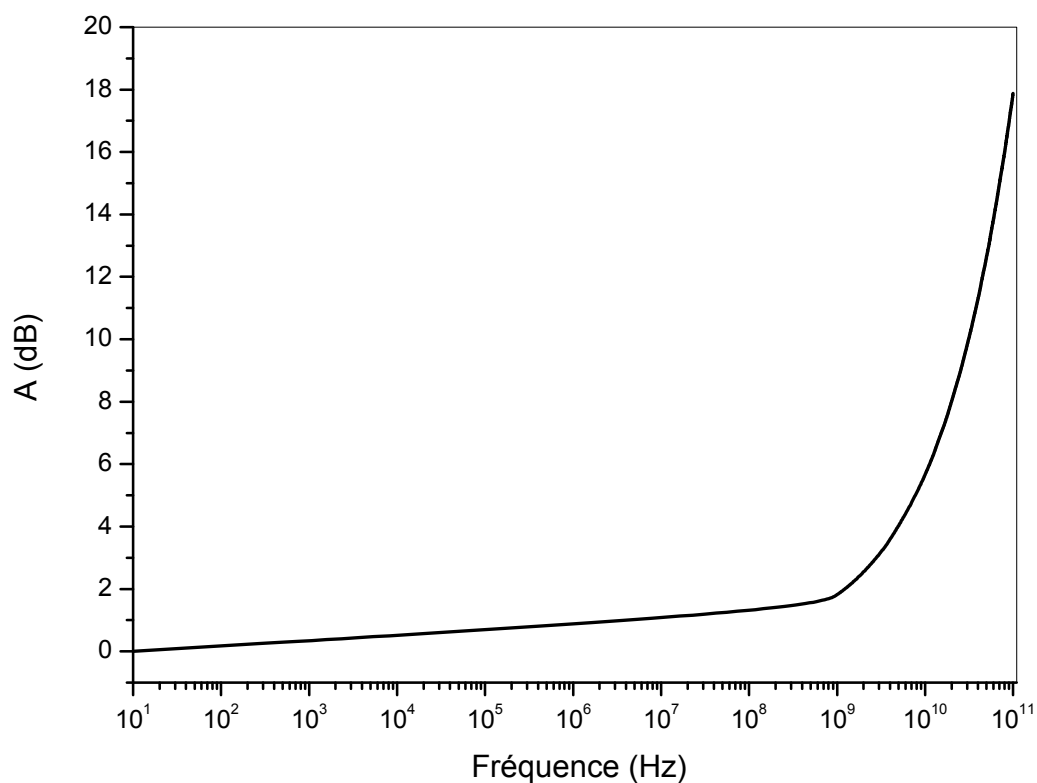


Figure III.5: Variation de la perte par absorption en fonction de la fréquence.

2.2. Effet de l'angle d'incidence

Sur la figure III.6, nous avons tracé la perte par absorption d'une couche de (HIPS/NC) en fonction de l'angle d'incidence pour une polarisation électrique et une polarisation magnétique en utilisant l'équation (I.47).

L'allure de cette courbe montre que l'angle d'incidence ne fournit aucun effet sur la perte par absorption, car la variation de l'angle d'incidence influe sur l'impédance du milieu de propagation de l'onde électromagnétique, et la perte par absorption est indépendante de cette impédance.

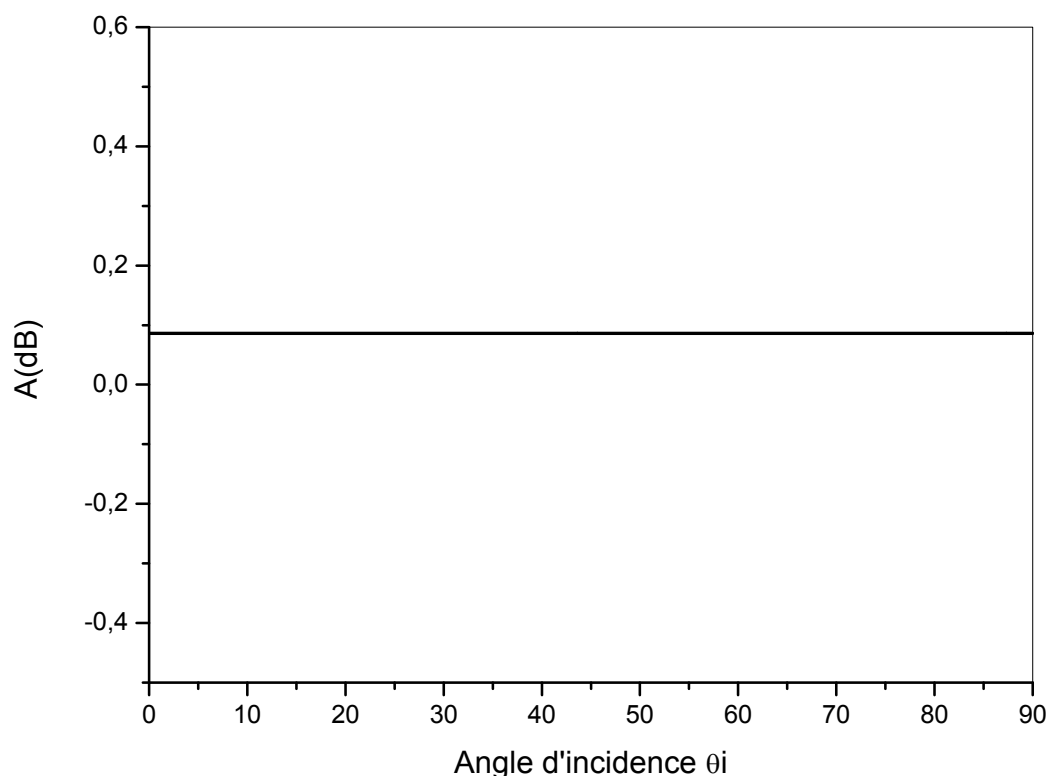


Figure III.6: Variation de la perte par absorption en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 5 GHz.

3. Atténuation par réflexion interne-multiples

Dans ce paragraphe, l'atténuation par réflexion interne-multiples est analysée en fonction de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence.

3.1. Effet de la fréquence

L'évolution de l'atténuation par réflexion interne-multiples en fonction de la fréquence est représentée dans la figure III.7 en utilisant la relation (I.46). Les réflexions interne-multiples sont produites si l'épaisseur de blindage est plus petite que l'épaisseur de peau (matériau électriquement mince $d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$). Lorsqu'on s'approche de la fréquence de coupure, l'atténuation par réflexion interne-multiples devient négligeable puis s'annule à une fréquence $f_c = 23.4 \text{ GHz}$. Nous remarquons que l'atténuation par réflexion interne-multiples prend des valeurs négatives, ce qui réduit l'efficacité du blindage électromagnétique.

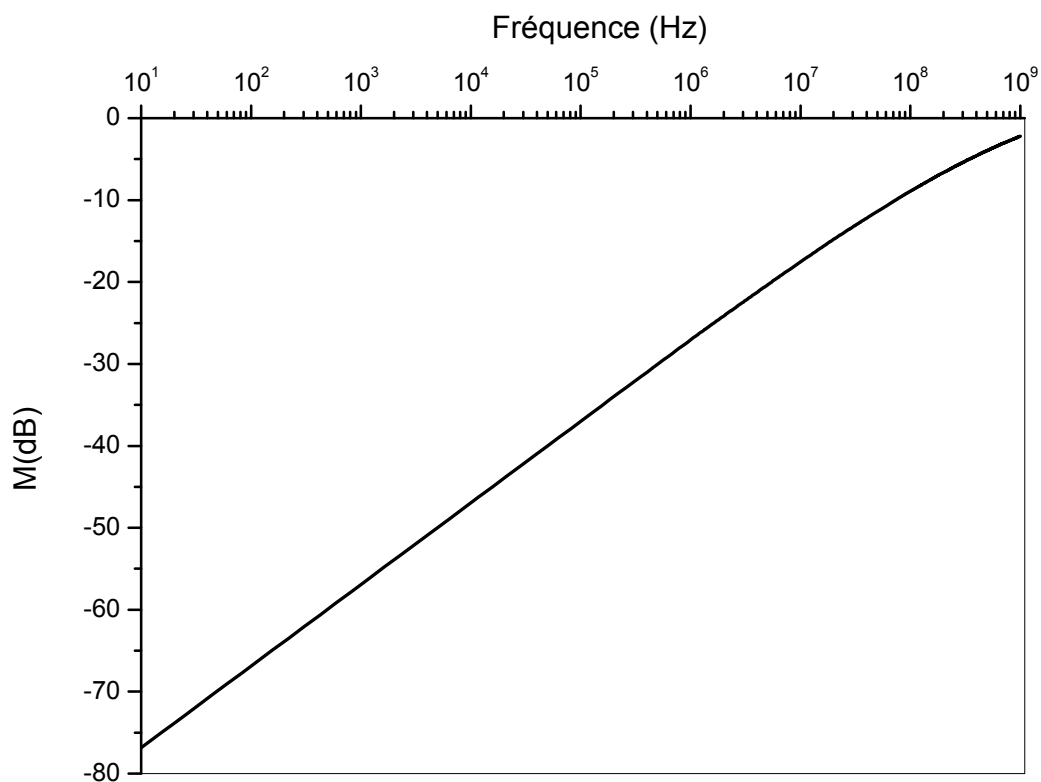


Figure III.7: Variation de l'atténuation par réflexion interne-multiple en fonction de la fréquence.

3.2. Effet de l'angle d'incidence

Pour connaître l'effet de l'angle d'incidence et de la polarisation sur les réflexions interne-multiples, nous avons illustré sur la figure III.8 l'atténuation par réflexion interne-multiples d'une couche de (HIPS/NC) en utilisant l'expression (I.46). L'allure de cette courbe montre une croissance de l'atténuation par réflexion interne-multiple en cas de la polarisation transversale électrique et une diminution pour la polarisation transversale magnétique.

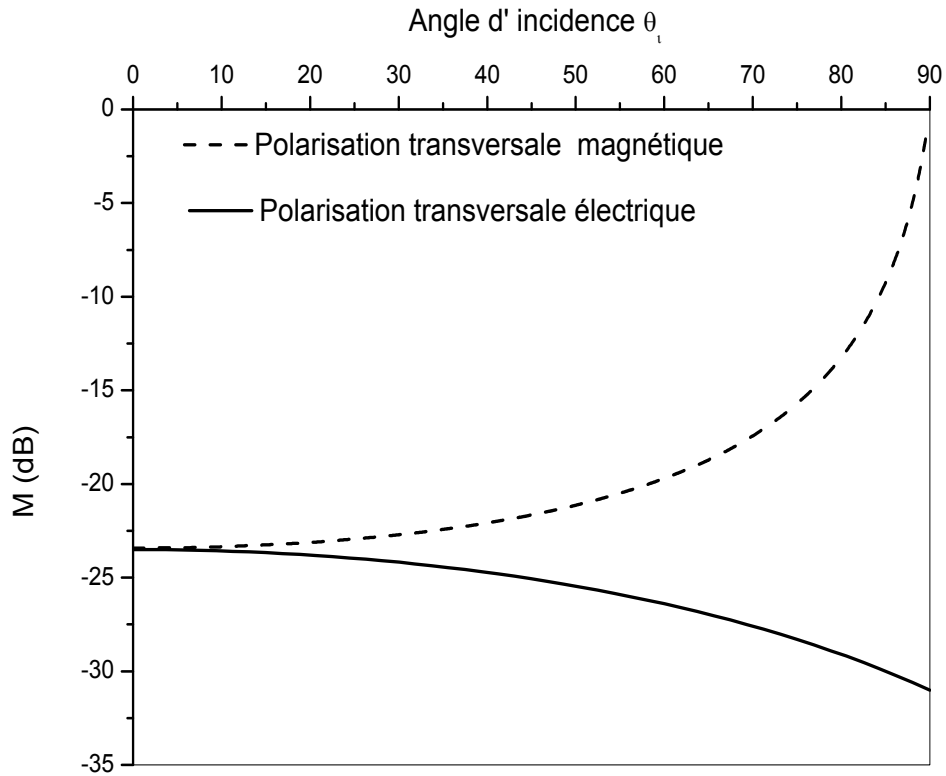


Figure III.8: Variation de l'atténuation par réflexion interne- multiple en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 5 GHz.

4. Efficacité du blindage électromagnétique

L'efficacité du blindage évolue selon deux expressions différentes et cela d'après le type de matériau; électriquement mince ou électriquement épais. Dans notre étude nous analysons les effets de la fréquence et de l'angle d'incidence pour un matériau électriquement mince.

4.1. Effet de la fréquence

La figure III.9 montre la variation de l'efficacité du blindage d'une plaque (HIPS/NC), en utilisant la chambre anéchoïque dans la gamme de 10 MHz à 26,5 GHz. Nous constatons que l'efficacité du blindage est d'environ 4,5 dB pour les faibles fréquences. Certaines oscillations sont observées en raison de l'existence de résonances internes du champ électrique. Les minima que SE expose à ces résonances ont été clairement amorties pour améliorer le SE à ces fréquences. Ces données montrent que l'efficacité du blindage est indépendante de la fréquence jusqu'à une certaine fréquence limite, après laquelle augmente

avec l'augmentation de la fréquence. La capacité de blindage de (HIPS /NC) était de 4,5 dB en 10 MHz et de 12 dB en 23 GHz. Les résultats théoriques sont également tracés dans la figure III.9, en utilisant la relation (I.48). À basse fréquence, la courbe théorique coïncide avec la courbe de mesure. À des fréquences plus élevées, bien qu'il existe une légère différence entre les deux courbes, un bon accord est obtenu entre la SE mesurée et calculée.

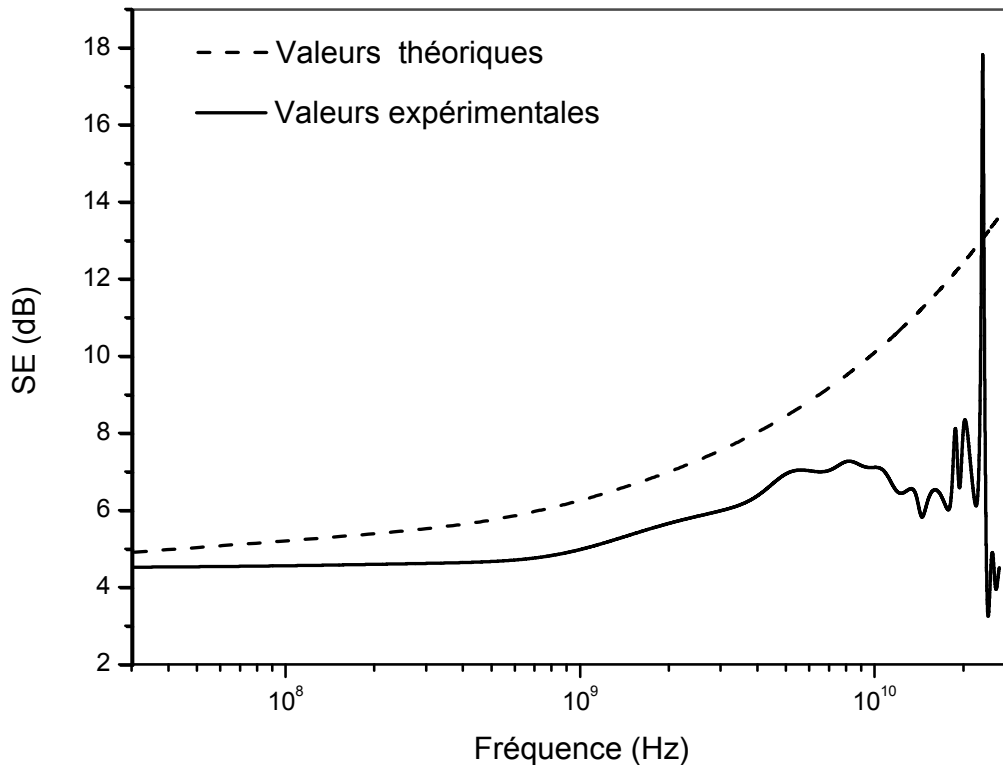


Figure III.9: Efficacité du blindage de (HIPS/NC) en fonction de la fréquence.

4.2. Effet de l'angle d'incidence

La figure III.10 décrit la variation de l'efficacité du blindage d'une couche de (HIPS/NC) en fonction de l'angle d'incidence, tracée en utilisant la relation (I.48). Nous observons qu'à des faibles angles allant de 0° jusqu'à 30° , l'efficacité du blindage est pratiquement indépendante de l'angle d'incidence, au-delà de ces valeurs, elle subit une augmentation pour une polarisation transversale électrique et une diminution pour une polarisation transversale magnétique.

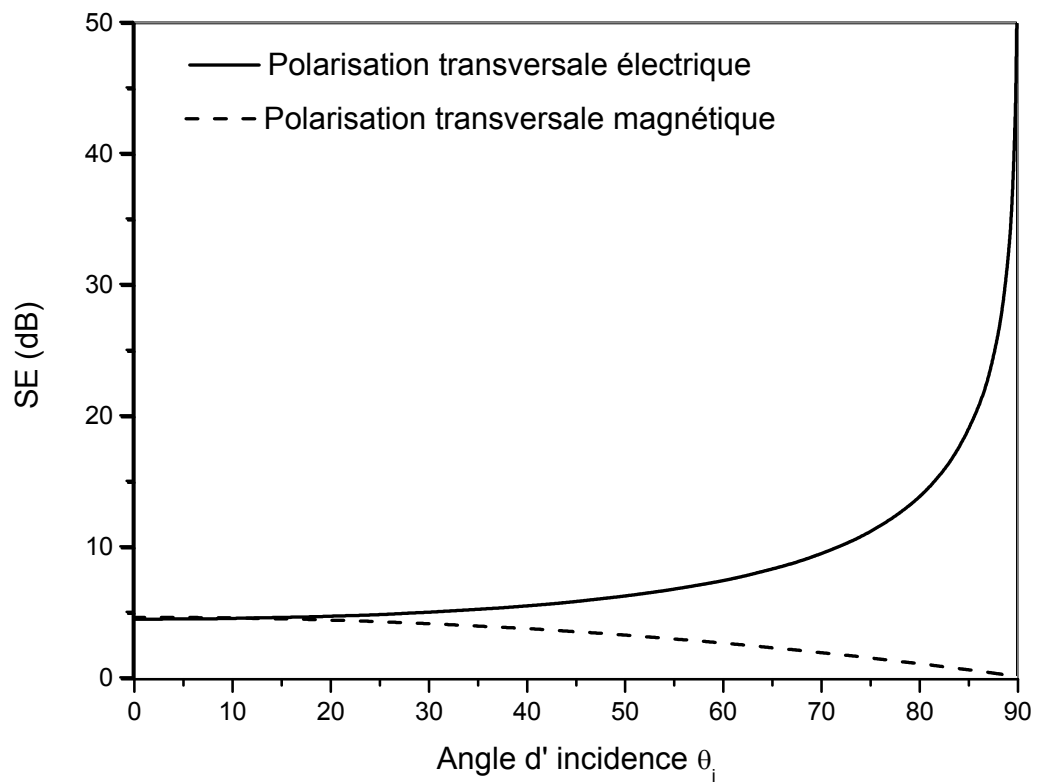


Figure III.10: Variation de l'efficacité du blindage en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 5 GHz.

***CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES***

Le travail présenté dans ce mémoire s'est focalisé sur la mesure et l'étude des propriétés du blindage électromagnétique d'un polymère conducteur composite constitué de polystyrène choc (HIPS) associé à des charges de noir de carbone.

La problématique traitée s'articule autour des effets de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la polarisation d'une onde électromagnétique sur l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexion interne multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique. Nous avons commencé notre mémoire par une introduction générale dans laquelle nous avons posé le problème étudié. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des concepts généraux sur les polymères conducteurs ainsi que des notions sur le blindage électromagnétique. Dans le second chapitre, nous avons défini le polymère conducteur étudié et les méthodes expérimentales que nous avons utilisées pour mesurer les propriétés du blindage électromagnétique. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

L'étude théorique des propriétés du blindage électromagnétique est effectuée en utilisant la théorie de la ligne de transmission sous la forme matricielle simplifiée. Les mesures expérimentales de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage d'une couche de (HIPS/NC) sont effectuées en utilisant le guide d'onde rectangulaire WR-340 associé à l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) ZVA67 dans une gamme de fréquence allant de 2 GHz jusqu'à 3 GHz. En suite, et dans le but d'élargir le domaine de fréquence, nous avons mesuré l'efficacité du blindage en utilisant la chambre anéchoïque entre 10 MHz et 26,5 GHz. Le (HIPS/NC) exhibe une efficacité du blindage électromagnétique de 4,5 dB en 10 MHz et de 12 dB en 23 GHz. Par ailleurs, nous avons obtenu un bon accord entre les valeurs théoriques et expérimentales avec une très légère différence de $\pm 0,5$ dB dû aux incertitudes de mesures.

En fonction de la fréquence, nous avons constaté que l'atténuation par réflexion est dominante à faibles fréquences alors que la perte par absorption devient dominante à des fréquences élevées. Pour l'atténuation par réflexion interne multiples, elle tend à se négliger en s'approchant de la fréquence de coupure. Au dessus de cette fréquence, l'efficacité du blindage est pratiquement indépendante de la fréquence mais à des fréquences supérieures, elle devient importante car la pénétration de l'onde électromagnétique est superficielle.

En fonction de l'angle d'incidence, nous avons remarqué une indépendance de l'atténuation par réflexion avec l'angle d'incidence à partir d'une incidence normale (0°) jusqu'à (30°). Au delà de cet angle, une augmentation de l'atténuation par réflexion est

observée pour la polarisation transversale électrique et une diminution pour la polarisation transversale magnétique. Cependant, la perte par absorption est autonome de la polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique. L'efficacité du blindage possède le même comportement que l'atténuation par réflexion, i.e, elle est indépendante de l'angle d'incidence entre les valeurs allant de (0°) à (30°); au delà de cette valeur, elle accroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence pour une polarisation transversale électrique et décroît pour polarisation transversale magnétique.

A la lumière de ce travail entrepris, nous pouvons conclure principalement que les polymères conducteurs sont des forts candidats en blindage électromagnétique. Concernant le (HIPS/NC), il exhibe des propriétés de blindage électromagnétique assez médiocre, il serait intéressant, alors, pour la suite de ce travail, d'améliorer ces propriétés par son association à autre un matériau utilisé en blindage électromagnétique.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو قياس وتحليل فعالية الدرع الكهرومغناطيسي المكون من البوليسترين الناقل مرتبط بالكربون الأسود. درسنا تأثير التردد، زاوية السقوط واستقطاب الموجات الكهرومغناطيسية على التقليل الناتج عن الإنعكاس، التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، الضياع الناتج عن الإمتصاص وفعالية الدرع. تم تنفيذ الدراسة النظرية لخصائص الدرع الكهرومغناطيسي باستخدام نظرية خط الإنتقال تحت شكل مصفوفة مبسطة. أما القياسات التجريبية تم تنفيذها باستخدام الدليل الموجي المستطيل المرتبط بمحلل شبكة ناقلات في نطاق الترددات من 2 إلى 3 جيجا هرتز. ومن أجل توسيع مجال التردد، قمنا بقياس فعالية الدرع باستخدام غرفة كاتمة للصدى من 10 ميجا هرتز إلى 26.5 جيجا هرتز. بتغيير فعالية الدرع الكهرومغناطيسي في هذا المجال من 4,5 إلى 12 ديسيبل. هذه الدراسة أظهرت توافق جيد بين القيم النظرية والتجريبية مع اختلاف طفيف جدا من ± 0.5 ديسيبل بسبب الارتبايات في القياس.

الكلمات المفتاحية: الدرع الكهرومغناطيسي، بوليمر موصل، التقليل الناتج عن الإنعكاس، التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، الضياع الناتج عن الإمتصاص.

Résumé

L'objectif de ce travail est de mesurer et d'analyser l'efficacité du blindage électromagnétique à base de polystyrène conducteur à impact élevé associé à des charges de noir de carbone (HIPS/NC). Nous avons étudié l'effet de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde électromagnétique sur l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexion internes multiples et l'efficacité du blindage. L'étude théorique des propriétés du blindage électromagnétique est effectuée en utilisant la théorie de la ligne de transmission sous la forme matricielle simplifiée. Les mesures expérimentales sont effectuées en utilisant le guide d'onde rectangulaire associé à l'analyseur de réseau vectoriel dans une gamme de fréquence allant de 2 à 3 GHz. En suite, et dans le but d'élargir le domaine de fréquence, nous avons mesuré l'efficacité du blindage en utilisant la chambre anéchoïque entre 10 MHz et 26,5 GHz. Le (HIPS/NC) exhibe une efficacité du blindage électromagnétique de 4,5 dB en 10 MHz et de 12 dB en 23 GHz.. Par ailleurs, nous avons obtenu un bon accord entre les valeurs théoriques et expérimentales avec une très légère différence de $\pm 0,5$ dB dû aux incertitudes de mesures.

Mots clés: efficacité du blindage électromagnétique, polymères conducteurs, atténuation par réflexion, atténuation par réflexion interne multiples, perte par absorption.

Abstract

The aim of this work is to measure and analyze the electromagnetic shielding effectiveness made of high impact conductive polystyrene associated with carbon black loads (HIPS/NC). We studied the effect of frequency, of angle of incidence and polarization of electromagnetic wave on the reflection loss, the absorption loss, the multiple internal reflections and the shielding effectiveness. The theoretical study of the properties of electromagnetic shielding is carried out using the simplified matrix form of the transmission line theory. The experimental measurements are carried out using the rectangular waveguide associated with the vector network analyzer in a frequency range from 2 to 3 GHz. Then, and in order to broaden the frequency domain, we measured the shielding effectiveness by using the anechoic chamber between 10 MHz and 26.5 GHz. The (HIPS/NC) exhibits an shielding effectiveness of 4.5 dB in 10 MHz and 12 dB in 23 GHz. In addition, we obtained a good agreement between the theoretical and experimental values with a very slight difference of ± 0.5 dB due to measurement uncertainties.

Keywords: electromagnetic shielding effectiveness, conductive polymer, reflection loss, absorption loss, internal reflection.

