



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: Physique des polymères

Par:

BENDIMERAD FERIEL

Sur le thème

Caractéristiques de blindage électromagnétique d'une couche de 3, 4 ethylènedioxythphène associé à la Maghnite et au Sodium

Soutenu publiquement le 01/07/2019 à Tlemcen devant le jury composé de:

KHALDI Smaïn	Professeur	Université de Tlemcen	Président
HAMOUNI Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
BENHAMOU Sidi Mohamed	M.C.B	ESSAT de Tlemcen	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.

Mon travail de mémoire a été effectué sous la direction de Monsieur Sidi Mohammed Benhamou, Maître de conférences à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, que je tiens à remercier d'avoir suivi le déroulement de mes travaux avec patience, disponibilité et bonne humeur. Je le prie de croire à ma sincère gratitude.

Je suis également très honorée que Monsieur Smain Khaldi, Professeur à l'Université de Tlemcen a accepté de présider le jury de ce mémoire, tout en lui vouant mon immense respect.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Mohammed Hammouni, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner mon travail de mémoire, que cette personne sache qu'il a toute ma reconnaissance et mon profond respect.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à tous ceux qui m'ont permis d'avancer et d'aboutir ce modeste travail.

DEDICACES

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer l'amour, le respect, la reconnaissance envers ceux qu'on aime...

Je dédie ce travail à:

Mes chers parents, pour leur amour, leur soutien sans relâche, leur encouragement

Mes beaux-parents, pour leur encouragement et leur soutien

Ma sœur aimée, mes frères et ma belle-sœur pour leur soutien

Mon mari, pour son aide et son soutien indéfectible

Ma fille adorée

Mes amies et toute ma famille

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles.....	4
Figure I.2: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K.....	6
Figure I.3: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère.....	8
Figure I.4: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2)..	10
Figure I.5: Blindage électromagnétique extérieur et intérieur.....	11
Figure I.6: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source – écran de blindage.....	12
Figure I.7: Mécanisme du blindage électromagnétique.....	13
Figure I.8: Pénétration d'une onde électromagnétique à une incidence normale. Le signe (+) indique une propagation dans la direction des axes, tandis que le signe (-) dans le sens contraire	15
Figure II.1: La structure moléculaire du PEDOT.....	23
Figure II.2: La polymérisation du PEDOT	24
Figure II.3: Couche circulaire du 3,4-éthylènedioxythiophène - Maghnite – Sodium	27
Figure II.4: Analyseur de réseau vectoriel de ZVA67 de Rohde & Schwarz.....	28
Figure II.5: Kit de sonde diélectrique.....	29
Figure II.6: Schéma de cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.....	30
Figure II.7: Mesure du guide d'onde	31
Figure III.1: Les parties réelle et imaginaire de la permittivité du (PEDOT-Mg-Na ⁺).....	35
Figure III.2: Atténuation par réflexion de (PEDOT-Mg-Na ⁺) en fonction de la fréquence.....	37
Figure III.3: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de la fréquence.....	38
Figure III.4: Variation de l'atténuation par réflexion de (PEDOT-Mg-Na ⁺) en fonction de la fréquence pour différents valeurs d'angle d'incidence.....	39
Figure III.5: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 15 GHz	40
Figure III.6: Variation de l'atténuation par réflexion internes multiples en fonction de la fréquence	41
Figure III.7: Variation de l'atténuation par réflexion internes multiples en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 10 ³ Hz.....	42
Figure III.8: Perte par absorption de (PEDOT-Mg-Na ⁺) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'onde rectangulaire.....	43
Figure III.9: Variation de la perte par absorption d'une couche de (PEDOT-Mg-Na ⁺).....	44
Figure III.10: Efficacité du blindage électromagnétique de (PEDOT-Mg-Na ⁺) en fonction de	

la fréquence.....	45
Figure III.11: Variation de l'efficacité du blindage électromagnétique en fonction de la fréquence.....	46
Figure III.12: Variation de l'efficacité du blindage d'une couche de (PEDOT-Mg-Na ⁺) en fonction de la fréquence pour différents de valeurs d'angle d'incidence.....	47
Figure III.13: Variation de l'efficacité du blindage en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 15GHz.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Classification des CPC en fonction de leurs résistivités électriques et leurs domaines d'application.....	9
Tableau II.1: Composition chimique de la Maghnite.....	25
Tableau III.1: Conductivité électrique, perméabilité relative, fréquence de coupure et épaisseur de (PEDOT-Mg-Na ⁺).	36

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I: Concepts généraux	
Introduction.....	3
1. Généralités sur les polymères conducteurs.....	3
1.1 Polymères conducteurs intrinsèques (PCI).....	4
1.1.1 Le dopage.....	5
a- Dopage par voie chimique.....	5
b- Dopage par voie électrochimique.....	5
1.2 Polymères conducteurs extrinsèques ou polymères conducteurs composites....	7
1.3 Applications des polymères conducteurs.....	8
2. Notions sur le blindage électromagnétique.....	9
2.1. Quelques rappels sur les ondes électromagnétiques.....	9
2.2. Comptabilité électromagnétique.....	10
2.3. Définition du blindage électromagnétique.....	11
2.4. Champ proche et champ lointain.....	11
2.5. Mécanisme du blindage électromagnétique.....	12
2.5.1. Atténuation par réflexion.....	13
2.5.2. Perte par absorption.....	13
2.5.3. Atténuation par réflexion interne multiples.....	14
2.6. Efficacité du blindage électromagnétique.....	14
2.7. Détermination de l'efficacité du blindage monocouche en cas d'une incidence normale.....	14
2.8. Cas d'une incidence oblique.....	18
Références bibliographiques.....	19
Chapitre II: Matériaux étudiés et méthodologie expérimentales	
Introduction.....	22
1. Matériaux utilisés.....	22
1.1 Le 3,4 éthylènedioxythiophène (PEDOT).....	22
1.1.1 Synthèse et caractérisation du PEDOT.....	23
1.1.2 Conductivité du PEDOT.....	24
1.2 Maghnite.....	24
1.2.1 L'argile.....	24

1.2.2	Maghnite.....	25
1.3	Sodium.....	26
1.3.1	Propriétés chimiques.....	26
1.3.2	Propriétés physiques.....	26
1.4	Synthèse du 3,4 éthylènedioxythiophène associé à la Maghnite et au Sodium.....	26
2.	Méthodes de mesure des propriétés du blindage électromagnétique.....	27
2.1	Analyseur de réseau.....	27
2.2	Kit de sonde diélectrique.....	28
2.3	Guide d'onde rectangulaire.....	29
	Références bibliographiques.....	32
Chapitre III: Résultats et discussions		
	Introduction.....	35
1.	Permittivité du (PEDOT-Mg-Na ⁺).....	35
2.	Propriétés du blindage électromagnétique du (PEDOT-Mg-Na ⁺).....	36
2.1	Atténuation par réflexion.....	37
a-	Effet de la fréquence.....	37
b-	Effet de l'angle d'incidence.....	39
2.2	Atténuation par réflexions internes multiples.....	40
a-	Effet de la fréquence.....	40
b-	Effet de l'angle d'incidence.....	41
2.3	Perte par absorption.....	42
2.4	Efficacité du blindage électromagnétique.....	44
a-	Effet de la fréquence.....	44
b-	Effet de l'angle d'incidence.....	47
	Références bibliographiques.....	49
	CONCLUSION GENERALE.....	50

Introduction générale

Dans notre vie quotidienne, l'utilisation des appareils électriques commerciaux, militaires et scientifiques qui émettent des ondes électromagnétiques amplifie les problèmes d'interférence électromagnétique (EMI), engendrant des champs électromagnétiques dans tous les milieux résidentiels et professionnels. Pour éviter les dysfonctionnements de ces appareils et assurer un environnement électromagnétique satisfaisant aux radiocommunications, ces derniers sont protégés par un écran protecteur, nommé; blindage électromagnétique.

Le blindage électromagnétique était essentiellement réalisé de métaux classiques de bonne conductivité électrique, tels que le cuivre, l'aluminium et le nickel. Cependant, dans certaines applications à savoir; l'industrie aéronautique et automobile, le matériau utilisé en blindage doit être souple et léger. En raison de leur faible densité, la facilité de synthèse et le prix de revient réduit, les polymères conducteurs sont des forts candidats à remplacer les métaux classiques.

Dans notre travail, nous nous intéressons aux propriétés du blindage électromagnétique du 3, 4 éthylènedioxythphène associé à la Maghnite et au Sodium. A cet effet, nous rapportons les mesures qui ont été faites par Benhamou et ses collaborateurs, en utilisant le guide d'ondes rectangulaire et le kit de sonde diélectrique. Les auteurs ont mesuré l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique de ce polymère conducteur. Aussi, nous comparons ces résultats expérimentaux avec celles obtenus par l'utilisation de la théorie de la ligne de transmissions.

Le manuscrit que nous présentons est divisé en trois chapitres, déclinés comme suit:

Le premier chapitre rapporte des concepts généraux sur les polymères conducteurs et des notions sur le blindage électromagnétique. En effet, et après avoir rappelé des généralités sur les polymères conducteurs, à l'instar de leurs familles, le dopage, le phénomène de percolation ainsi que leurs importantes applications, nous redémontrons, avec détail, le calcul de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexion internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique à l'aide de la théorie de la ligne de transmission.

Le deuxième chapitre est une présentation du polymère conducteur utilisé, il s'agit de 3, 4 éthylènedioxythphène (PEDOT) associé à la Maghnite et au Sodium, ainsi que les méthodes expérimentales de mesure des propriétés du blindage électromagnétique et de la permittivité diélectrique complexe utilisées, à savoir, le guide d'onde rectangulaire et kit de sonde diélectrique.

Le troisième chapitre dévoile les résultats obtenus et les discussions menées. Nous analysons l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexion internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique d'une couche de 3,4 éthylènedioxythphène (PEDOT) associée à la Maghnite et au Sodium, en particulier, en fonction de l'angle d'incidence pour les deux types de polarisation; électrique et magnétique et en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique. Par ailleurs, les résultats expérimentaux seront comparés avec ceux obtenus à l'aide de la théorie de la ligne de transmission.

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

Chapitre I
Concepts généraux

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la découverte d'excellentes propriétés de conductivité chez les polymères a donné une nouvelle voie au domaine des polymères; connus depuis longtemps pour être de bons isolants électriques. En effet, cette découverte a permis le développement d'une nouvelle classe de matériaux: les polymères conducteurs ou encore les métaux synthétiques [1]. Les polymères conducteurs présentent plusieurs avantages par rapport aux matériaux inorganiques traditionnels utilisés comme conducteurs. Nous citons, entre autres, la transformation de polymères conducteurs en composants électriques et électroniques, par moulage et autres techniques classiques employées pour les plastiques, et faciles à mettre en œuvre par rapport aux procédés métallurgiques utilisés pour les matériaux conducteurs inorganiques. Aussi, la légèreté des matériaux polymères faciliterait leur utilisation et diminuerait leurs coûts. Les polymères conducteurs sont largement utilisés depuis plusieurs années dans certains domaines précis: revêtements antistatiques, condensateurs et, comme application qui fait l'objet de ce travail, le blindage électromagnétique [2].

La théorie de la ligne de transmission 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 redémontrons aussi, en utilisant la théorie de la ligne de transmission, le calcul de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexions internes multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique d'une monocouche.

1. Généralités sur les polymères conducteurs

Les matières plastiques, à la différence des métaux, sont réputées ne pas conduire le courant électrique. De ce fait, elles sont utilisées comme isolants électriques. Vers la fin des années 1970, A.J. Heeger, A.G. MacDiarmid et H. Shirakawa, lauréats du prix Nobel de chimie de l'année 2000, ont montré qu'après certaines modifications, un plastique peut devenir conducteur de l'électricité: passage de l'état isolant à l'état conducteur, c'est-à-dire «métal synthétique». Pour ce faire, le polymère doit être conjugué: la chaîne principale du polymère doit comporter alternativement des liaisons simples et doubles. La conductivité est obtenue après un dopage [3, 4]. Par la suite, des travaux de recherche sur l'évolution des polymères conducteurs ont été amorcés par la découverte en 1977 du polyacétylène (PA) par le professeur Shirakawa et al.. Il s'agit d'un polymère organique conjugué synthétisé, le polyacétylène peut

être rendu conducteur après exposition à des vapeurs de brome ou d'iode [5], il montrait alors une conductivité de l'ordre de 10^5 S/m , presque équivalente à celle des métaux [6]. Il existe deux classes de polymères conducteurs:

- Les polymères conducteurs intrinsèques (PCI)
- Les polymères conducteurs extrinsèques (CPC)

1.1. Polymères conducteurs intrinsèques (PCI)

Les (PCI) sont des polymères conjugués dont la synthèse est réalisée en reliant les molécules de monomères entre elles par des liaisons chimiques covalentes [4]. Leurs structures sont conjuguées, grâce à l'alternance de liaisons simples et de doubles [1], les liaisons simples contiennent une forte liaison chimique (type σ), les liaisons doubles contiennent en plus, une liaison moins forte (type π), ceci est présenté sur la figure (I.1). Ces polymères deviennent conducteurs grâce à la mobilité facile des électrons à l'intérieur et entre les chaînes des polymères [7, 8]. La conductivité de ces polymères augmente par l'introduction contrôlée de molécules donneuses ou acceptuses d'électrons (c'est le phénomène de dopage) faisant alors passer le polymère de l'état isolant à celui de conducteur [9, 10].

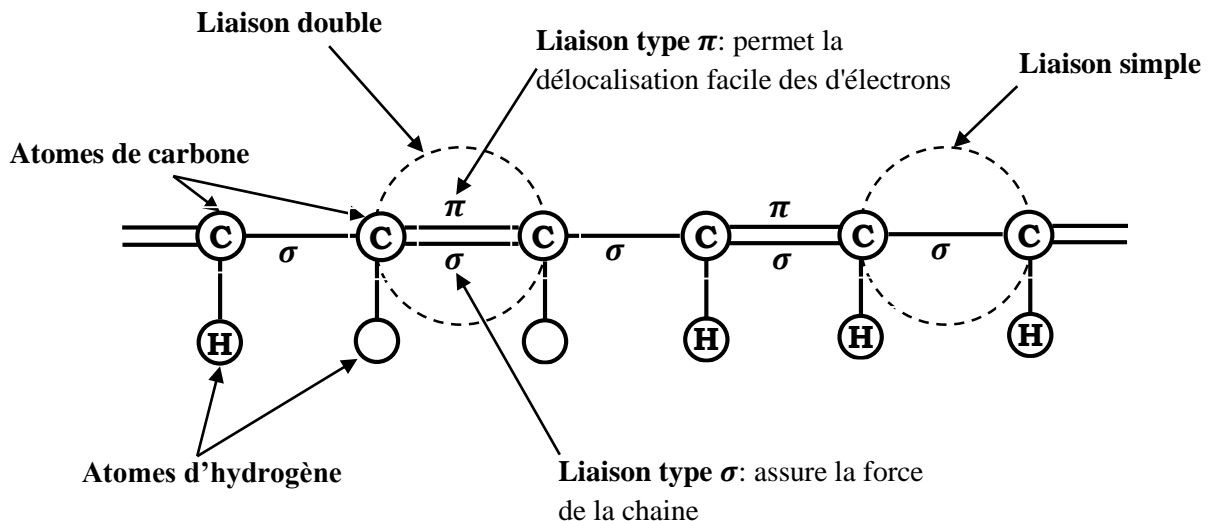


Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles [8].

1.1.1. Le dopage

Dans leur état neutre, les polymères conjugués sont non conducteurs et leur conductivité est de l'ordre de $10^{-12} S/m$ à $10^{-7} S/m$. Par contre, leur conductivité augmente de plusieurs ordres de grandeur lorsque l'on oxyde ou que l'on réduit la matrice; ces matériaux deviennent, donc, de bons conducteurs électriques lorsqu'ils subissent un changement de leur état d'oxydation. Cette opération est souvent appelée par abus de langage et par analogie aux semi-conducteurs inorganiques, "dopage" [11, 12]. Le dopage permet d'accentuer très fortement la délocalisation des charges électroniques, la structure électronique, ainsi constituée, permet le déplacement par sauts des charges le long de la chaîne carbonée et le polymère devient conducteur. La conductivité de PCI dopés dépend de la longueur de la chaîne conjuguée, du type de dopage et du taux de dopage, la conductivité de certaine PCI peut donc être comparable à celle des métaux, Parmi tous les PCI, la conductivité maximale rapportée à ce jour est de l'ordre de $10^7 S/m$, ce qui est comparable à celle du cuivre ($5,7 \cdot 10^7 S/m$), comme illustré sur la figure (I.2). Ce record a été atteint avec du Polyacétylène (PA) par N. Theophilou et al. en 1987. Malgré sa forte conductivité, le (PA) n'est pas un bon candidat pour concurrencer les métaux, car il est très instable à l'air. Lors du dopage, le dopant (contre ion de l'électrolyte) vient se greffer le long de la chaîne en provoquant une déformation. L'ionisation de la chaîne et sa déformation associée dans le réseau forme ce que l'on appelle un polaron localisé sur plusieurs monomères de la chaîne. La conductivité du polymère est directement liée au nombre de polarons qui augmente simultanément avec le dopage. A partir de taux de dopage, les polarons interagissent entre-eux pour former des bipolarons, c'est à dire une paire de polarons [13].

Le dopage s'effectue par deux voies; chimique ou électrochimique.

a- Dopage par voie chimique

Via l'interaction des chaînes de polymères avec des molécules ou des atomes donneurs (ou accepteurs) [1], le dopage par voie chimique se fait, en général, par réaction d'oxydation (type p) ou de réduction (type n) [4]. D'un côté, il est efficace mais difficile à contrôler et de l'autre côté le taux du dopage est généralement de l'ordre de 10 % à 30 % [15].

b- Dopage par voie électrochimique

Dans cette voie, le polymère et le dopant sont placés sur deux électrodes métalliques et plongés dans une solution électrolytique. L'application d'une tension entre ces deux électrodes

provoque un mouvement des ions de la solution et des électrons qui se fixent sur le polymère traité, ou s'en échappent [7], le taux de dopage est contrôlé par cette différence de potentiel ainsi que le temps de la réaction à l'équilibre électrochimique [1].

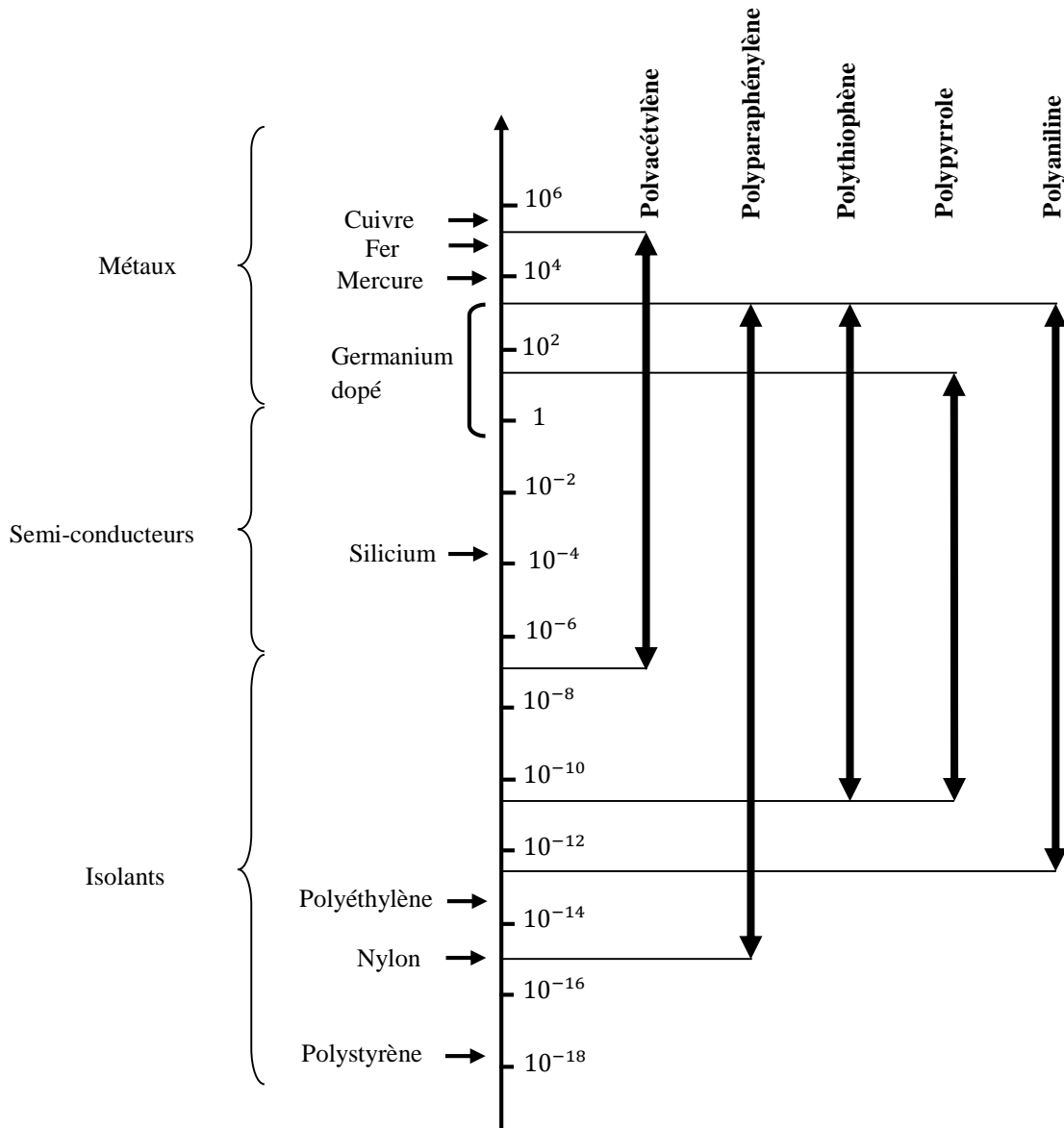


Figure I.2: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K [14].

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

Les polymères conducteurs extrinsèques ou encore appelés polymères conducteurs composites (CPC). Ils sont composés d'une matrice constituée d'un polymère isolant dans laquelle est dispersée une poudre conductrice constituée soit de particules métalliques (comme le cuivre et l'aluminium) [16, 17], soit de polymères conducteurs intrinsèques (PCI) [18, 19], soit de carbone [20, 21], afin d'augmenter la conductivité électrique. Cette dernière est liée à un phénomène physique que l'on appelle percolation qui dépend de la fraction volumique des inclusions conductrices. Lorsque l'on mélange un composé conducteur avec une matrice isolante, on observe, à un moment donné, une augmentation très rapide de la conductivité puis une saturation avec l'augmentation de la proportion du composé conducteur [4]. Ce point est noté comme étant le seuil de percolation qui se définit, mathématiquement, comme le point d'inflexion de la courbe représentant la conductivité en fonction du taux du composé conducteur [22]. Ceci est décrit par la figure(I.3).

- **Phénomène de percolation**

- Au-dessous de la fraction volumique critique (seuil de percolation $\phi < \phi_c$) les inclusions conductrices sont suffisamment éloignées les unes par rapport aux autres, et la conductivité du composite est dominée par celle de la matrice de polymère.

- Au niveau d'une certaine fraction volumique critique ϕ_c dite seuil de percolation, qui correspond à la formation du 1^{er} chemin conducteur au sein du polymère composite, le matériau devient conducteur, nous assistons alors à une transition de l'état isolant à l'état conducteur.

- Au-dessus du seuil de percolation, le nombre de chemins conducteurs augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et la conductivité électrique est dominée par les particules conductrices.

- Au-delà d'une fraction volumique de saturation ϕ_s , le nombre maximal des chemins conducteurs est atteint et la conductivité électrique du composite reste presque constante [23].

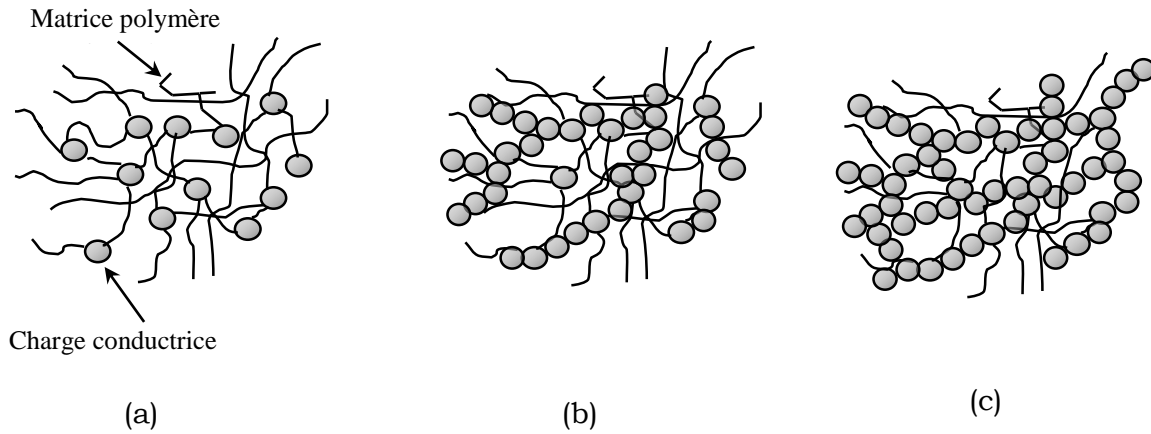


Figure I.3: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère: (a) $\phi < \phi_c$, (b) $\phi \approx \phi_c$, (c) $\phi > \phi_c$ [24].

1.3. Applications des polymères conducteurs

En fonction de la résistivité électrique (donc la conductivité électrique), nous pouvons définir le domaine d'application des polymères conducteurs. Par exemple, ceux utilisés dans les réservoirs du carburant nécessitent généralement une résistivité électrique de l'ordre de $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, tandis que ceux employés en blindage électromagnétique exigent une résistivité électrique inférieure à $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ [25, 26, 8].

En vertu de leurs excellentes propriétés électriques et électrochimiques, nous retrouvons les polymères conjugués dans la composition de piles. [27] Ils ont, également, permis le développement d'électrodes modifiées [28] et de transistors. Ils possèdent aussi des propriétés optiques très intéressantes. Ils sont utilisés dans le domaine de l'optique non-linéaire pour la fabrication de guides d'onde [29]. Ils sont, également, sur le point de révolutionner le développement de biocapteurs [30]. Ceux-ci permettent la détection d'agents pathogènes ou de métabolites vitaux dans le domaine de la santé, de l'environnement et de l'industrie. De plus, les polymères conjugués sont luminescents, c'est pourquoi, ils sont utilisés dans la confection de diodes organiques électroluminescentes (OLEDs) [31, 32]. Les différentes applications des polymères conducteurs en fonction de leur résistivité électrique sont listées dans le tableau (I.1).

Résistivité ($\Omega.cm$)	Applications et produits
10^{14} Isolant	Isolateurs
10^{10} Dissipateur électrostatique	Matériaux antistatiques: réservoirs de carburant, conduites miniers, conteneurs de stockage antistatiques, connecteurs électroniques, boîtier de microscope etc.
10^4 Conducteurs	Capteurs et blindage EMI : autorégulateurs des éléments chauffants, matériaux de détection de contrainte, protection des rayonnements électroniques indésirables, protecteur de sur intensité, dispositifs de détection de liquides organiques etc.
10^{-2} Bon Conducteurs	Les conducteurs: remplacements de métal, adhésifs et revêtements conducteurs, plaques bipolaires, résistances, matériaux thermoélectriques, etc.

Tableau I.1: Classification des CPC en fonction de leurs résistivités électriques et leurs domaines d'application, prise de réf [25, 8].

2. Notions sur le blindage électromagnétique

2.1. Quelques rappels sur les ondes électromagnétiques

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

$$\begin{cases} E(x, y, z) = E_0 e^{-ikr} \\ H(x, y, z) = H_0 e^{-ikr} \end{cases} \quad (I.1)$$

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.4).

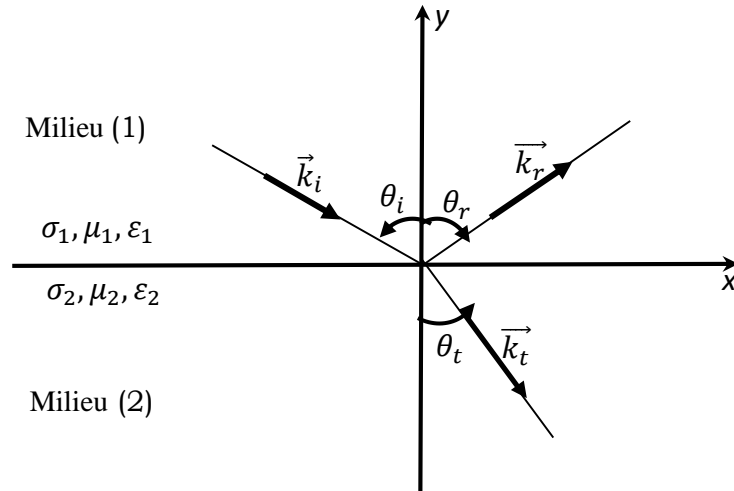


Figure I.4: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2).

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

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\vec{E} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Le vecteur d'onde et l'impédance intrinsèque du milieu sont données, respectivement, par les relations suivantes [33]:

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{i\omega} \right)} \quad (\text{I.3})$$

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (\text{I.4})$$

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 Electromagnétique (C.E.M.) est l'aptitude d'un équipement à fonctionner dans son environnement électromagnétique sans être perturbé et sans perturber des équipements voisins ou des services radioélectriques. La C.E.M. est une nécessité pour le fonctionnement satisfaisant de tous les systèmes, équipements et sous-ensembles d'une

installation. Depuis longtemps, elle est imposée par un cahier des charges dans toutes les applications (militaires, aéronautiques, spatiales, etc.).

Une bonne C.E.M. dicte que chaque équipement ne soit ni perturbateur, ni perturbé. Cette cohabitation implique des précautions pour maîtriser à la fois les émissions électromagnétiques des appareils et leurs susceptibilités aux perturbations ambiantes [34].

2.3. Définition du blindage électromagnétique

Un blindage ou un écran électromagnétique est une barrière conductrice qui sépare l'espace en deux zones, l'une contenant des sources de champs électromagnétique, alors que l'autre comporte le dispositif à protéger. Comme le montre la figure (I. 5), le but d'un blindage est double:

- (1) Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée d'un point de vue émission.
- (2) Protéger des émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte d'un point de vue immunité [4].

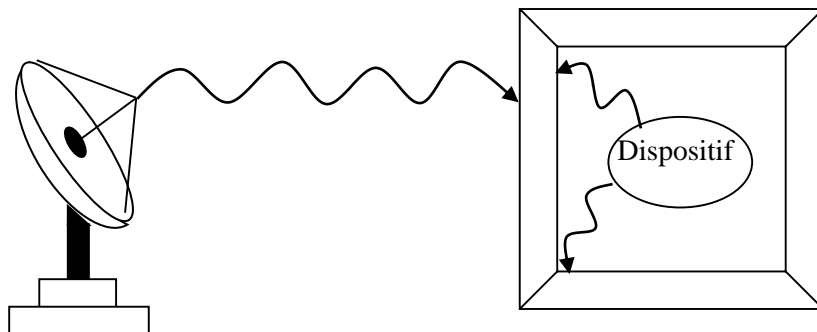


Figure I.5: Blindage électromagnétique extérieur et intérieur.

2.4. Champs 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.6) 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 $r < \frac{\lambda}{2\pi}$, le rayonnement est dominé

par les composantes multipolaires des champs de la source. Une zone de champ lointain; quand la distance source-matériau est plus grande que la longueur d'onde dans l'air $r > \frac{\lambda}{2\pi}$, dans cette zone le rayonnement est considéré comme une onde plane ou sphérique et l'impédance est donnée par impédance de l'air [35]. Autour de $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ on se trouve dans une zone transitoire [24, 35]. 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.

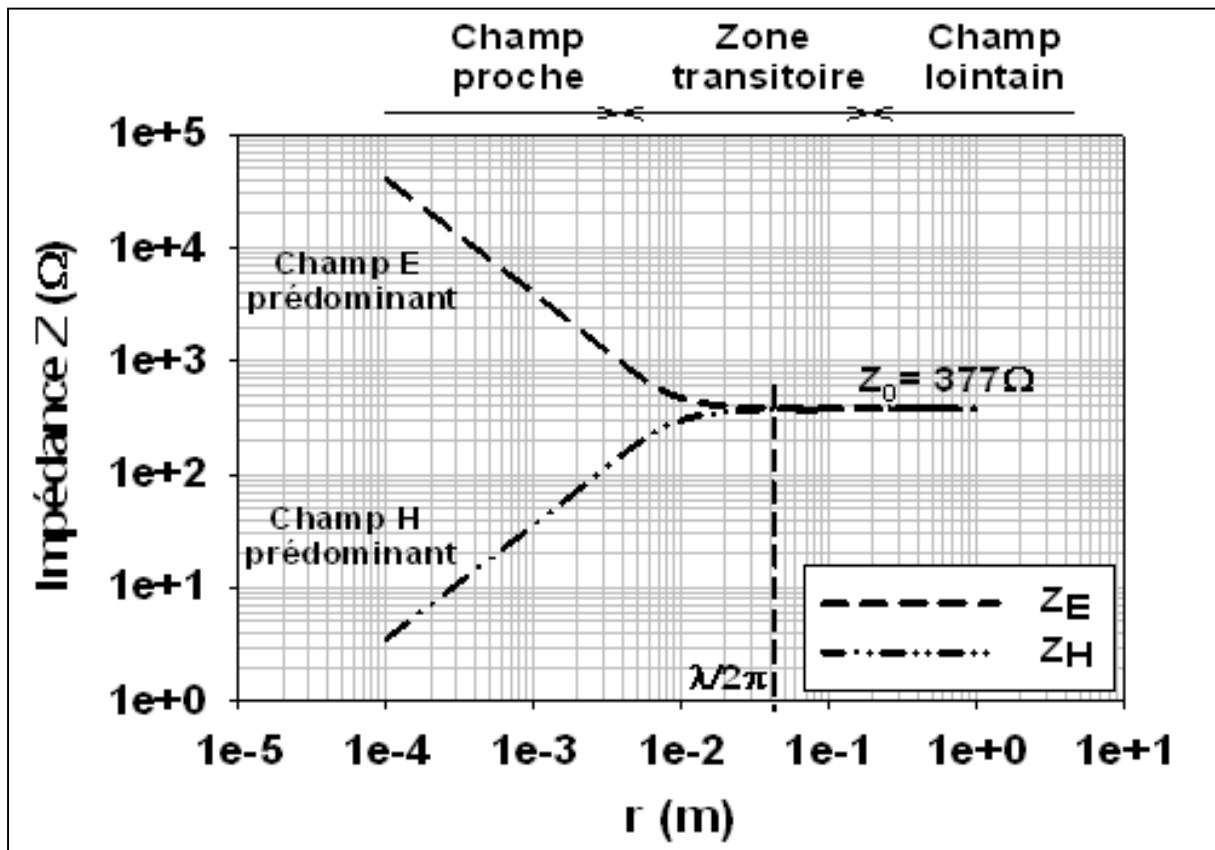


Figure I.6: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source-écran de blindage [35].

2.5. Mécanisme du blindage électromagnétique

Lors de pénétration d'une onde électromagnétique un blindage, trois mécanismes différents se manifestent : la réflexion, l'adsorption et les réflexions internes multiples, comme le montre la figure (I.7).

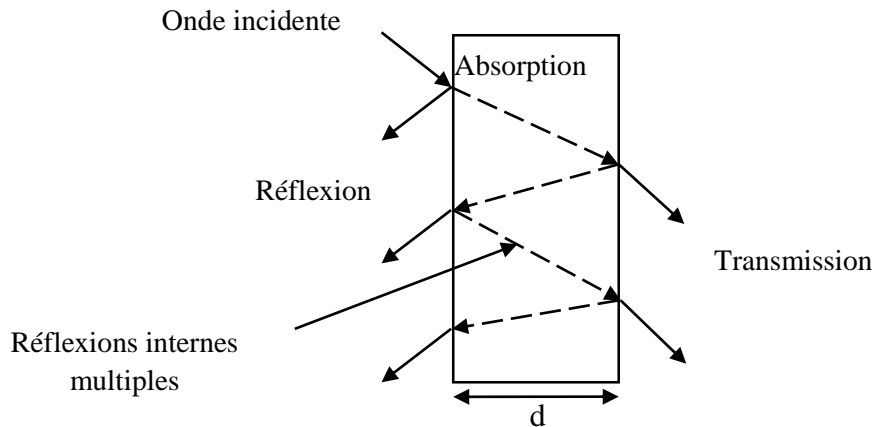


Figure I.7: Mécanisme du blindage électromagnétique.

2.5.1. Atténuation par réflexion

La réflexion est un phénomène due à la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde et la barrière de blindage qui est généralement constitué d'un matériau de bonne conductivité électrique. La haute conductivité électrique n'est pas généralement une exigence pour le blindage électromagnétique, cependant, elle contribue à son amélioration [36].

2.5.2. Perte par absorption

L'absorption nécessite des propriétés électriques et/ou magnétiques pour le blindage électromagnétique [37]. Quand les champs électriques et magnétiques pénètrent la barrière du blindage, leurs amplitudes s'atténuent exponentiellement avec la profondeur de pénétration. C'est l'effet de peau; un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, l'onde électromagnétique ne pénètre que la région proche de la surface du blindage. Une partie de cette énergie électromagnétique est cédée à la matière sous forme de courant de Foucault, ce qui se traduit par un échauffement du matériau. L'épaisseur de peau δ représente la distance à laquelle l'amplitude des champs est atténuée à $1/e$ de la valeur initiale, elle est inversement proportionnelle à la fréquence et définit par [38].

$$\delta = \sqrt{1/(\sigma\mu\pi f)} \quad (\text{I.5})$$

où f est la fréquence de l'onde électromagnétique.

2.5.3. Atténuation par réflexions internes multiples

Les réflexions internes multiples se produisent sur l'interface de sortie et d'entrée du blindage, les réflexions sont négligées si l'épaisseur du blindage est beaucoup plus grand que l'épaisseur de peau $d \gg \delta$. Mais lorsque l'épaisseur du matériau est plus faible devant l'épaisseur de peau, les réflexions internes multiples se produisent et la somme de ses termes provoque une diminution de l'efficacité du blindage [33].

2.6. 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 [33, 39, 40]:

$$SE(dB) = -20 \log \left| \frac{E_t}{E_i} \right| \quad (I.6)$$

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

Pour une onde électromagnétique uniforme plane franchissant une barrière de cotés identiques, les relations (6) et (7) sont similaires, puisque les champs électrique et magnétique d'une onde électromagnétique uniforme plane ne sont liés qu'à l'impédance intrinsèque du milieu.

L'efficacité du blindage électromagnétique donnée par l'expression (I.6) peut être écrite en somme suivante [39, 41] :

$$SE(dB) = R(dB) + A(dB) + M(dB) \quad (I.8)$$

où $R(dB)$, $A(dB)$ et $M(dB)$ représentent, respectivement, l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'atténuation par réflexions internes multiples.

2.7. Détermination de l'efficacité du blindage monocouche en cas d'une incidence normale

La figure (I.8) décrit 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 . La couche j est en contact avec les milieux $j - 1$ et $j + 1$. Les coordonnées cartésiennes sont utilisées pour décrire la variation de l'épaisseur, dans le plan xz ,

de $d = 0$ à gauche, jusqu'à $d = d_j$ à droite. En amont, en aval et à l'intérieur de la couche, l'onde électromagnétique est décrite par les solutions générales des équations de Maxwell.

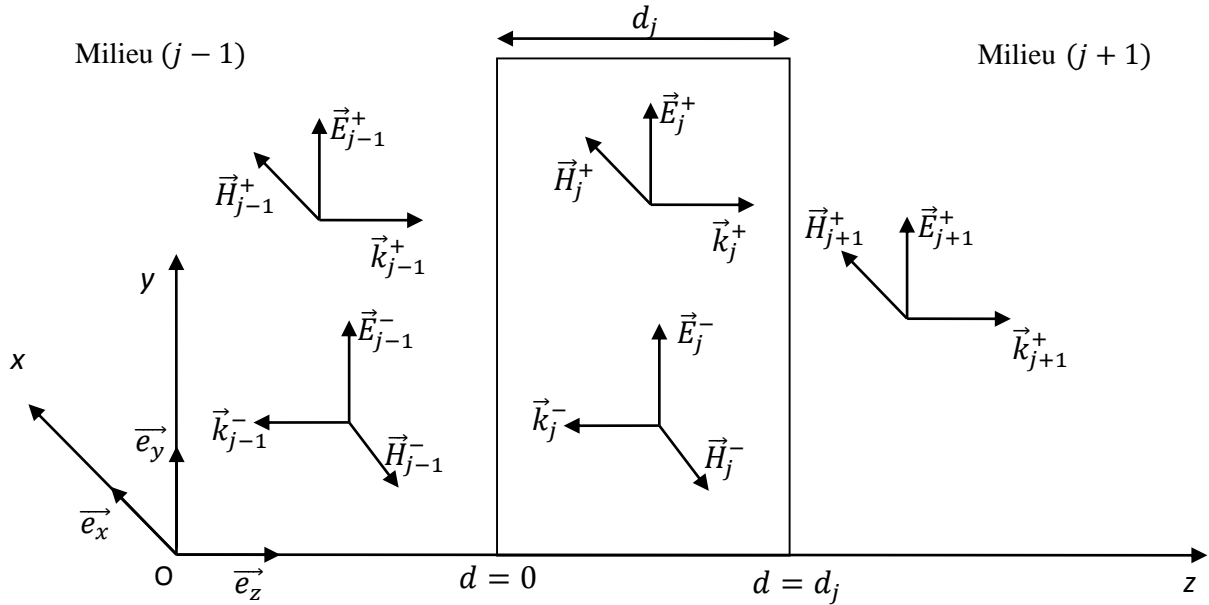


Figure I.8 : Pénétration d'une onde électromagnétique à une incidence normale. Le signe (+) indique une propagation dans la direction des axes, tandis que le signe (-) dans le sens contraire.

Les différents champs électromagnétiques s'écrivent:

- Dans le milieu $j - 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^+ = H_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^- = -H_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^- = -\frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (I.9)$$

- Dans la couche j

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^+ = H_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^- = -H_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^- = -\frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (I.10)$$

- Dans le milieu $j + 1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j+1}^+ = H_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{I. 11})$$

Les conditions aux limites aux niveaux des deux interfaces de la couche ($d = 0$ et $d = d_j$) donnent:

Quand $d = 0$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ + \vec{E}_{j-1}^- = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{j-1}^+ + \vec{H}_{j-1}^- = \vec{H}_j^+ + \vec{H}_j^- \end{cases} \quad (\text{I. 12})$$

$$\begin{cases} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{1}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \end{cases} \quad (\text{I. 13})$$

Quand $d = d_j$

$$\begin{cases} E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ \\ \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} - \frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} \end{cases} \quad (\text{I. 14})$$

Nous aurons un système de quatre équations à cinq inconnues:

$$\begin{cases} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- & \times \frac{1}{Z_{j-1}} & (1) \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{1}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) & (2) \\ E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ & \times \frac{1}{Z_j} & (3) \\ \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} - \frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} & (4) \end{cases} \quad (\text{I. 15})$$

$$\begin{cases} (1) + (2) \Rightarrow E_{j-1}^+ = \frac{1}{2} \left[(E_j^+ + E_j^-) + \frac{Z_{j-1}}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \right] & (5) \\ (3) + (4) \Rightarrow E_j^+ = \frac{Z_j}{2} \left(\frac{1}{Z_j} + \frac{1}{Z_{j+1}} \right) E_{j+1}^+ e^{+ik_j d_j} & (6) \\ (3) - (4) \Rightarrow E_j^- = \frac{Z_j}{2} \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{Z_{j+1}} \right) E_{j+1}^+ e^{-ik_j d_j} & (7) \end{cases} \quad (\text{I. 16})$$

L'insertion des équations (6) et (7) dans l'équation (5) donne:

$$E_{j-1}^+ = \frac{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})}{4Z_j Z_{j+1}} \left[1 - \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} e^{-i2k_j d_j} \right] e^{+ik_j d_j} E_{j+1}^+ \quad (I.17)$$

Ainsi le coefficient de transmission s'écrit [42, 43]:

$$T = \frac{E_{j+1}^+}{E_{j-1}^+} = p [1 - q e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \quad (I.18)$$

avec

$$p = \frac{4Z_j Z_{j+1}}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (I.19)$$

$$q = \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (I.20)$$

Finalement, l'efficacité du blindage est donnée par:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} |T| = -20 \log_{10} \left| p [1 - q e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right| \quad (I.21)$$

ou encore:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} |p| + 20 \log_{10} |e^{ik_j d_j}| + 20 \log_{10} |[1 - q e^{-i2k_j d_j}]| \quad (I.22)$$

dans laquelle nous définissons l'atténuation par réflexion $R(dB)$, la perte par absorption $A(dB)$ et l'atténuation par réflexions internes multiples $M(dB)$ comme suit [33, 44, 42, 43]:

$$R(dB) = -20 \log_{10} |p| \quad (I.23)$$

$$A(dB) = 20 \log_{10} |e^{ik_j d_j}| \quad (I.24)$$

et

$$M(dB) = 20 \log_{10} |\log_{10} |[1 - q e^{-i2k_j d_j}]|] \quad (I.25)$$

2.8. Cas d'une incidence oblique

L'efficacité du blindage en cas d'une incidence oblique, pour les polarisations transversales électrique ou magnétique, évolue selon la même expression obtenue dans le cas d'une incidence normale, il suffit juste de remplacer l'impédance intrinsèque par celle selon le type de polarisation, tel que [45,46]:

$$Z^\perp = \frac{Z}{\cos\theta_i} \quad (I.26)$$

$$Z^\parallel = Z\cos\theta_i \quad (I.27)$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Raies A, Elaboration de films minces électroluminescents à base de polymère conducteur électronique et de nanotubes de carbone. Thèses de doctorat, Université de Paris-Saclay. 2015; p10-18.
- [2] Belhadji D, Synthèse et caractérisations de composites polyéthylendioxyde thiophene/Maghnite-Fe. Mémoire de magister, Université d'Oran Es-Senia. 2010; p5.
- [3] C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, and A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, A. G. MacDiarmid, Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene, *Phys. Rev. Lett.* 39. (1977); 1098–1101.
- [4] El Kamchi N, Synthèse et propriétés électroniques de nanocomposites à base de Polyaniline Application à la réalisation d'un micro capteur organique électronique d'ammoniac et au blindage électromagnétique dans les bandes X et Ku. Thèse de doctorat, Université Lille1.2012; p16-103.
- [5] Ito, T., Shirakawa, H. & Ikeda, S. Simultaneous polymerization and formation of polyacetylene film on the surface of concentrated soluble Ziegler-type catalyst solution. *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.* 12. (1974); 11–20.
- [6] Lefrant, S. et al. Raman scattering in $(\text{CH})_x$ and $(\text{CH})_x$ treated with bromine and iodine. *Solid State Commun.* 29. (1979);191–196.
- [7] Ammour S, 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. Mémoire de master, Université de Tlemcen. 2017; p4-7.
- [8] Benhamou S.M, 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; p7-22.
- [9] Shirakawa, H. ; louis, E.J.; MacDiarmid, A.G.; Chiang, C.K. ; Heeger, A.J ; *J. Chem.Soc Chem.Comm.*1977;(16):578.
- [10] Ching,C.k. ; Fincher,.C.R., Jr. ;Park,Y.W. ; Heeger,A.J. ; Shirakawa,H. ;Louis,E.J . ; Gau, S.C. ; MacDiarmid, Alan G. *Phys.Rev.Let.*1977;39(17):1098.
- [11] Chiang, C. K. et al. Conducting polymers: Halogen doped polyacetylene. *J. Chem. Phys.* 69. (1978): 5098–5104.
- [12] Shirakawa, H., Zhang, Y.-X., Okuda, T., Sakamaki, K. & Akagi, K. Various factors affecting the synthesis of highly conducting polyacetylene. *Synth. Met.* 65. (1994): 93–101.
- [13] H. Naarmann, N. Theophilou, New process for the production of metal-like, stable polyacetylene *Synthetic Metals* Volume 22, Issue 1. (1987): 1-8.
- [14] 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.

- [15] Heeger, A. J. Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials†. *J. Phys. Chem. B* 105. (2001): 8475–8491.
- [16] Pinto, G.; Maaroufi, A.K.; *J.Appl.Polym.Science*. 2005; 96 (6), 2011.
- [17] Del Rio, C.; Acosta, J.L.; *J.Appl.Polym.Science*. 1996; 60(3), 399.
- [18] Kim, Y.T.; Kim, W.S.; Song, M.K.; *Mol.Crystals and Liquid Crystals*. 2006; 445, 193.
- [19] Lima Pacheco, Ana P.; Araujo, Elmo.S.; de Azevedo, Walter M.; *Materials Characterization*. 2003; 50(2/3), 245.
- [20] Seymour, R.B. ;(éd) *Conductive Polymers*. Plenum Press: New York. 1981: 23-47.
- [21] Jousseume, V.; Bonnet, A.; Morsali, M.; Cattin, L.; *Eur.Phys.J.*.1999: AP-6,7.
- [22] S.R. Broadbent, J.H. Hammerslay, *Percolation process*, *Proc. Cambridge. Phil. Soc.*, 53. 1957.
- [23] Hammouni M, cours de l'étude théorique des polymères conducteurs, master de matériaux polymères, composites avancés à base de polymères étude et application, Université de Tlemcen. 2019.
- [24] Dai L., *Intelligent macromolecules for smart devices : from materials synthesis to device applications*. Springer-Verlag, London. 2004: p 41- 80.
- [25] Pang H, Xu L, Yan DX, Li ZM. *Conductive polymer composites with segregated structures*. *Prog. Polym. Sci.* 2014; 39: 1908 – 33..
- [26] Dang ZM, Yuan JK, Zha JW, Zhou T, Li ST, Hu GH. *Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites*. *Prog. Mater. Sci.* 2012; 57: 660 –723.
- [27] Curtet, J. P., Djurado, D., Bée, M., Michot, C. & Armand, M. *Structure of new mixed conducting alternate copolymers*. *Synth. Met.* 102. (1999): 1412–1413.
- [28] Rault-Berthelot, J., Orliac, M.-A. & Simonet, J. *The polyfluorenes: a family of versatile electroactive polymers—III. Poly(9,9-dimethylfluorene) as an electrode modifier in the study of some systems known to be reversible on platinum*. *Electrochimica Acta*. (1988):33811–823.
- [29] Katz, H. E., Torsi, L. & Dodabalapur, A. *Synthesis, Material Properties, and Transistor Performance of Highly Pure Thiophene Oligomers*. *Chem. Mater.* 7. (1995): 2235–2237.
- [30] M. A. Bader, H.-M. K. *Polymer-based waveguides and optical switching*. *Opt. Mater.* 9. (1998): 334–341.
- [31] Faïd, K. & Leclerc, M. *Responsive Supramolecular Polythiophene Assemblies*. *J. Am. Chem. Soc.* 120. (1998): 5274–5278.
- [32] Wang, J. & Jiang, M. *Toward Genoelectronics: Nucleic Acid Doped Conducting Polymers*. *Langmuir* 16. (2000): 2269–2274.

- [33] Celozzi S, Araneo R, Lovatr G, Clayton P. Electromagnetic Shielding. John Wiley & Sons, New Jersey. 2008: p56.
- [34] Jacques Dubois, "Solutions de blindage électromagnétique et management thermique", 6ème édition, (2009).
- [35] 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.
- [36] Chung DDL. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. CARBON. 2001; 39: 279-85.
- [37] Al-Saleh MH, Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. CARBON. 2009; 47: 1738 – 46.
- [38] Abdi M, Kassim A, Ekramul Mahmud HNM, Mahmood W, Talib ZA. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of New Conducting Polymer Composite. J. Macromol. Sci, Part A. 2010; 47: 71-75.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Schulz RB, Plantz VC, Brush DR. Shielding theory and practice. IEEE T. Electromagn. C. 1988; 30: 187 – 201.
- [43] Dharma Raj C, Sasibhushana Rao G, Jayasree PVY, Srinu B, Lakshman P. Development of a Three Layer Laminate for Better Electromagnetic Compatibility Performance at X-Band. Information and Communication Technologies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010; 101: 406 – 410.
- [44] Clayton R. Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. Second Edition. John Wiley & Sons, New Jersey; 2006; p. 718.
- [45] Naishadham, K. Shielding effectiveness of conductive polymers. IEEE T. Electromagn. C. 1992; 34: 47 – 50.
- [46] Benhamou SM, Hammouni M, Khaldi S. Theoretical approach of electromagnetic shielding of multilayer conductive sheets. PIER M. 2015; 41: 167 – 175.

Chapitre II

Matériaux étudiés et méthodologies expérimentales

INTRODUCTION

Les polymères conducteurs, comme nous l'avons déjà rapporté dans le chapitre précédent, ont des applications très intéressantes dans le domaine des composants électriques et électroniques (aéronautique, astronautique), puisqu'ils sont très légers [1, 2], ils peuvent être utilisés comme semi-conducteurs organiques, matériaux électroluminescents, revêtements pour le blindage électromagnétique [3, 4]. Par conséquent, plusieurs travaux de recherche de conception de matériaux du blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs ont été réalisés pour bénéficier des avantages qu'offrent ces matériaux par rapport aux métaux classiques [5]. Parmi ces matériaux nous citons le 3,4 éthylènedioxythiophène associé à la Maghnite et au Sodium, un matériau composite qui fait l'objet de ce travail. Pendant la dernière décennie, les polymères conducteurs à base de thiophène ont été très étudiés, particulièrement le poly (3, 4-éthylènedioxythiophène) (PEDOT). Ce polymère est très utilisé dans plusieurs applications telles que les revêtements antistatiques, les diodes électroluminescentes, les cellules photovoltaïques et les capteurs électroniques. L'attrait pour ce polymère est dû à son excellente stabilité thermique, à sa structure régulière et sa grande transparence dans le domaine du visible [6, 7].

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à la présentation des matériaux utilisés, à savoir, le 3, 4 éthylènedioxythiophène (PEDOT), la Maghnite, le Sodium et le protocole de synthèse du composite. Dans la deuxième partie, nous présentons la méthode expérimentale qui nous a permis de mesurer les propriétés du blindage électromagnétique de notre échantillon à savoir, le guide d'onde rectangulaire.

1. Matériaux utilisés

1.1. Le 3, 4 éthylènedioxythiophène (PEDOT)

Les études récentes montrent que le PEDOT est reconnu comme matériau transparent et très stable à l'état oxydé [8, 9]. Aussi, c'est l'un des polymères les plus prometteurs en terme de conductivité électrique [10]. Grâce à ces propriétés, le PEDOT est utilisé dans des OLEDs [11, 12] et dans des cellules solaires [13], La structure du PEDOT est illustrée par la figure(II.1)

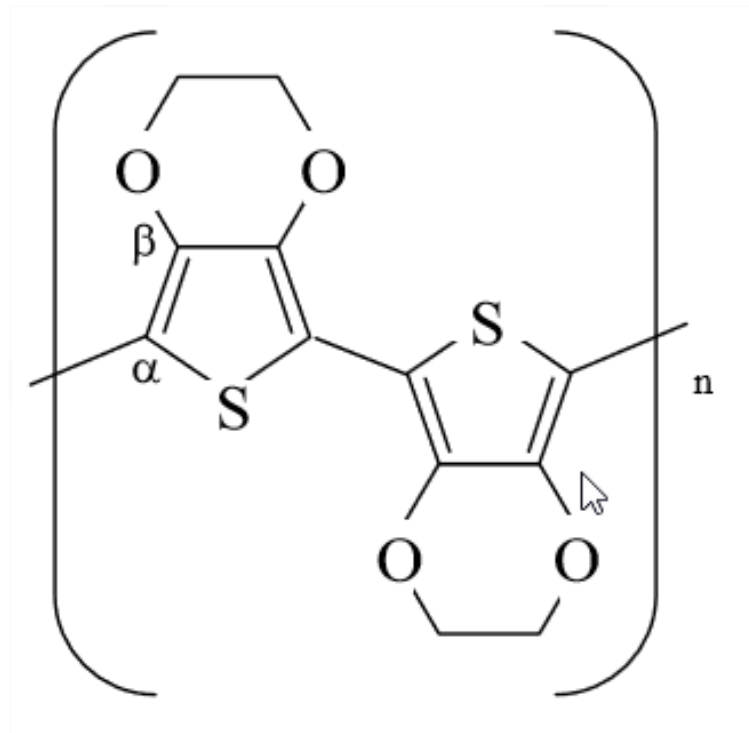


Figure II.1: La structure moléculaire du PEDOT

1.1.1. Synthèse et caractérisation du PEDOT

La polymérisation chimique de l'EDOT peut être réalisée aussi bien en milieu organique que dans l'eau. Le PEDOT est obtenu soit par oxydation chimique soit par voie électrochimique de l'EDOT.

La polymérisation chimique oxydative du 3, 4-éthylènedioxythiophène (EDOT) se fait en utilisant, par exemple, le FeCl_3 , le $\text{Fe}(\text{OTs})_3$ [14], le $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$, $(\text{NH}_4)\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ [15], comme le montre la figure (II.2), et le persulfate d'ammonium [16]. Les deux méthodes conduisent à des polymères insolubles et ne peuvent être fondus en dessous de leur température de décomposition [17, 18]. Pour ce qui est des composites avec le PEDOT comme polymère, peu d'études ont été faites, parmi celle-ci nous citons les travaux de Megherbi et.al. qui a préparé un composite Maghnite/PEDOT [19].

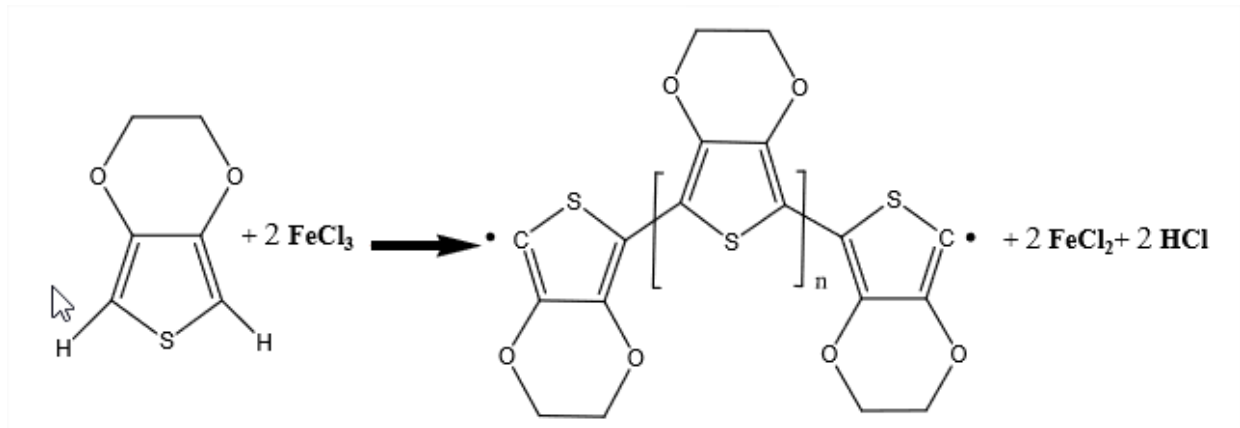


Figure II.2: La polymérisation du PEDOT

1.1.2. Conductivité du PEDOT

Par-delà son excellente stabilité, ce polymère a aussi une conductivité qui le place dans dizaines à quelques centaines de $S.cm^{-1}$ dans l'état dopé. En fait, pour les polythiophènes, ses propriétés dépendent de la méthode de synthèse, ainsi la conductivité du PEDOT synthétisé par voie chimique [20] est inférieure d'un ordre de grandeur par rapport à celle des films préparés par synthèse électrochimique. En milieu aqueux, la synthèse conduit à des valeurs de conductivité sensiblement identiques [21, 22]. D'autres études ont mis en évidence le caractère métallique proche de la transition métal-isolant [23, 24, 25]

1.2. Maghnite

1.2.1. L'argile

L'argile est une matière première d'origine volcanique utilisée depuis la plus haute antiquité, elle est composée essentiellement de la montmorillonite (plus de 70% en masse) [26]. Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches: altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines [27].

- **Propriétés et intérêt des argiles**

Traditionnellement utilisées comme matière première par les potiers, les argiles ont de nombreuses applications dans l'industrie grâce à leurs caractéristiques chimiques (adsorption et absorption des molécules, composition) et physiques (taille des particules). Enumérons quelques utilisations:

- Dans l'industrie chimique, elles amorcent certaines réactions (craquage des huiles minérales ou polymérisation de certaines molécules organiques).

➤ Utilisées comme source de silice et d'alumine, les argiles forment les minéraux de base de l'industrie des matériaux de construction, des réfractaires et des isolants.

➤ D'autres argiles, notamment les smectites sodiques et les attapulgites servent à épaissir un grand nombre de liquides: eau douce, eau salée, solvants aliphatiques. huiles végétales, glycols. Exploitée comme charge minérale, l'argile joue un rôle important dans la papeterie et l'industrie du caoutchouc.

➤ Dans les industries pharmaceutiques et médicales, l'argile trouve aussi un usage. Elle constitue la base des pansements stomacaux et intestinaux. Leurs propriétés absorbantes permettent la fabrication de médicaments à effets retardés. Les smectites en particulier interviennent dans la fabrication de nombreux cosmétiques: savons et shampoings, pommades, crème dentifrice où elles remplacent les matières grasses [28].

1.2.2. Maghnite

C'est une bentonite extraite de la région de Lalla Maghnia (Hammam Boughrara), commercialisée par la Société BENTAL (ENOF) et dont les propriétés catalytiques ont été étudiées par l'équipe du Laboratoire de Chimie des Polymères de l'Université d'Oran. Plusieurs Brevets et Publications Internationales ont été réalisés.

Le premier brevet a démontré l'originalité de l'argile de Maghnia par rapport à celles du Wyoming (Fort Benton, Texas) et de Montmorillon (Vienne, France). C'est ce qu'il lui a valu son nom de Maghnite [29].

Vu les avantages que représente la Maghnite, en point de vue écologique (pas de toxicité) et économique (pas coûteuse) elle a été le sujet de Plusieurs travaux effectués au laboratoire de chimie des polymères par M.Belbachir et al [29].

La composition chimique de la Maghnite utilisée est donnée dans le tableau (II.1) suivant:

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Perte enfeu
%	69.39	14.67	1.16	1.07	0.30	0.50	0.79	0.16	11

Tableau II.1: Composition chimique de la Maghnite [30].

1.3. Sodium

Le sel est un produit cristallin se composant principalement de chlorure de sodium. Le chlorure de sodium est un cristal ionique de formule chimique NaCl, c'est un solide blanc, soluble dans l'eau à toute température, légèrement soluble dans l'alcool et insoluble dans l'acide chlorhydrique concentré. Il provient soit de la mer, soit de gisements souterrains de sel gemme, soit encore de saumure naturelle [31].

1.3.1. Propriétés chimiques

Le sodium est un métal de couleur argentée. À température ambiante, il est assez mou et il est liquide au-dessus de 98 °C. À l'état naturel, le sodium est majoritairement sous forme de chlorure : NaCl. Le sodium est un élément chimique très répandu, c'est le septième élément le plus abondant de la croûte terrestre [32].

1.3.2. Propriétés physiques

Le sodium est utilisé comme caloporteur dans les réacteurs à neutrons rapides pour ses nombreuses qualités, telles que sa faible modération, sa bonne conductivité, sa bonne capacité calorifique, sa faible température de fusion et sa température de vaporisation élevée [33].

1.4. Synthèse du 3,4 éthylènedioxythiophène associé à la Maghnite et au Sodium

Les réactions de polymérisation ont été effectuées à température ambiante pendant 24 heures en faisant réagir 0,5 g de 3,4-éthylènedioxythiophène (EDOT) avec 5% en poids de la Maghnite (Mg) et le Sodium (Na^+) en présence de chlorure de cuivre (un agent oxydant). Le composite obtenu est filtré et lavé à l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un test négatif au nitrate d'argent (AgNO_3). Après 15 jours de séchage à température ambiante, nous obtenons un échantillon en poudre de PEDOT - Mg - Na^+ . Introduit dans un moule, sous une forte pression produite dans une presse hydraulique, il est extrait sous forme circulaire, représentée par la figure (II. 3). L'épaisseur de cette couche circulaire est de $d = 1,55$ mm et d'un diamètre $t = 13,44$ mm.



Figure II.3: Couche circulaire du 3, 4-éthylènedioxythiophène - Magnhite – Sodium.

2. METHODES DE MESURE DES PROPRIETES DU BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

2.1. Analyseur de réseau

Un analyseur de réseau est un instrument de mesure qui permet de déterminer les paramètres de diffusion S d'un circuit électrique. Cet instrument est généralement utilisé pour caractériser les quadripôles (tels que les amplificateurs ou filtres), mais peut être utilisés sur d'autres réseaux (avec notamment un plus grand nombre de pôles). On utilise généralement un analyseur de réseau dans le domaine des radiofréquences afin de caractériser les filtres, les câbles et les antennes. L'analyseur de réseau permet de tracer le nomogramme de Smith (ou abaque de Smith) du réseau étudié.

Nous distinguons deux catégories d'analyseurs de réseau:

- **Analyseur de réseau scalaire (SNA)** → Il mesure seulement les propriétés en amplitude.
- **Analyseur de réseau vectoriel (VNA)** → Il mesure les propriétés en amplitude et en phase, mais dont le coût est souvent plus élevé [34]. Illustré par la figure (II.4), les analyseurs de réseau vectoriel (VNA) peuvent être utilisés pour obtenir les paramètres de diffusion (paramètres

S) d'une configuration. Des montages dans des chambres à champ ouvert, anéchoïques ou réverbérantes peuvent être utilisés pour estimer l'efficacité du blindage d'un échantillon [35].



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

2.2. Kit de sonde diélectrique

Les propriétés diélectriques des matériaux sont importantes, voire critiques dans toutes sortes d'industries, et ce pour de nombreuses raisons. Par conséquent, être capable de mesurer ces propriétés avec précision est important dans de multiples contextes. Dans un contexte industriel plus large, les fabricants doivent caractériser les matériaux céramiques et composites qu'ils développent pour les composants automobiles et les revêtements; les polymères et les matières plastiques utilisés pour fabriquer des fibres, des films et des matériaux isolants; les hydrogels pour couches jetables et lentilles de contact souples; et les cristaux liquides utilisés dans les écrans. Ces matériaux peuvent, également, se retrouver dans les pneus, la peinture, les adhésifs et les applications connexes [36].

Dans notre mesure, Comme le montre la figure (II.5), nous avons récupéré la permittivité électrique de l'échantillon provenant du kit de sonde diélectrique DAK de SPEAG connecté à un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Nous avons mesuré la permittivité complexe sur une

large gamme de fréquences allant de 200 à 20000 MHz. Bien que l'épaisseur de l'échantillon soit limitée par le processus de fabrication, cela peut influencer la qualité du résultat.

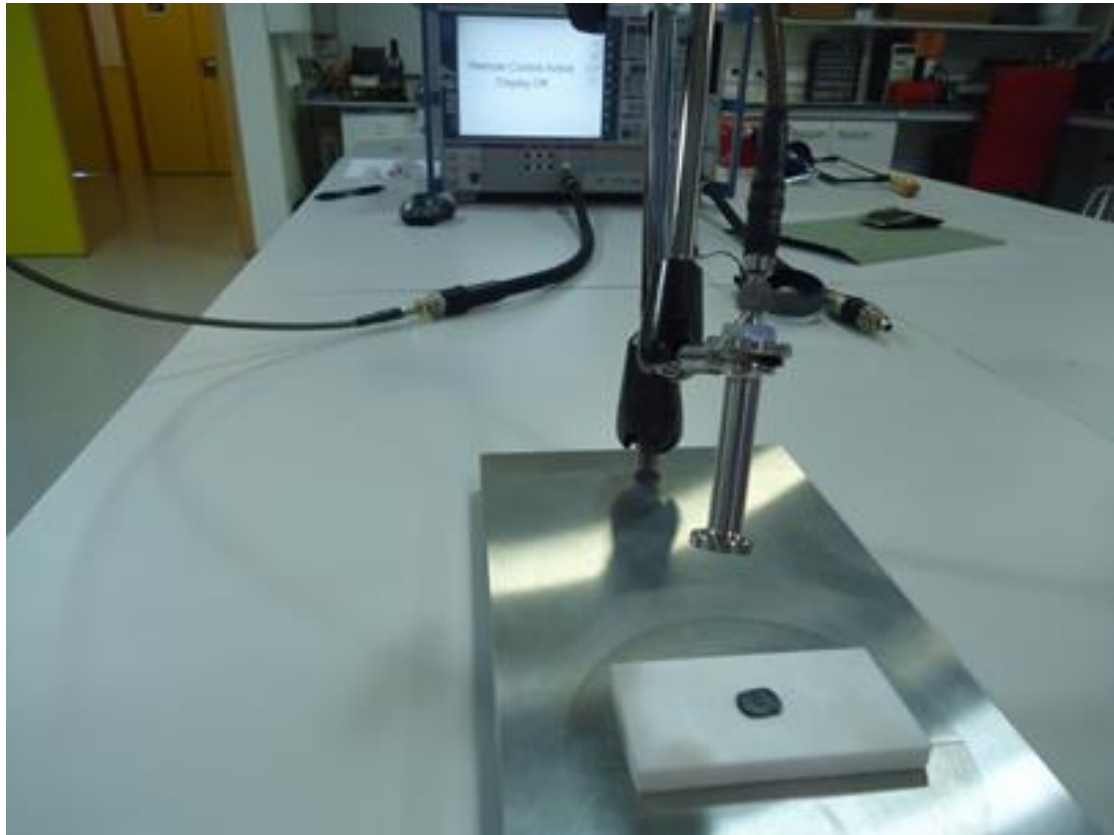


Figure II.5: Kit de sonde diélectrique

2.3. Guide d'onde rectangulaire

Les ondes TE et TM dans un guide d'onde sont des ondes électromagnétiques pour lesquelles le champ électrique ou le champ magnétique, respectivement, sont normaux à la direction de propagation Oz définie par l'axe du guide. Nous allons étudier la propagation de ces ondes dans des guides métalliques à section rectangulaire, remplis d'un milieu diélectrique, non magnétique, linéaire, homogène, isotrope, de permittivité relative ϵ_r [37]. Une vue schématique de la cellule est donnée sur la figure (II.6)

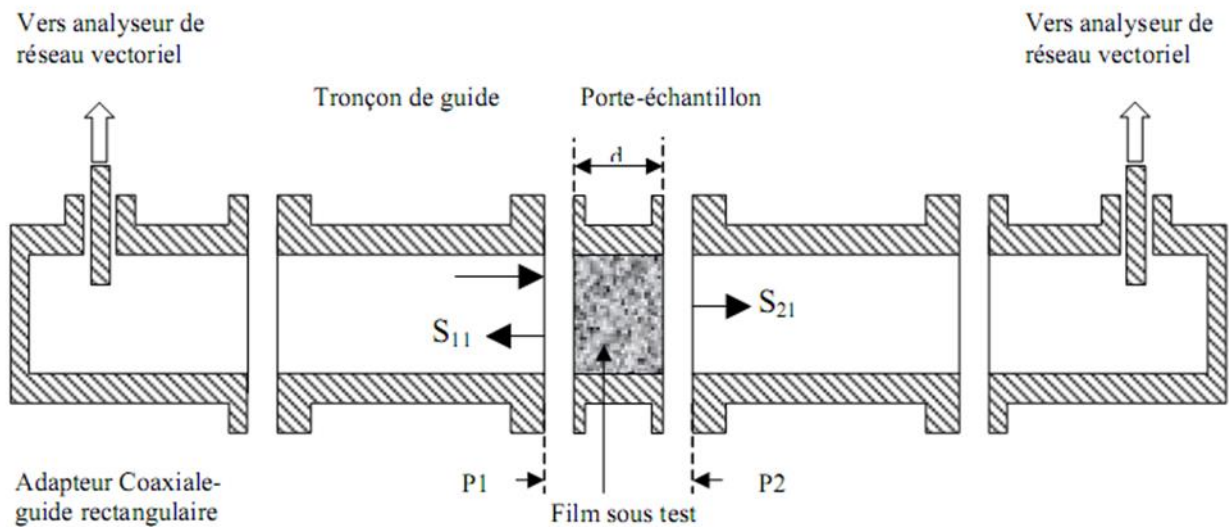


Figure II.6: Schéma de cellule de mesure en guide d'onde rectangulaire.

Lorsque nous travaillons avec un VNA et avec des configurations de lignes de transmission (lignes coaxiales ou guides d'ondes), l'efficacité du blindage, l'atténuation par réflexion, la perte par absorption peuvent être obtenues à partir des paramètres de diffusion lorsque l'échantillon remplit complètement la section du guide d'ondes, données, respectivement, par les expressions suivantes [38]:

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

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

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

Pour l'étude de mesure dans ce mémoire, un kit de guide d'onde WR-90 Agilent a été utilisé entre 9 et 11 GHz et connecté à VNA ZVA67 de Rohde & Schwarz pour obtenir les coefficients de réflexion et de transmission. La Figure (II.7) présente une couche de PEDOT-Mg-Na⁺ serrée entre deux brides de guides d'ondes. Une procédure de désassemblage utilisant des lignes et des courts-circuits de guide d'ondes a été réalisée pour éliminer l'influence des transitions coaxiales à guide d'ondes [39].

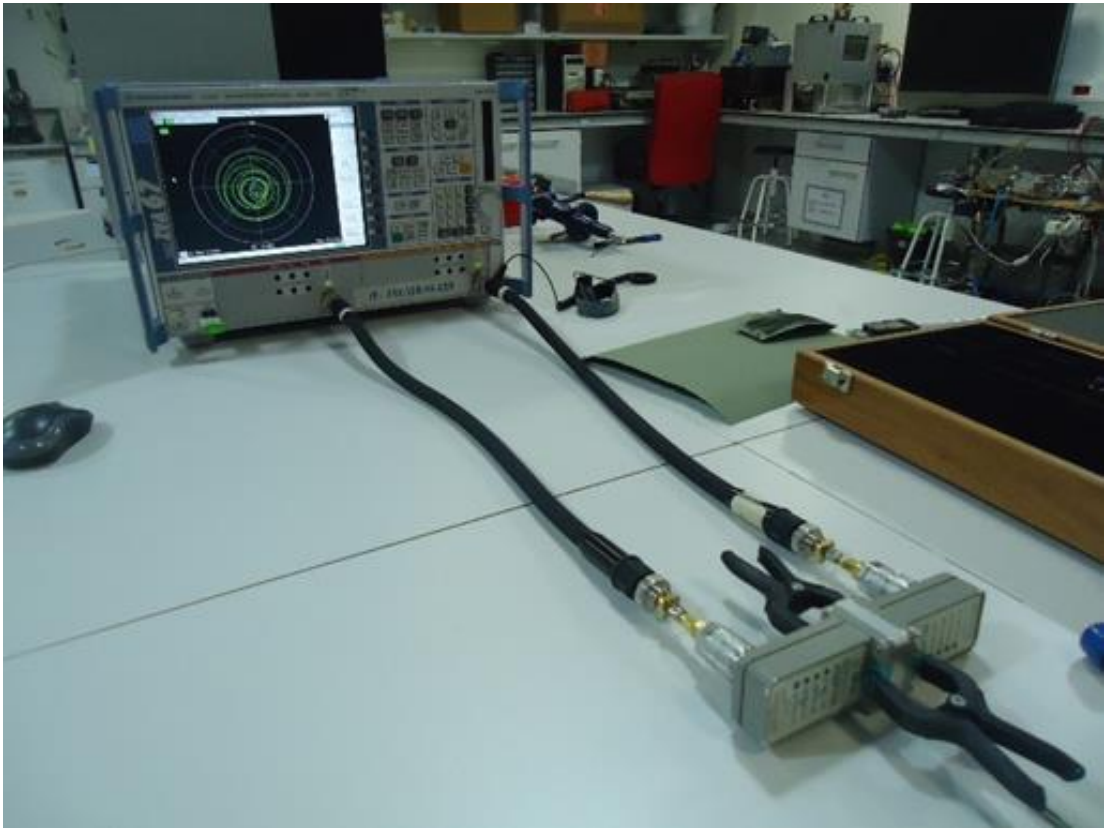


Figure II.7: Mesure du guide d'onde rectangulaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] T.Huber, P.Saville, D.Edward, 2003, investigations into the polyaniline and polypyrrole families of conducting polymers for application as Radar Absorbing Materials.DRDC Atlantic TM 2003-005.
- [2] Encyclopédie 2007.
- [3] A.Laforgue, Thèse de Doctorat, université de paris XII (2001).
- [4] D. C. Trivedi., Polyaniline, en : Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers. Vol 2, Conductive Polymers: Synthesis and Electrical Properties, H.S. Nalwa (Eds) John Willey & Sons Ltd. 1997.
- [5] Fang H., Mighri F., Aji A., Fluorescence quenching of phenanthrene and anthracene by maleic anhydride andn-octadecenylsuccinic anhydride in solution and in bulk polypropylene. Polymer Engineering & Science. 2007;47(2): 192-199.
- [6] A. Moliton, R.C. Hiorns, Review of electronic and optical properties of semiconducting p-conjugated polymers: applications in optoelectronics, Polymer International 53 (10). (2004): 1397–1412.
- [7] T. Kim, J. Kim, Y. Kim, T. Lee, W. Kim, K. S. Suh, Preparation and characterization of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) using partially sulfonated poly(styrene-butadiene-styrene) triblock copolymer as a polyelectrolyte Current Applied Physics 9 . (2009): 120–125.
- [8] L. Kergoat, B. Piro, D. T. Simon, M. C. Pham, V. Noel and M. Berggren, Adv. Mater.2014; 26: 5658.
- [9] E. Stavrinidou, P. Leleux, H. Rajaona, D. Khodagholy, J. Rivnay, M. Lindau, S. Sanaur and G. G. Malliaras, Adv. Mater. 2013; 25: 4488-4493.
- [10] Kirchmeyer,S.;Reuter,K. ; J.Mat.Chem..2005; 15(21): 2077.
- [11] Roman, L. S.; Andersson, M. R.; Yohannes, T and Inganaes, O. Adv. Mater.1997; 9: 1164.
- [12] Heuer, H. W.; Wehrmann, R and Kirchmeyer, S. Adv. Funct. Mater. 2002; 12: 89.
- [13] Brabec, C. J.; Sariciftci, N. S and Hummelen, J. C. Adv. Funct. Mater.2001; 11: 15.
- [14] Akelah, A.; Moet, A.; J.App. Polym. Sci, App. Polym, Symp, 1994; 55: 3
- [15] Akelah, A.; Salahuddin, N.; Hilthners, A.; Baer, E.; Moet, A.; Nanostructured Materials. 1994; 4: 3.
- [16] Kim, J.W.; Lin, F.; Choi, H. J.; Hong, S. H.; J. Joo, Polymer, 44. 2003: 289-293.
- [17] Giannelis, E. P.; Krishnamoorti, R.; Manias. Adv. Polym. Sci. 1999; 138:107.
- [18] Varia, R. A.; Krishnamoort, R.; In Polymer Nanocomposites: Synthesis c haracterization and Modeling; R. Krishnamoort, R. A. Varia, Eds; American chemical Society:Washington, DC. 2001:1.

- [19] Megherbi A., Thèse de Doctorat, Université d'Oran.2006.
- [20] R. Corradi, S.P. Armes, *Synth. Met.*, 84.1997: 453-454.
- [21] F. Jonas, G. Heywang, *Electrochimica Acta*, 39. 1994:1345-1347.
- [22] Y. Kudoh, K. Akami, Y. Matsuya, *Synth. Met.*, 98. 1998: 65-70.
- [23] A. Aleshin, R. Kiebooms, R. Menon, F. Wudl, A.J. Heeger, *Phys. Rev B*, 56. 1997: 3659-3663.
- [24] A. Aleshin, R. Kiebooms, R. Menon, A.J. Heeger, *Synth. Met.*, 90.1997: 61-68.
- [25] A. Aleshin, R. Kiebooms, H. Yu, M. Levin, I. Shlimak, *Synth. Met.*, 94. 1998 : 157-159.
- [26] A.Wooley, R.Symes, A.Clark «encyclopédie des minéraux ». (1985).
- [27] D. Grunberger, « Etude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction », Thèse Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. (1995).
- [28] www.springer.com Home New & Forthcoming Titles D , Fichou., G, Horowitz and F, Garaier, *Springer Series in Solid-State Science*. 1991;107: 452.
- [29] M. Belbachir et A. Bensaoula composition and method for catalysis using bentonites; US Patent N° 7,094,823; Aug, 22, (2006).
- [30] A. Rahmouni, A. Harrane and M. Belbachir, Structure and Physicochemical Properties of Polyaniline Synthesized in Presence of Maghnite clay Catalyst layered (Algerian Montmorillonite), *Research Journal of Material Sciences*, 1. (2013): 1-6.
- [31] Dumont M., (2009); *Annuaire des minéraux du Canada (AMC)* ; [en ligne] ; cité le 25/06/2014 sur www.nrcan-rncan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/cmy-amc/com-fra.htm.
- [32] M. Lacroix, Étude de l'effet modérateur de sels sur la réaction sodium-eau, pour le "lavage" d'assemblages de combustible irradiés issus de réacteurs à caloporteur sodium, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris. 2014: p23.
- [33] Samuel Hémerly, Influence du sodium liquide sur le opoteet éaiue de l'aie T91, Thèse de doctorat, École centrale Paris. 2013: p40.
- [34] www.wikipedia.org/wiki/Analyseur_de_réseau.
- [35] S. Geetha, , K.K. Satheesh Dumar, C.R.K. Rao, M. Vijayan, D.C.J. Trivedi, "EMI shielding: Methods and materials-A review" , *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol 112 No. 4. 2009: 2073-2086.
- [36] www.electronicsspecifier.fr/test-mesure/six-techniques-de-mesure-des-propri-t-s-di-lectriques.
- [37] B. Amana et J. L. Lemaire, Propagation d'une onde électromagnétique dans un guide d'onde rectangulaire, Licence de Physique, Université de Cergy-Pontoise: p2.

- [38] E.Drakakis, E.Kymakis, G.Tzagkarakis, D.Louloudakis, M.Katharakis, G.Kenanakis, M.Suchea, V.Tudose, E.Koudoumas, "A study of the electromagnetic shielding mechanisms in the GHz frequency range of graphene based composite layers", *Appl. Surf. Sci.* 2017; Vol 398: 15-18.
- [39] A.J. Lozano-Guerrero, F.J. Clemente-Fernández, J. Monzó-Cabrera, J.L. Pedreño-Molina, A. Díaz-Morcillo, "Precise evaluation of coaxial to waveguide transitions by means of inverse techniques", *IEEE Trans. Microw. Theory.* 2010; Vol 58, No. 1: 229 – 235.

Chapitre III

Résultats et discussions

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons, tout à bord, présenter les résultats de la permittivité diélectrique du (PEDOT-Mg-Na⁺) que nous avons acquis à l'aide de la sonde diélectrique. Ensuite, les effets 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 internes multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique en utilisant la théorie de la ligne de transmission donnée dans le chapitre 1 ainsi que les résultats expérimentaux que nous avons obtenus.

1. Permittivité du (PEDOT-Mg-Na⁺)

Les parties réelle et imaginaire de la permittivité du (PEDOT-Mg-Na⁺), fournies par le kit sonde diélectrique, sont représentées par la figure (III.1).

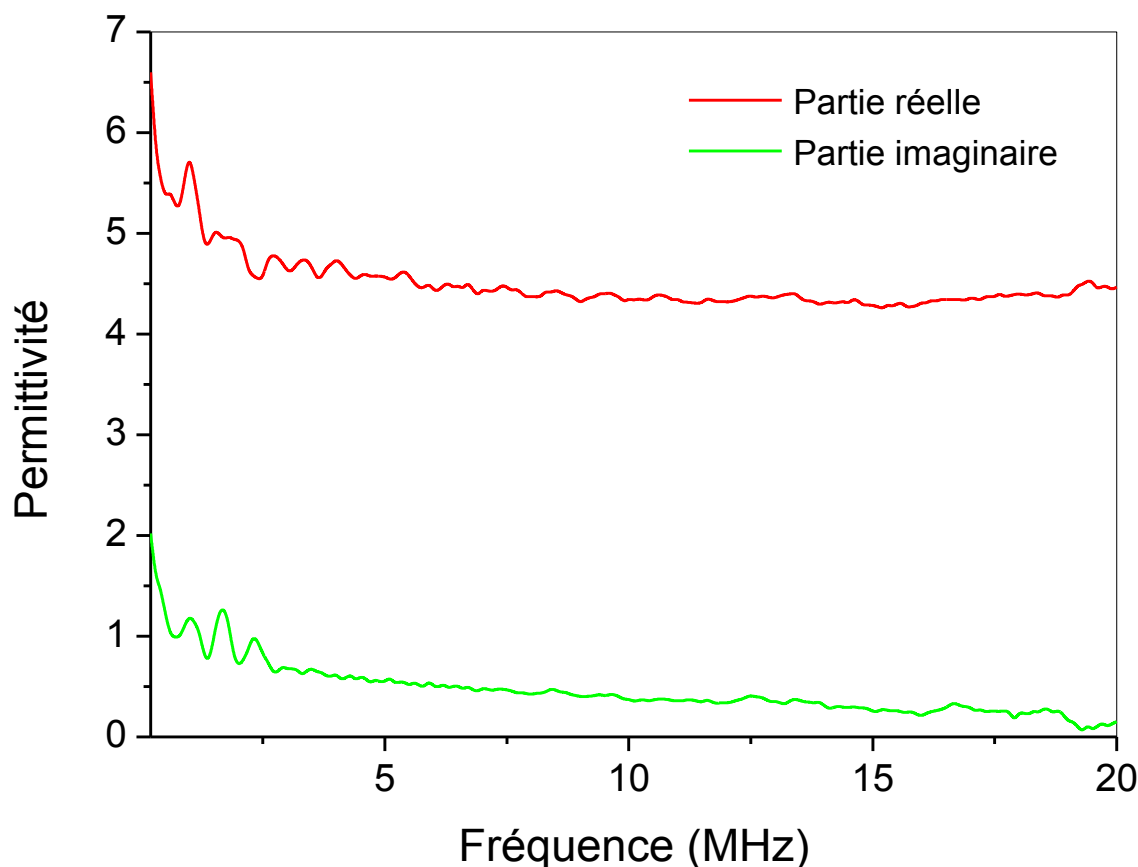


Figure III.1: Parties réelle et imaginaire de la permittivité du (PEDOT-Mg-Na⁺).

La conductivité du matériau est donnée par $\sigma = 2\pi f_0 \varepsilon_0 \varepsilon''$, où f_0 est la fréquence de mesure, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité de l'espace libre et ε'' est la partie imaginaire de la constante diélectrique complexe mesurée du (PEDOT-Mg-Na⁺) [1]. Les valeurs moyennes de la conductivité et la permittivité sont, respectivement, $\sigma = 0,211$ S/m et $\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'' = 4,36 - i0,38$.

La conductivité a également été mesurée avec la méthode des quatre points et la valeur obtenue est $\sigma = 0.173$ S/m [2].

Nous définissons de deux intervalles de variation de fréquences; basses et hautes fréquences par rapport à une fréquence appelée, fréquence de coupure f_c . Cette dernière correspond à l'égalité entre l'épaisseur d_j de la couche et son épaisseur de peau δ_j , tel que [3]:

$$d_j = \sqrt{\frac{1}{\sigma_j \mu_j \pi f_c}} \quad (\text{III. 1})$$

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

La conductivité, la perméabilité relative, la fréquence de coupure ainsi que l'épaisseur de (PEDOT-Mg-Na⁺) sont listés dans le tableau suivant:

Conductivité σ [S.m ⁻¹]	Perméabilité relative μ_r	Fréquence de coupure f_c [GHZ]	Epaisseur d [mm]
0,211	1	9,73	1,55

Tableau III.1: Conductivité électrique, perméabilité relative, fréquence de coupure et épaisseur de (PEDOT-Mg-Na⁺).

2. Propriétés du blindage électromagnétique du (PEDOT-Mg-Na⁺)

Dans cette partie, nous présentons les résultats expérimentaux, rapportés par le guide d'onde rectangulaire, des propriétés du blindage électromagnétique du (PEDOT-Mg-Na⁺), à savoir, l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexion internes multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique. Aussi, ces résultats seront comparés avec leurs homologues obtenus en utilisant la théorie de la ligne de transmission.

2.1. 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 polarisations: électrique et magnétique.

a- Effet de la fréquence

L'atténuation par réflexion d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) a été mesurée, en utilisant le guide d'onde rectangulaire, dans une gamme de fréquence allant de 9 jusqu'à 11 GHz. Les résultats de ces mesures ainsi que celle obtenu en utilisant l'expression (I.23), sont présentés sur la figure (III.2). Nous constatons que l'atténuation par réflexion, dans cette gamme de fréquences, est d'environ 2 dB.

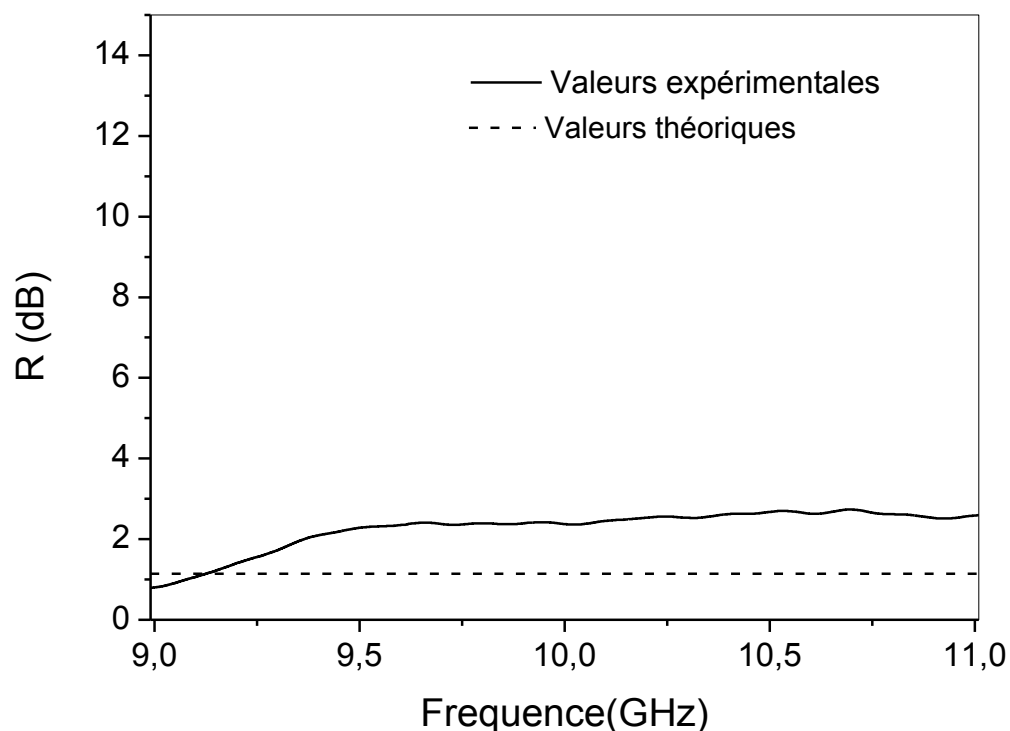


Figure III.2: Atténuation par réflexion de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de la fréquence.

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.3), en utilisant la relation (I.23), l'atténuation par réflexion d'un blindage monocouche à base de (PEDOT-Mg-Na⁺). Nous observons que l'atténuation par réflexion est à 23,95 dB à une fréquence de 10⁶ Hz puis elle diminue

considérablement jusqu'à la valeur de 1,159 dB pour une fréquence de 10^9 Hz. A base fréquences, les ondes électromagnétiques sont fortement réfléchies à cause de la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde et la barrière du blindage électromagnétique. Mais avec l'augmentation de la fréquence, l'atténuation par réflexion diminue. A base fréquences l'atténuation par réflexion est plus importante.

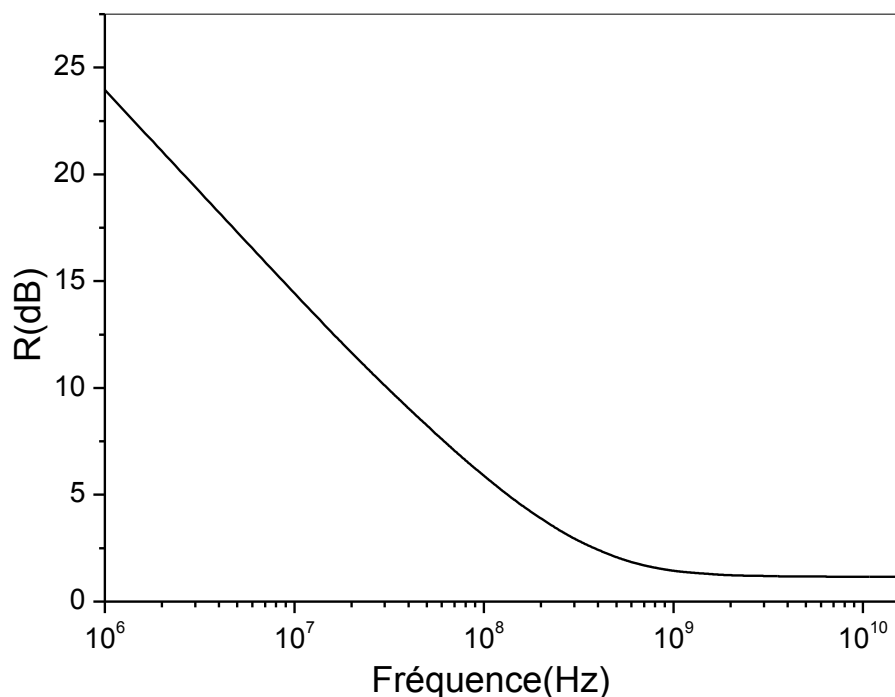


Figure III.3: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de la fréquence.

La variation de l'atténuation par réflexion d'une monocouche de (PEDOT-Mg- Na^+) est illustrée, en utilisant l'équation (I.23), sur la figure (III.4) en fonction de la fréquence à une incidence normale; $\theta = 0^\circ$ et des deux incidences obliques; $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$.

Nous observons une chute considérable de l'atténuation par réflexion avec l'augmentation de la fréquence. Ceci est un effet de la relation proportionnelle qui existe entre l'impédance du blindage et la fréquence.

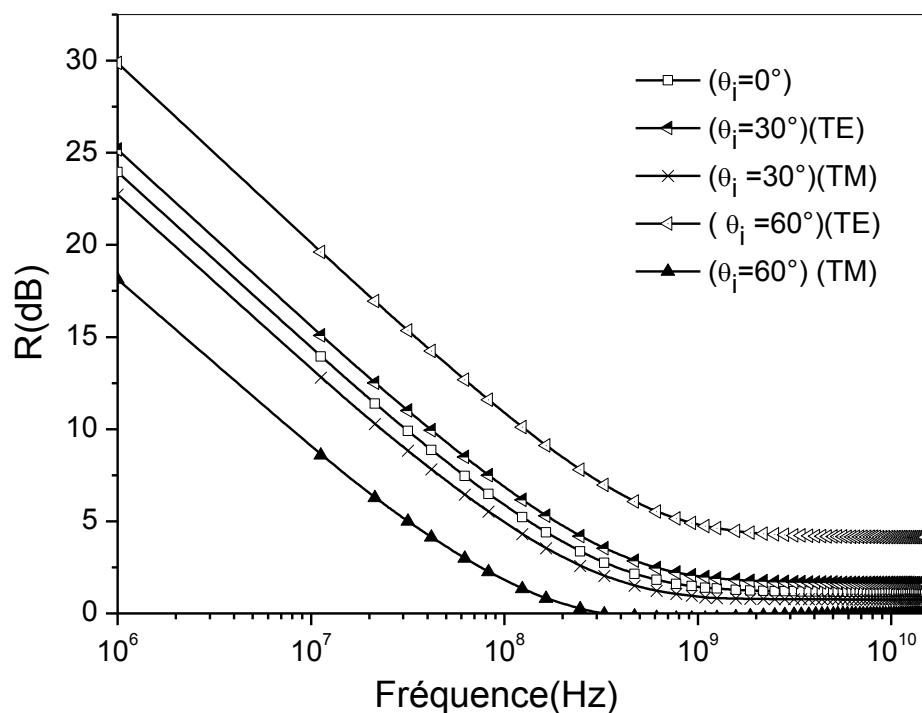


Figure III.4: Variation de l'atténuation par réflexion de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

b- Effet de l'angle d'incidence

L'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence et de la polarisation est illustrée, en utilisant l'expression (I.23), sur la figure (III.5). Pour des valeurs de $\theta = 0^\circ$ à $\theta = 25^\circ$, l'atténuation par réflexion est indépendante de l'angle d'incidence. Au-dessus de ces valeurs, l'atténuation par réflexion augmente pour la polarisation transversale électrique et diminue pour la polarisation transversale magnétique jusqu'à $\theta = 70^\circ$, ensuite tend à se croître. Ceci doit être nécessairement dû à la faible conductivité électrique du matériau.

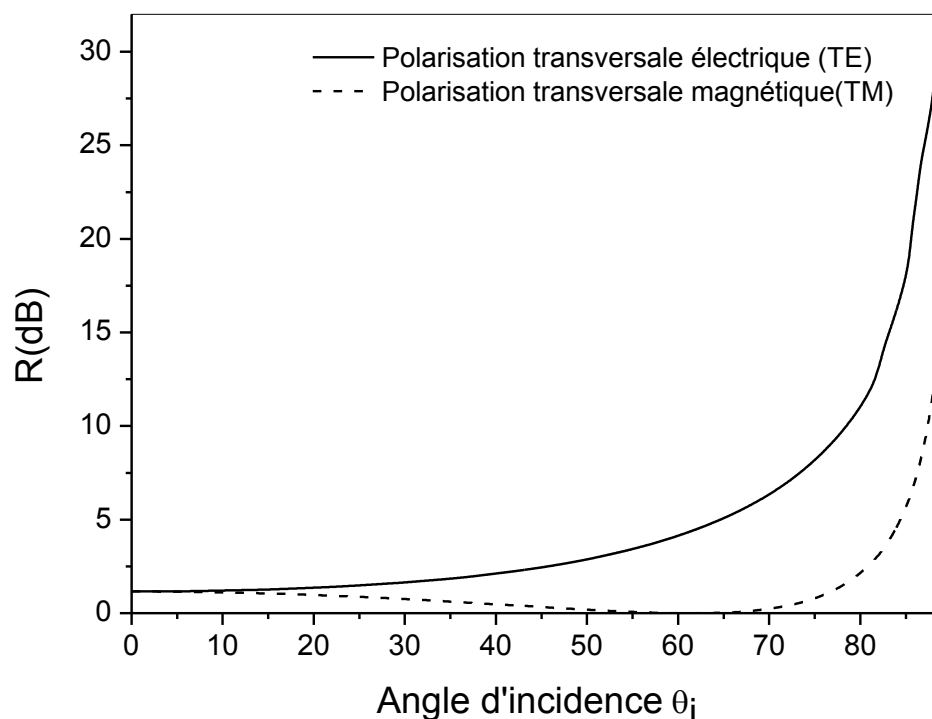


Figure III.5: Variation de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 15 GHz.

2.2. Atténuation par réflexions internes multiples

Nous allons analyser l'atténuation par réflexion internes multiples en fonction de l'angle d'incidence et de la fréquence.

a- Effet de la fréquence

Sur la figure (III.6), nous avons tracé l'atténuation par réflexion internes multiples, en fonction de la fréquence, d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) en utilisant la relation (I.25).

Nous remarquons que l'atténuation par réflexion internes multiples possède des valeurs négatives, ce qui réduit l'efficacité du blindage. Avec l'augmentation de la fréquence, elle se réduit jusqu'à son annulation à la fréquence de coupure f_c (donnée dans le tableau III.1).

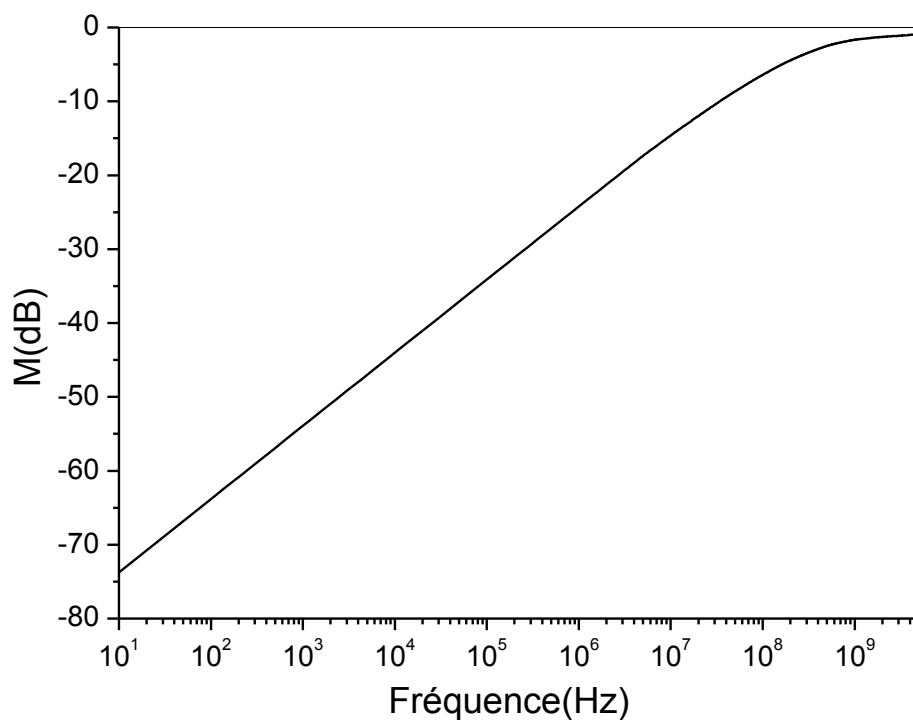


Figure III.6: Variation de l'atténuation par réflexion internes multiples en fonction de la fréquence.

b- Effet de l'angle d'incidence

Pour connaître l'effet de l'angle d'incidence, nous avons tracé sur la figure (III.7), en utilisant la relation (I.25) les réflexions internes multiples d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺). Nous constatons que l'atténuation par réflexion internes multiples augmente pour la polarisation transversale électrique et diminue pour la polarisation transversale magnétique.

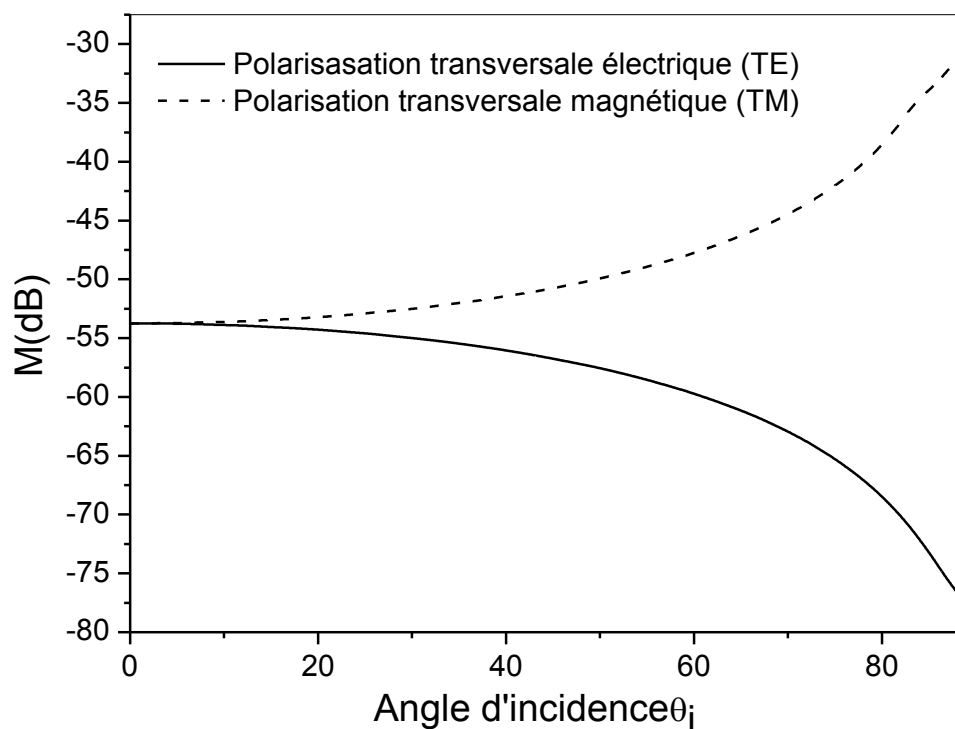


Figure III. 7: Variation de l'atténuation par réflexion internes multiples en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de $10^3 Hz$.

2.3. Perte par absorption

Dans cette partie, nous étudions l'effet de la fréquence sur la perte par absorption.

Les résultats expérimentaux fournis par le guide d'onde rectangulaire ainsi que leurs homologues théoriques, obtenus en utilisant la relation (I.24) sont illustrés sur la figure (III.8). Nous observons que, dans cette intervalle de variation de fréquences, et pour les valeurs expérimentales, la perte par absorption varie entre $6 dB$ et $3 dB$, alors que les valeurs théoriques demeurent, pratiquement, constantes.

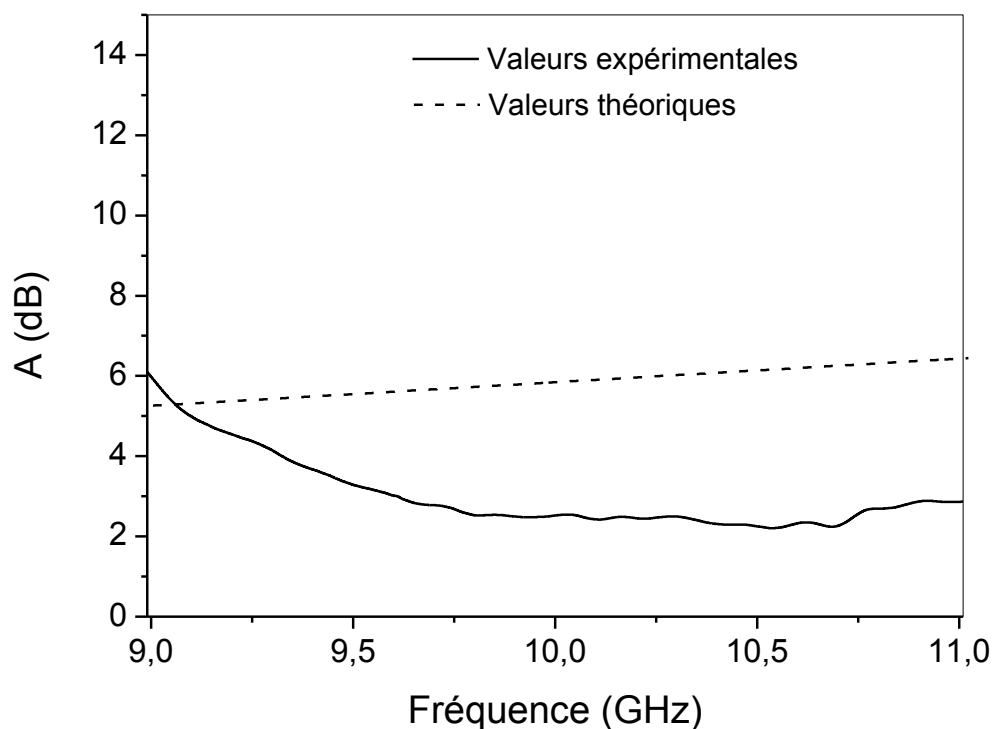


Figure III.8: Perte par absorption de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de la fréquence en utilisant le guide d'onde rectangulaire.

Dans la figure (III.9), nous avons représenté, en utilisant l'expression (I.24), la perte par absorption d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) dans un large intervalle de fréquences allant de 10^6 jusqu'à $15 \cdot 10^9$ Hz. Nous remarquons que la perte par absorption est négligeable pour les faibles fréquences jusqu'à 10^8 Hz, ensuite elle augmente exponentiellement avec la fréquence jusqu'à atteindre la valeur 8 dB à la fréquence $1,2 \cdot 10^9$ Hz.

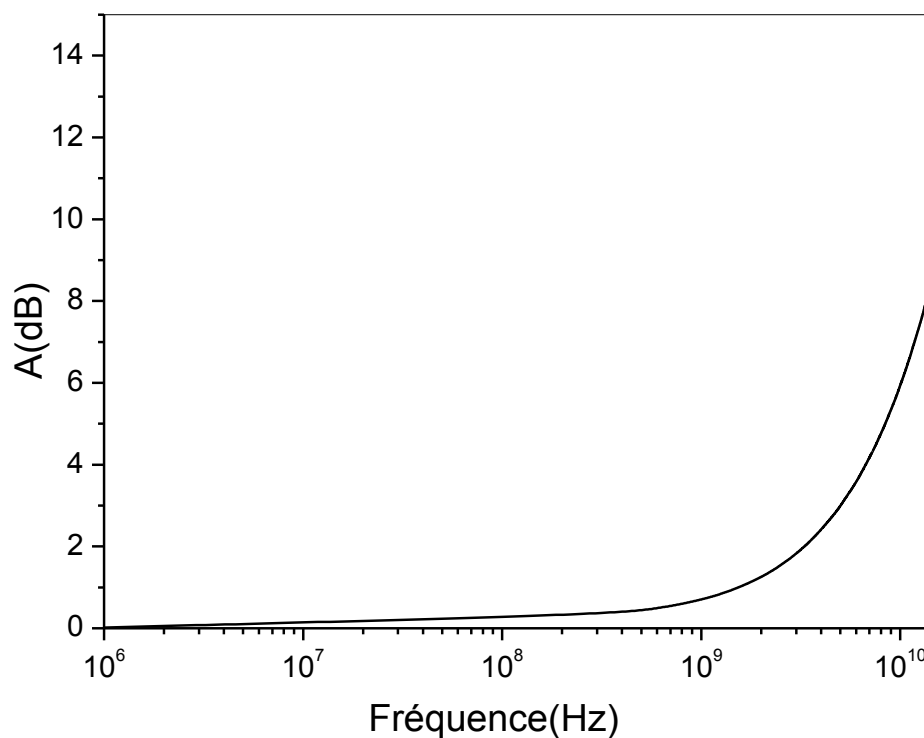


Figure III.9: Variation de la perte par absorption d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺).

2.4. Efficacité du blindage électromagnétique

L'efficacité du blindage électromagnétique est analysée en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence.

a- Effet de la fréquence

La figure (III.10) décrit la variation de l'efficacité du blindage électromagnétique d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) en utilisant le guide d'onde rectangulaire dans la gamme de 9 à 11 GHz. Nous constatons que l'efficacité du blindage, dans cette intervalle de variation de fréquences, et pour les valeurs expérimentales, varie entre 6,9 dB et 5,8 dB, alors que les valeurs théoriques varient entre 6 et 7 dB.

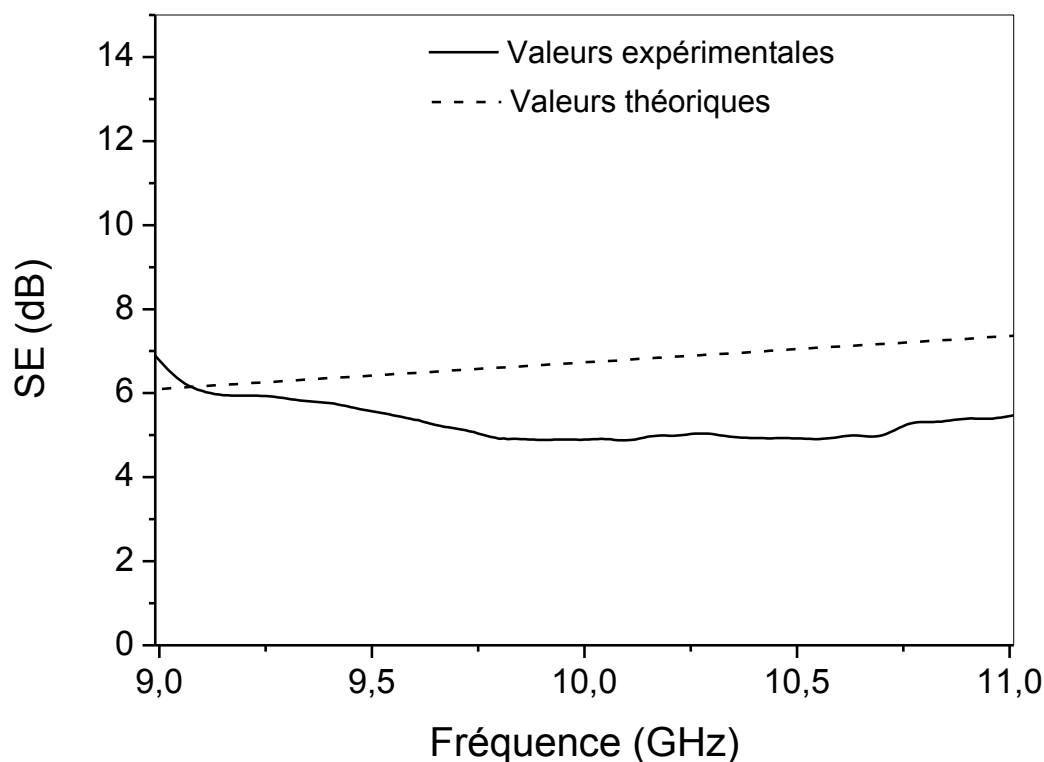


Figure III.10: Efficacité du blindage électromagnétique de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de la fréquence.

Afin d'élargir le domaine de variation de la fréquence, l'efficacité du blindage d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) est représentée, en utilisant l'expression (I.22), sur la figure (III.11), en fonction de la fréquence. Nous constatons qu'à des fréquences inférieures à la fréquence de coupure ($f_c = 9,73 \text{ GHz}$) l'efficacité du blindage est très faible et est pratiquement indépendante de la fréquence. A des fréquences supérieures à f_c , nous remarquons que l'efficacité du blindage augmente exponentiellement avec la fréquence jusqu'à atteindre la valeur de 11 dB à la fréquence 15 GHz. En effet, à cause de l'effet de peau et à des fréquences élevées, nous assistons à une pénétration superficielle de l'onde électromagnétique.

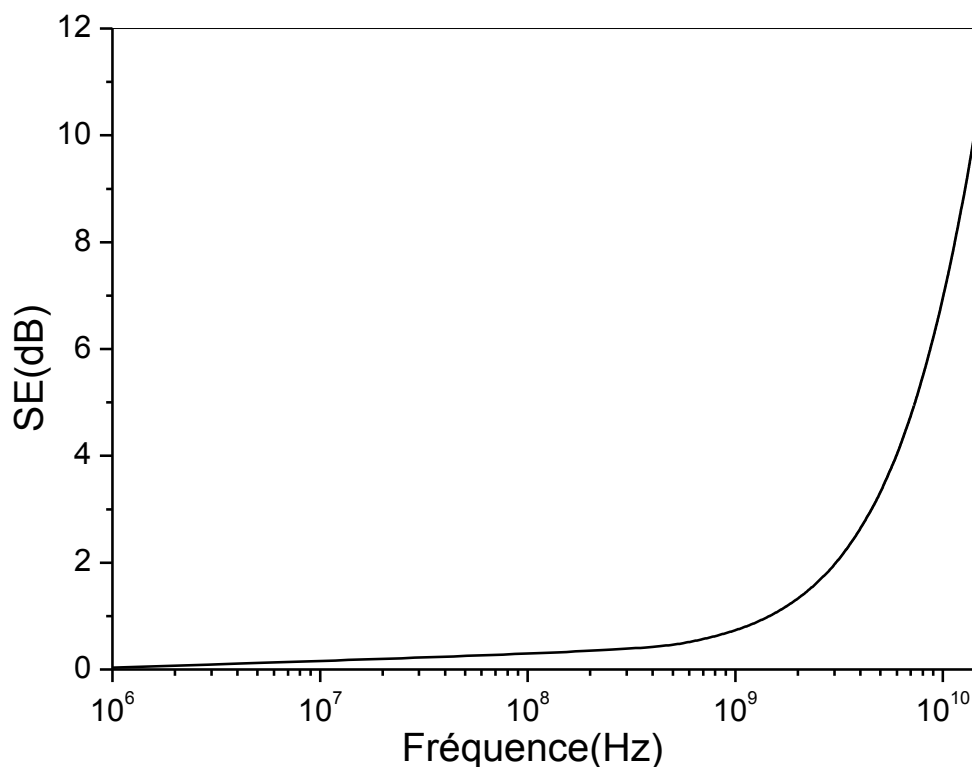


Figure III.11: Variation de l'efficacité du blindage électromagnétique en fonction de la fréquence.

La variation de l'efficacité du blindage d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) en utilisant l'équation (I.22), est représentée sur la figure (III.12) en fonction de la fréquence à une incidence normale ($\theta = 0^\circ$) et des incidences obliques ($\theta = 30^\circ, 60^\circ$). L'efficacité du blindage possède des valeurs importantes avec l'augmentation de l'angle d'incidence pour une polarisation transversale électrique, ceci n'est pas vérifié en cas d'une polarisation transversale magnétique.

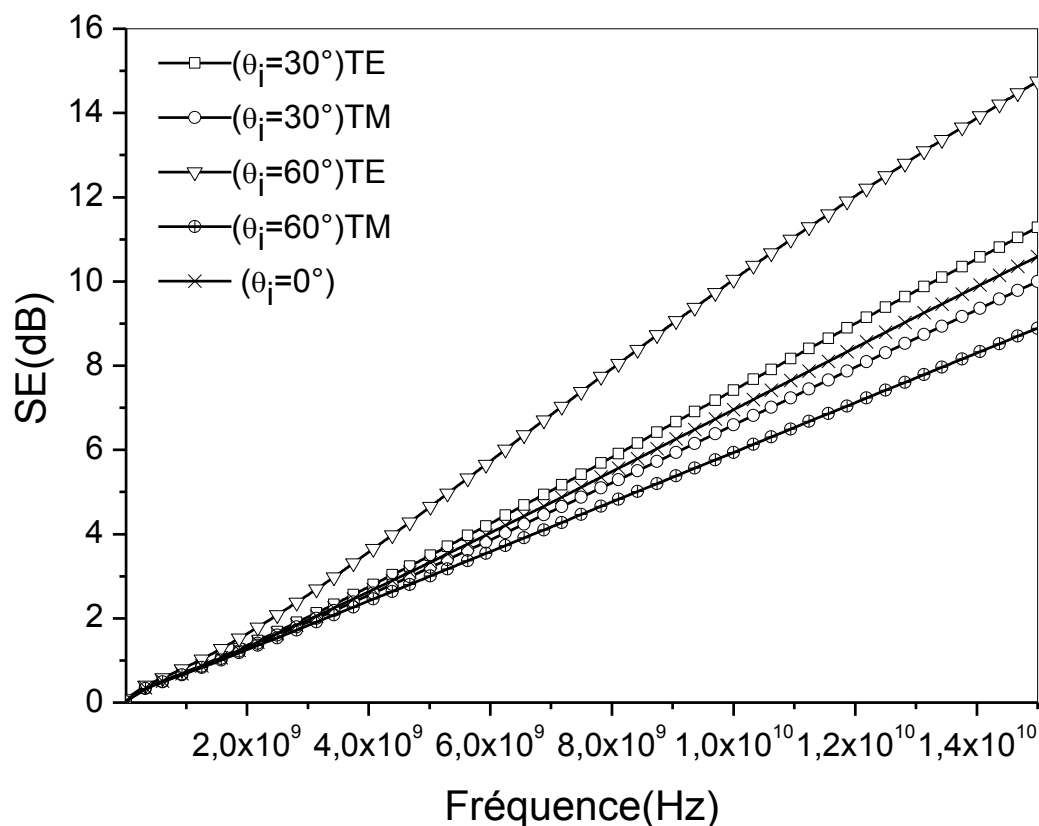


Figure III.12: Variation de l'efficacité du blindage d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de la fréquence pour différentes de valeurs d'angle d'incidence.

b- Effet de l'angle d'incidence

La figure (III.13) montre la variation de l'efficacité du blindage d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) en fonction de l'angle d'incidence, tracée en utilisant la relation (I.22). Nous observons qu'à des faibles angles allant de $\theta = 0^\circ$ jusqu'à $\theta = 15^\circ$, 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, jusqu'à $\theta = 70^\circ$, puis une augmentation en dépassant cet angle.

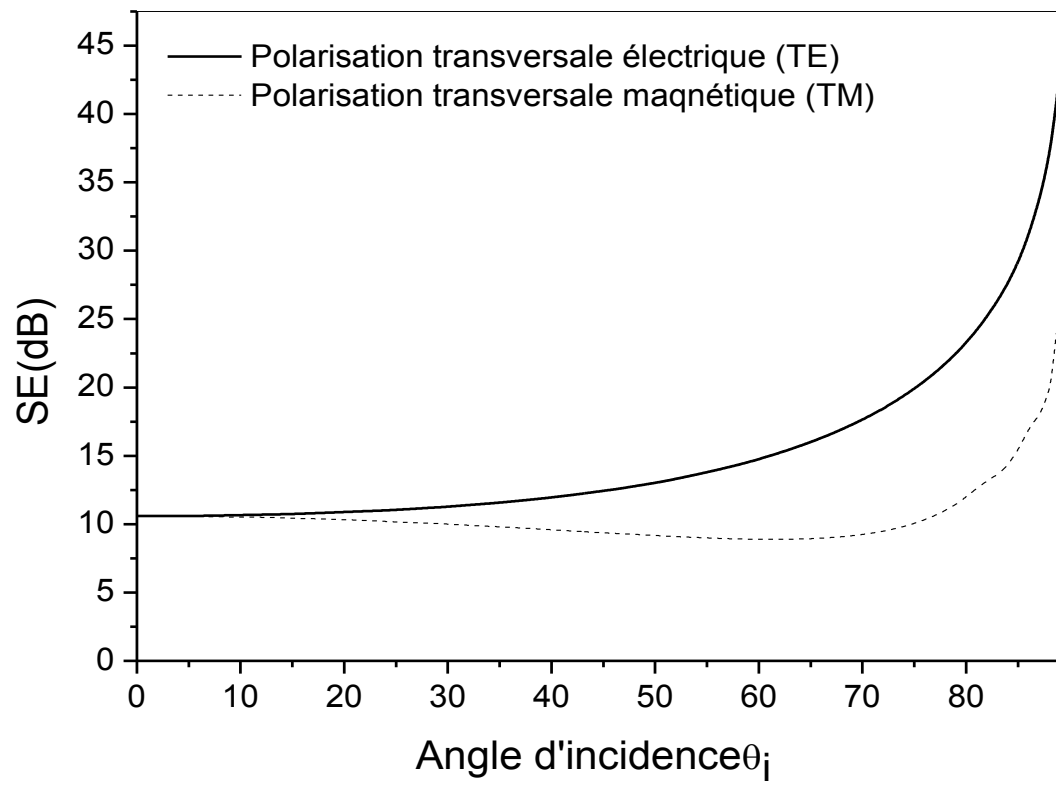


Figure III.13: Variation de l'efficacité du blindage en fonction de l'angle d'incidence pour une fréquence de 15 GHz.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Benhamou S. M, Measurement and investigation of electromagnetic shielding properties of 3,4 ethylenedioxythiophene – Maghnite – Sodium, IEEE proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands. August 27-30, 2018.
- [2] Yemouna M, Synthèses et caractérisations des polymères conducteurs composites Polypyrrole /Maghnite. Mémoire de magister, Université d’Oran Es-Senia.
- [3] Benhamou S.M, 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; p8.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous avons mesuré et analysé les caractéristiques du blindage électromagnétique ainsi que la permittivité diélectrique complexe d'un polymère conducteur composite constitué du 3, 4 éthylènedioxythphène (PEDOT) associé à la Maghnite et au Sodium.

La problématique traitée s'articule autour des effets de la fréquence, de l'angle d'incidence et la polarisation d'une onde électromagnétique sur l'atténuation par réflexion, perte par absorption, l'atténuation par réflexion internes multiples et l'efficacité du blindage électromagnétique. Nous avons commencé notre mémoire par une introduction générale dans laquelle le problème étudié a été posé. 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 caractéristiques du blindage électromagnétique et la permittivité diélectrique complexe. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

L'étude théorique des caractéristiques du blindage électromagnétique est effectuée en utilisant la théorie de la ligne de transmission. Les mesures expérimentales de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique d'une couche de (PEDOT-Mg-Na⁺) sont acquises à l'aide du guide d'onde rectangulaire associé à l'analyseur de réseau vectoriel dans une gamme de fréquence allant de 9 jusqu'à 11 GHz. Ensuite, et dans le but d'élargir le domaine de fréquence, nous avons tracé et analysé ces trois quantités en utilisant les expressions fournies par la théorie de la ligne de transmission entre les fréquences 10^6 et $15 \cdot 10^9 Hz$.

En fonction de la fréquence, nous avons constaté que l'atténuation par réflexion est importante à faibles fréquences et que la perte par absorption est dominante pour les fréquences élevée. Pour l'atténuation par réflexion internes multiples, elle tente à diminuer en s'approchant de la fréquence de coupure.

En fonction de l'angle d'incidence, nous avons constaté que pour des valeurs de ($\theta = 0^\circ$) à ($\theta = 25^\circ$), l'atténuation par réflexion et l'efficacité du blindage électromagnétique sont indépendante de l'angle d'incidences. Au-dessus de ces valeurs, elles augmentent pour la polarisation transversale électrique et diminuent pour la polarisation transversale magnétique jusqu'à ($\theta = 70^\circ$) où elles subissent une élévation en dépassant cet angle.