

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD DE TLEMCEM
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE CHIMIE**

**LABORATOIRE DE RECHERCHE
SUR LES MACROMOLECULES (LRM)**



MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER

Option: Systèmes macromoléculaires et leurs applications

Par

Mme. Nadia BELARBI

Sur le Thème

**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Soutenu, publiquement, le 25 juin 2014 devant le jury composé de:

Président:	Pr. Amina NEGADI
Examineur:	Pr. Abdelkader BERRAYAH
Encadreur:	Dr. Mohammed HAMOUNI



Dédicaces



À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

À MA MÈRE

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À LA MEMOIRE DE MON PÈRE ALLAH YARHMOU

J'aurais tant aimé que vous soyez présent.

Que Dieu ait votre âme dans sa sainte miséricorde et vous fasse entrer au Paradis.

A MES CHERS ET ADORABLES FRÈRE ET SOEURS

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde
tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de
bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège
et vous garde.*

À MES CHERS ENFANTS

*Abdellah et Nada Assil, aucune dédicace ne saurait exprimer
tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté me
combient de bonheur.*

*Que Dieu vous garde, éclaire votre chemin et vous aide à réussir et
réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.*

À MES AMIS

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passé ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

*UNE SPECIALE DEDICACE A CETTE PERSONNE QUI
COMPTÉ ENORMEMENT POUR MOI,
ENVERS QUI JE SUIS TRÈS RECONNAISSANTE,
ET POUR QUI JE PORTE BCP
DE TENDRESSE ET DE RESPECT.*

A TOI FEIHI

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au laboratoire de recherche sur les macromolécules sous la direction de Monsieur Mohammed HAMOUNI, maître de conférences à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude pour ses fructueuses orientations, ses conseils avisés, ses encouragements continus et le temps qu'il m'a consacré durant la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais remercier vivement Melle Amina NEGADI, professeur à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Monsieur Abdelkader BERRAYAH, professeur à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, a bien voulu examiner ce travail qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de formation pédagogique du master systèmes macromoléculaires et leurs applications pour les efforts fournis pendant ce master.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont apporté aide et soutien au cours de la réalisation du présent mémoire.

Je souhaite enfin remercier tous mes collègues et le personnel du laboratoire de recherche sur les macromolécules.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	04
CHAPITRE I: CONCEPTS GENERAUX	
1. INTRODUCTION.....	06
2. POLYMERES CONDUCTEURS.....	06
2.1 Polymères conducteurs intrinsèques.....	06
2.1.1 Principe de dopage.....	07
2.1.2 Méthodes de dopage.....	07
2.1.2.1 Dopage chimique.....	07
2.1.2.2 Dopage électrochimique.....	08
2.2 Polymères conducteurs composites.....	08
3. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE.....	10
3.1 Champ électrique.....	10
3.2 Champ magnétique.....	10
4. ONDE ELECTROMAGNETIQUE.....	11
4.1 Polarisation d'une onde électromagnétique.....	11
4.2 Impédance des ondes électromagnétiques.....	12
5. COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE.....	12
6. SUSCEPTIBILITE ELECTROMAGNETIQUE.....	13
7. BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE.....	14
7.1 Type de blindage.....	15
7.1.1 Les enceintes blindées.....	16
7.1.2 Blindage des connecteurs.....	16
7.1.3 Blindage des câbles.....	16
8. EFFICACITE D'UN BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE.....	16
9. MATERIAUX DU BLINDAGE.....	18
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	19

CHAPITRE II: FORMALISME MATHEMATIQUE

1. INTRODUCTION.....	22
2. ATTENUATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE.....	22
3. IMPEDANCE CARACTERISTIQUE DU BLINDAGE.....	23
4. COEFFICIENT DE REFLEXION.....	29
REFEERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	31

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION.....	33
2. BLINDAGE MONOCOUCHE.....	34
2.1 Effet de l'angle d'incidence.....	34
2.2 Effet de la conductivité électrique.....	37
2.3 Effet de la fréquence.....	39
3. BLINDAGE BICOUCHES.....	42
3.1 Effet de l'angle d'incidence.....	42
3.2 Effet de la conductivité électrique.....	45
3.3 Effet de la fréquence.....	47
CONCLUSION GENERALE.....	50
PERSPECTIVES.....	52

INTRODUCTION GENERALE

Il y a quelques décennies, l'idée de remplacer les matériaux conducteurs et semi-conducteurs classiques (inorganiques) tels que le cuivre, l'aluminium et le silicium par des polymères aurait paru complètement illogique. En effet, on associe souvent la notion d'isolant électrique au concept de plastique[1]. Ce type de matériau ayant été principalement utilisé par l'industrie jusqu'à une époque récente pour des applications où une conductivité électrique serait une gêne: matériaux polymères pour les besoins ménagers, isolants pour câbles électriques[1, 2].

A partir de 1960, les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux systèmes organiques conjugués ayant des propriétés semi-conductrices. Depuis 1974, les travaux sur les polymères conducteurs ont pris une importance exceptionnelle qui les place parmi les sujets de pointe de la science des matériaux[3]. C'est le japonais *Schirakawa* de l'institut de technologie de Tokyo, travaillant avec *Ikeda* qui réussit pour la première fois à synthétiser du polyacétylène sous forme d'un film.

Quelques années plus tard (1977) *Schirakawa* associé à deux américains de l'université de *Pennsylvanie* à *Philadelphie*, les professeurs *Mac-Diarmid* et *Heeger*, montrent que par un simple dopage de polyacétylène avec des espèces chimiques « donneurs » (dopage de type n) ou « accepteurs » (dopage de type p) on passait de l'état isolant à l'état conducteur avec une très bonne conductivité électrique, de l'ordre de 10^5 S/m[4]. Les polymères conducteurs présentent un intérêt réel pour les applications contre les ondes électromagnétiques et dans le domaine des revêtements antistatiques et pour le blindage électromagnétique. Ces polymères présentent l'avantage d'être légers, résistants à la corrosion, faciles à mettre en œuvre par des procédés industriels peu coûteux[5].

Ces matériaux organiques ayant une conductivité électrique très importante, sont largement répandus dans les applications du type écrans électromagnétiques pour les dispositifs électriques ou de l'élimination de la charge électrostatique dans les composants électroniques en vue de leur protection. Grace à la capacité d'absorption des ondes radio, ces matériaux sont aussi utilisés pour les ouvertures radars. Un grand intérêt est suscité par les polymères chargés par des inclusions piézoélectriques (par exemple: le titanate de baryum et le trioxyde de vanadium); de tels composites sont utilisés dans l'industrie des capteurs[6].

Du fait de leur niveau élevé de conductivité (jusqu'à 500 S.cm^{-1}) et de leur constante diélectrique « modérée » (inférieure à celle des métaux), les polymères conducteurs absorbent les radiations électromagnétiques et sont, par conséquent, de bons candidats pour le blindage électromagnétique[7]. Ces propriétés sont particulièrement intéressantes pour le secteur militaire, notamment dans le domaine de la furtivité. Les champs électromagnétiques sont présents partout dans notre environnement puisqu'ils se créent autour de chaque équipement électrifié. Ces champs sont suffisamment intenses pour créer des problèmes de brouillage qui étaient confinés dans de grandes zones assez bien définies et situées dans le voisinage d'émetteurs fixes à grande puissance. Parmi les solutions de blindage électromagnétique, on peut concevoir et réaliser des écrans à l'aide de polymères conducteurs légers, stables avec le temps et peu coûteux[8-10] .

Le présent travail, est une contribution à l'étude de l'effet de l'angle d'incidence, la conductivité et la fréquence sur le coefficient de réflexion d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs.

Ce mémoire se subdivise en trois grands chapitres:

Le premier chapitre, est une présentation des concepts scientifiques, essentiels, que nous avons utilisés dans notre travail. Nous y rappelons les notions de polymères conducteurs, d'ondes électromagnétiques et de blindage électromagnétique. Ces notions

seront utilisées d'une manière directe ou indirecte dans la suite de ce mémoire.

Le deuxième chapitre, est un calcul mathématique détaillé de l'impédance caractéristique et du coefficient de réflexion d'un blindage électromagnétique avec l'introduction de la notion de la matrice caractéristique du matériau de blindage.

Le troisième chapitre, constitue notre apport personnel. Dans ce chapitre, nous examinons successivement les effets de l'angle d'incidence, de la fréquence de la source de rayonnement et de la conductivité électrique du matériau de blindage sur la réflexion d'un blindage électromagnétique monocouche à base du polyacétylène dopé et d'un blindage électromagnétique bicouche d'un blindage électromagnétique à base du nickel comme matériau absorbeur et le polyacétylène dopé comme polymère conducteur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. HAMOUNI, Contribution à l'étude théorique de la conductivité électrique des polymères conducteurs : cas du polymère conducteur composite polyéthylène/diborure de titane (PE/TiB₂), Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, (2006).
- [2] X. H. Yin, K. Kobayashi, K. Yoshino, H. Yamamoto, T. Watanuki and I. Isa, Percolation conduction in polymer composites containing Polypyrolecoated insulating polymer fiber and conducting polymer, Synth. Met., 69 (1995), 367-368.
- [3] V. I. Krinichnyi, 2 – mm wave band electron paramagnetic resonance spectroscopy of conducting polymers, Synth. Met., 128 (2002), 173-128.
- [4] Y. Meikang, Z.Xie, Z. An, Y. C. Li, N. X.Chen, Nonlinear electron – lattice interaction on excited states in polythiophene, J. of Physics and Chemistry of Solids, 64 (2003), 377-384.
- [5] M. Hamouni, S. Khaldi, application du modèle non linéaire de Marko Ledvij à l'étude du comportement électrique des polymères conducteurs composites, Revue des composites et des matériaux avancés 15 (2005), 157-172.
- [6] M. Hamouni, S. Khaldi, application des polymères conducteurs composites au blindage électromagnétique, Revue des composites et des matériaux avancés, Vol. 19 N° 2, (2009), 201-213.
- [7] S. Heddar, Etude comparative d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs composites en champs proche et lointain, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, (2011).

[8] M. Hamouni, S. Heddar, A. Ansri, S. Khaldi, A comparative study of electromagnetic shielding efficiency of composites conducting polymers in near and far-fields, *J. Mater. Environ. Sci.*, 5(3) (2014) 945-950.

[9] M. Hamouni, A. Ansri, S. Khaldi, Reflection and absorption contribution to the multilayer's electromagnetic shielding effectiveness, *Plastic and Polymer Technology*, sous press (2014).

[10] N. Miloud, Contribution à l'étude théorique de l'efficacité du blindage électromagnétique en champ proche: cas des polymères conducteurs composites, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, (2011).

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de concepts et de notions qui seront utilisés d'une manière directe ou indirecte dans la suite de ce mémoire. Dans cette partie qui constitue un support théorique pour notre étude, nous présentons des notions générales sur les polymères conducteurs, le champ électromagnétique, la compatibilité électromagnétique, les ondes électromagnétiques et le blindage électromagnétique. Cette partie, une précieuse aide pour mieux comprendre le phénomène du blindage électromagnétique à l'aide des polymères conducteurs.

2. POLYMERES CONDUCTEURS

Il existe trois familles de produits désignés sous le nom polymères conducteurs: les polymères conducteurs ioniques, les polymères conducteurs électroniques et les polymères conducteurs extrinsèques. Les deux premiers types de polymères conducteurs, font partie d'un premier groupe de polymères, dits intrinsèques, car ils sont directement rendus conducteurs grâce à un dopage électronique ou ionique des chaînes. L'autre groupe est celui des polymères, dits extrinsèques, plus couramment appelés polymères conducteurs chargés qui, comme leur appellation l'explique, sont des polymères classiques auxquels l'adjonction de charges métalliques ou de carbone leur confère un caractère conducteur[1,2].

2.1. Polymères conducteurs intrinsèques

Dans ce type de polymères conducteurs, la conductivité électrique résulte de l'alternance des liaisons simples et doubles sur la même chaîne carbonée; d'où l'appellation de polymères conjugués, et de leur dopage soit de type p ou de type n. Parmi les raisons qui limitent, actuellement, leur domaine d'application, on cite leur instabilité à l'humidité et à l'oxygène[3,4].

2.1.1. Principe de dopage

Doper un polymère conjugué consiste généralement à donner (réduire) ou extraire (oxyder) de celui-ci des électrons. Ce mécanisme provoque des modifications géométriques de la structure des molécules et par voie de conséquence, la modification des propriétés électroniques (conductivité) et optiques (couleur) des polymères. Notons que le processus de dopage est réversible; en effet, il est possible de retrouver le polymère précurseur avec peu ou pas de dégradation. Le dopage et le «dédopage» peuvent être obtenus par des méthodes chimiques ou électrochimiques[4].

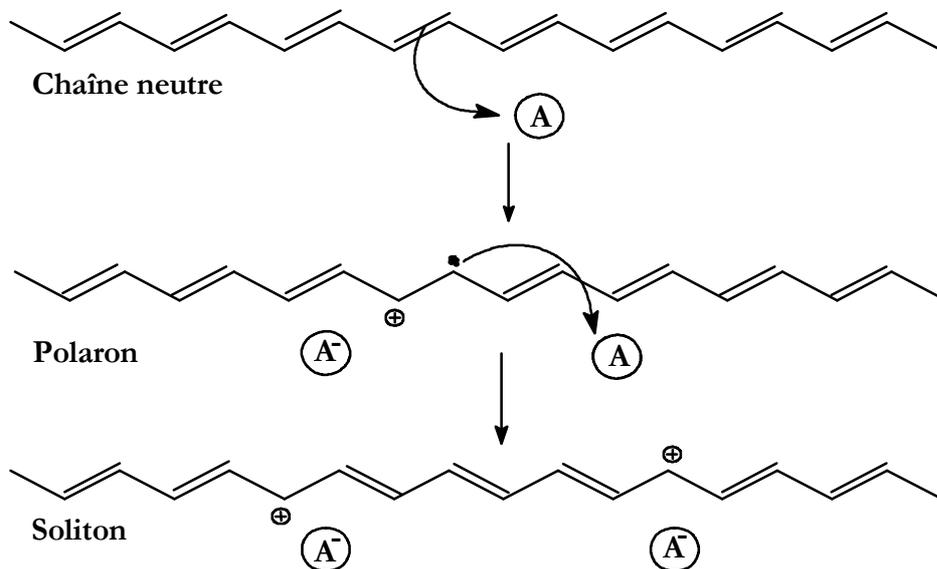


Figure I-1: Dopage du polyacétylène

2.1.2. Méthodes de dopage

Le dopage, des polymères conducteurs, peut être effectué selon plusieurs méthodes et techniques: dopage chimique, électrochimique et photochimique[5].

2.1.2.1. Dopage chimique

Il s'agit d'un dopage redox par transfert de charges entre le dopant et les chaînes du polymère conjugué. Au cours du dopage, il y a transfert d'électrons, ce qui modifie le nombre total d'électrons π de ces

derniers. Comme toute réaction d'oxydoréduction, ce mécanisme de dopage est réversible [5,6].

2.1.2.2. Dopage électrochimique

Cette technique du dopage permet de suivre pas à pas l'évolution du système au cours du dopage; donc c'est un dopage continu et réversible (dopage et dédopage). Dans le cas du dopage par la méthode électrochimique, l'échantillon du polymère constitue la cathode (dopage de type n) ou l'anode (dopage de type p), la deuxième électrode est constituée de l'espèce chimique à insérer (dopant). Les deux électrodes sont plongées dans une solution électrolytique convenable. Ce type de dopage consiste à insérer des cations (type n) ou des anions (type p) dans le polymère[5,6].

2.2. Polymères conducteurs composites

Les polymères conducteurs composites sont constitués d'une matrice polymérique isolante dans laquelle sont noyées des particules conductrices, leur conductivité électrique dépend de la concentration et de la nature de ces particules conductrices (Figure I-2)[6,7].

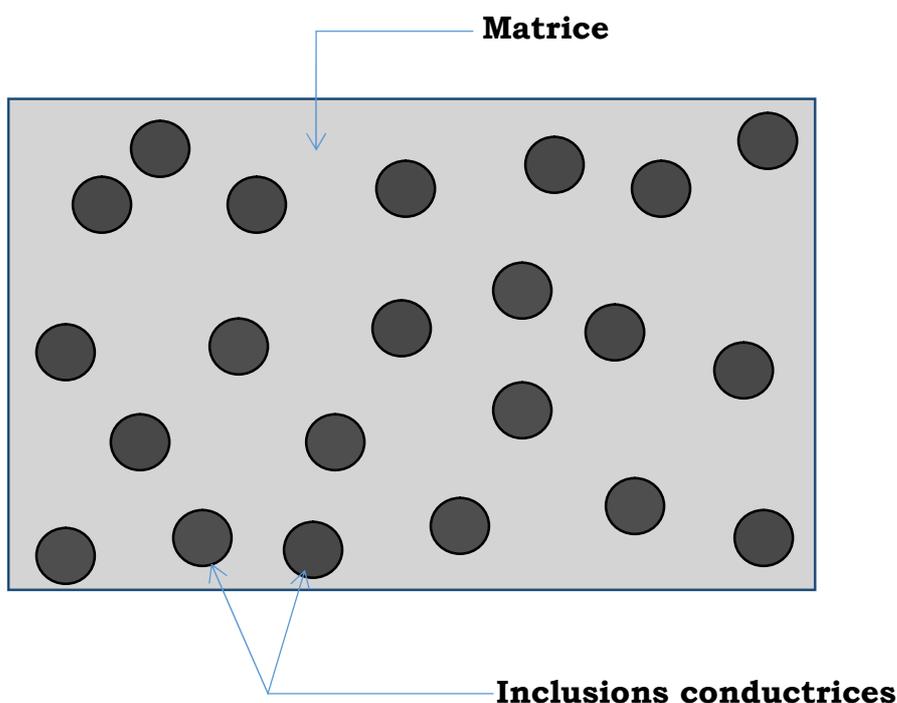


Figure I-2: Polymère conducteur composite

Dans ces polymères conducteurs composites, le régime de conduction passe brusquement de l'état isolant à l'état conducteur pour une concentration critique en grains conducteur dite seuil de percolation. Cette transition de l'état isolant à l'état conducteur peut être interprétée par la théorie de percolation[8,9].

Au-dessus du seuil critique, les particules conductrices forment des chemins conducteurs à travers la matrice du polymère. Par contre au dessous du seuil de percolation, les charges conductrices sont suffisamment disséminées et espacées (figures I-3 et I-4)[6,10].

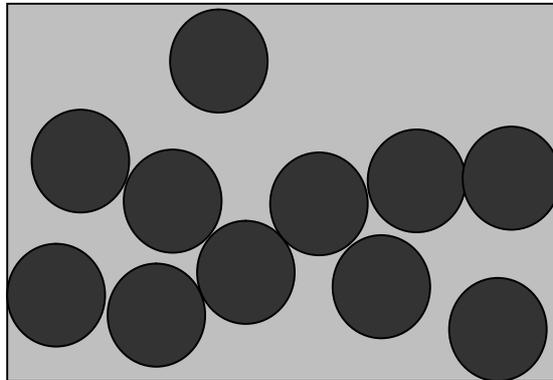


Figure I-3: Polymère chargé au dessus du seuil de percolation.

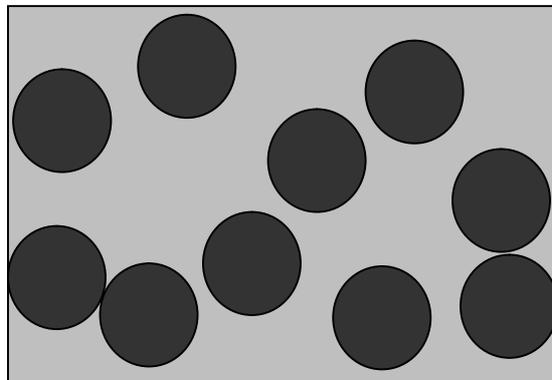


Figure I-4: Polymère chargé au dessous du seuil de percolation.

3. CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

Les champs électromagnétiques sont une combinaison de champs de forces électriques et magnétiques invisibles. Ils sont générés par des phénomènes naturels, mais aussi par les activités humaines, principalement lors de l'utilisation d'électricité. Il est défini à partir des composantes de la force électromagnétique s'appliquant sur une particule chargée avec une charge q se déplaçant dans un référentiel galiléen à la vitesse \vec{v} . Cette force est donnée par [11,12] :

$$\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{I-1})$$

Où \vec{E} et \vec{B} sont respectivement le champ électrique et le champ magnétique.

3.1. Champ électrique

Il s'agit d'un champ vectoriel qui à tout point de l'espace associe une direction, un sens et une intensité. C'est un champ qui dépend de la tension électrique. Généralement, on désigne par champ électrique un champ créé par des particules électriquement chargées. Le champ électrique est la force qui résulterait de l'action à distance de particules électriquement chargées sur une particule test de charge unité au repos dans le référentiel d'étude [12].

3.2. Champ magnétique

Le champ magnétique est une force qui s'exerce sur une masse magnétique (aimant, pièce en matériau ferromagnétique) ou sur une charge électrique en mouvement. Le champ magnétique, est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, défini en tout point de l'espace, permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques et électriques [12].

4. ONDE ELECTROMAGNETIQUE

Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre, se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure I-5)[12,13].

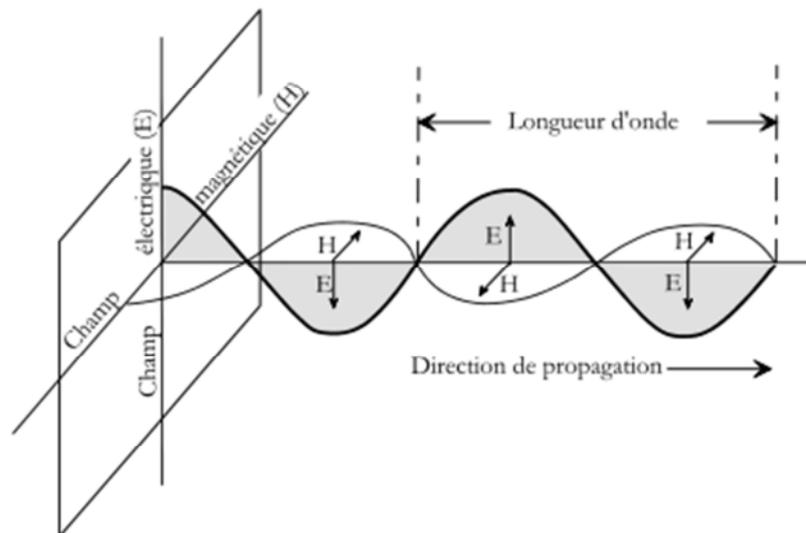


Figure I-5: Composition d'une onde électromagnétique.

Cette propagation s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré; sa vitesse est $C = 3.10^8 \text{ m/s}$ dans le vide ou $V = \frac{C}{n}$ dans un milieu autre que l'espace et dont l'indice de réfraction est n .

La fréquence d'une onde électromagnétique est la fréquence des champs électriques et magnétiques qui la composent. La longueur d'onde λ est définie comme le trajet parcouru par une onde après une période d'oscillation[12,14].

4.1. Polarisation d'une onde électromagnétique

La polarisation d'une onde électromagnétique est déterminée par la direction de son champ électrique \vec{E} . Si le champ électrique garde

une direction constante en un certain point quel que soit le temps, on dit que la polarisation est rectiligne; généralement elle est contenue soit dans un plan horizontal (polarisation horizontale) soit dans un plan vertical (polarisation verticale)[15,16].

4.2. Impédance des ondes électromagnétiques

La nature d'une onde électromagnétique est définie par la valeur de son impédance Z . Ainsi, de même qu'en électricité où on mesure l'impédance d'un circuit par le rapport $\frac{U}{I}$, on exprime l'impédance Z d'une onde électromagnétique par le rapport $\frac{E}{H}$ [17]. L'impédance d'onde électromagnétique est une notion importante dans l'étude des ondes électromagnétiques guidées. Elle influe en particulier au niveau de l'interfaçage des éléments, en jouant sur la proportion d'ondes réfléchies à une interface[18].

L'impédance d'onde définie par le rapport entre le module du champ électrique E et de l'excitation magnétique H :

$$z = \left| \frac{E}{H} \right| \quad (\text{I-2})$$

5. COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

La compatibilité électromagnétique, est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. Donc la compatibilité électromagnétique est une nécessité pour le fonctionnement satisfaisant de tous les systèmes, équipements et sous-ensembles d'une installation[19].

6. SUSCEPTIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

On appelle un niveau de susceptibilité d'un appareil le niveau de perturbation auquel l'appareil présente un dysfonctionnement. On appelle un niveau d'immunité le niveau auquel l'appareil était soumis lors des essais et pour lequel il doit fonctionner normalement.

Si la compatibilité électromagnétique est ignorée ou incorrectement traitée, les conséquences peuvent aller d'une simple nuisance à une grave interruption de service; voir des dommages sérieux aux biens ou aux personnes. Les simples gênes sont celles d'un parasitage sur la radio, sur la télévision ou sur un téléphone, un rapport signal/bruit dégradé sur une chaîne analogique, des ratés sur un allumage électronique d'automobile, etc...

Dans la liste des incidents graves, qui malheureusement s'allonge, on peut citer le blocage complet d'un processus de fabrication industrielle, la manœuvre involontaire d'un pont roulant ou d'un robot dans un hall d'usine, l'impossibilité de basculer du normal au secours dans un réseau électrique d'un hôpital entier, la destruction d'un système par les effets indirects de la foudre, la mise à feu inopinée d'un dispositif pyrotechnique, etc...

Enfin, un secteur particulier, l'anti-compromission concerne la défense contre l'espionnage ou le piratage électronique par la capture de signaux électromagnétiques, conduits ou rayonnés[15,16].

Une bonne compatibilité électromagnétique 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. Comme il n'est pas économiquement et techniquement réaliste de construire des équipements qui n'émettent rien et qui résistent à tout, il existe des règles, sous forme de limite standard, qui permettent de gérer les cohabitations en fonction des principales catégories d'environnement[15,16].

Ces limites régissent:

- les émissions de signaux indésirables par conduction et rayonnement,
- l'immunité à des perturbations reçues par conduction et rayonnement.

7. BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

Un blindage ou un écran électromagnétique est une enveloppe conductrice qui sépare l'espace en deux régions, l'une contenant des sources de champs électromagnétiques, l'autre non. Le blindage est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met en place autour de composants électriques pour constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques ou électromagnétiques. La barrière, doit être faite d'un matériau conducteur électrique. Les blindages électromagnétiques, sont principalement utilisés pour protéger des équipements électroniques contre des parasites électriques et des radiofréquences. Le blindage peut réduire l'influence des micro-ondes, de la lumière visible, des champs électromagnétiques et des champs électrostatiques[20].

Plus particulièrement, une enceinte conductrice utilisée pour isoler des champs électrostatiques est connue sous le nom de cage faraday. En revanche, un blindage électromagnétique ne peut pas isoler des champs magnétostatiques, pour lesquels le recours à un blindage magnétique est nécessaire. Les blindages électromagnétiques ont pour but de protéger des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques[21].

Un blindage électromagnétique permet d'accroître l'immunité électromagnétique d'un équipement; cette fonction est aussi réversible puisqu'elle peut réduire l'amplitude des rayonnements indésirables. Face aux phénomènes de perturbations électromagnétiques, le blindage électromagnétique réagit comme une frontière physique isolant les composants sensibles aux perturbations ou confinant les sources rayonnantes dans un volume restreint. Pour diverses raisons, surtout liées à la nature physique des matériaux qui composent le blindage ainsi qu'aux contraintes technologiques imposées par leurs fabrications ou leurs installations, cette frontière n'est pas totalement imperméable.

Concepts généraux

Un parasite résiduel peut, donc, pénétrer dans la zone protégée par le blindage[20,21]. Le but du blindage est double; Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée ou bien exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte (figures I-6 et I-7)[22].

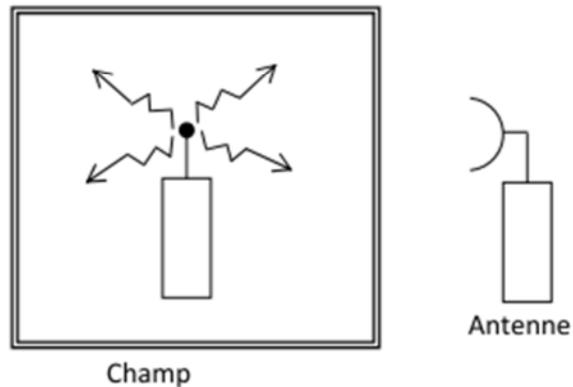


Figure I-6: Enveloppe conductrice contenant les émissions rayonnées.

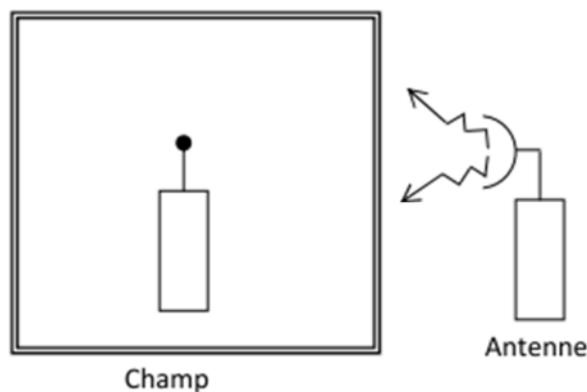


Figure I-7: Enveloppe conductrice excluant les émissions rayonnées.

7.1. Types de blindages

Il existe trois (03) types de blindage électromagnétique:

- Les enceintes blindées,
- Les connecteurs blindés,

- Les câbles blindés.

Dans notre mémoire, on s'intéresse au premier type de blindage (enceinte blindée)[15,16].

7.1.1. Les enceintes blindées

Les enceintes blindées peuvent prendre différentes formes géométriques, suivant le circuit à protéger, des cages de formes sphériques, cylindriques, rectangulaires, etc...

7.1.2. Blindage des connecteurs

Dans une installation, le connecteur permet la continuité électrique entre le blindage du câble et la masse de l'équipement auquel il est raccordé. En fonction de ses caractéristiques géométriques et physiques, un connecteur peut présenter des fuites électromagnétiques qui se manifestent lors de l'écoulement vers la masse des courants induits sur le blindage du câble[15,16].

7.1.3. Blindage des câbles

En pratique, on rencontre trois technologies: les tubulaires homogènes, les blindages tressés et les blindages à structures hélicoïdales. Lorsque les blindages sont utilisés individuellement pour protéger un câble, il s'agit d'un blindage simple. Ils peuvent aussi entrer dans des compositions hybrides; où deux ou trois couches de blindages de technologies différentes sont juxtaposées[15,16].

8. EFFICACITE D'UN BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

L'efficacité du blindage électromagnétique est la capacité d'un système ou d'un matériau de ne pas laisser passer les ondes électromagnétiques. Cette efficacité est, habituellement, exprimée en décibels. On la calcule à l'aide des expressions suivantes[12,14-16]:

$$SE(\text{dB}) = 20 \log \frac{E_i}{E_t} \quad (\text{I-3})$$

$$SE(\text{dB}) = 20\log \frac{H_i}{H_t} \quad (\text{I-4})$$

$$SE(\text{dB}) = 10\log \frac{P_i}{P_t} \quad (\text{I-5})$$

Où E, H et P représentent respectivement la puissance du champ électrique, la puissance du champ magnétique et la puissance électromagnétique. Les indices i et t concernent les ondes incidentes et transmises (figure I-8).

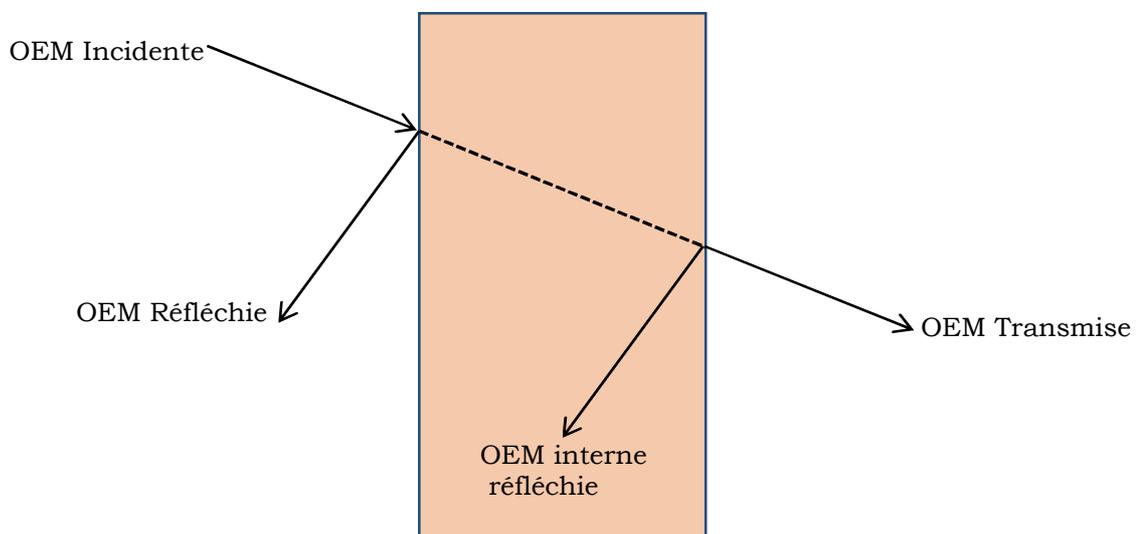


Figure 8: Atténuation d'une onde électromagnétique.

L'efficacité SE d'un blindage électromagnétique s'exprime par la relation suivante:

$$SE(\text{dB}) = R(\text{dB}) + A(\text{dB}) + M(\text{dB}) \quad (\text{I-6})$$

Où R(dB), A(dB) et M(dB) sont respectivement, atténuation due à la réflexion, atténuation due à l'absorption et atténuation due aux réflexions internes multiples[23].

9. MATERIAUX DU BLINDAGE

Les matériaux les plus utilisés dans le blindage électromagnétique sont les feuilles et les grilles métalliques, les gaz ionisés et les plasmas. Pour assurer le blindage, les trous dans les grilles et les feuilletts doivent être significativement plus petite que la longueur d'onde de la radiation à bloquer. Une autre méthode courante de blindage, surtout, utilisée dans des appareils électroniques à grand public équipés d'un boîtier plastique, consiste à recouvrir l'intérieur du boîtier avec une encre métallique. Cette encre est usuellement constituée d'une dispersion de particules de nickel ou de cuivre dans une solution liquide. L'encre est dispersée à l'aide d'un atomiseur et, une fois sèche, forme une couche conductrice continue lorsqu'elle est reliée à la masse de l'appareil, elle forme un blindage efficace. Les matériaux typiques utilisés pour le blindage sont le cuivre, l'aluminium et l'acier[12,14].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Stastrom, Conductance and localization in a system of coupled conjugated polymer chains, *Phys. Rev. B*, pp. 4137, 51 (1995).
- [2] S. Stafstrom, Defect states in polyaniline, *Synth. Met.*, pp. 387, 18 (1987).
- [3] S. Chiali, Contribution a l'étude des propriétés électroniques et structurales du polyacétylène dopé aux alcalins, Thèse de doctorat, Université D'Oran Es-Senia, juillet (1993).
- [4] C. Wang, R. Wang, Theoretical studies on anisotropic electrical conductivity of trans - polyacetylene doped with n - type dopants, *Solid State Commu.*, pp. 109 - 112, 117 (2001).
- [5] J. L. Brédas, D. Beljonne, J. Cornil, J. P. Calbert, Z. Shuai, R. Silbey, Electronic structure of π - conjugated oligomers and polymers: a quantum - chemical approach to transport properties, *Synth. Met.*, pp. 107 - 116, 125 (2002).
- [6] M. HAMOUNI, Contribution à l'étude théorique de la conductivité électrique des polymères conducteurs : cas du polymère conducteur composite polyéthylène/di-borure de titane (PE/TiB₂), Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, Février 2006.
- [7] K. Gurunathan, D. P. Amalnerker, D. C. Trivedi, Synthesis and characterization of conducting polymer Composite (PAn / TiO₂) for cathode material in rechargeable battery, *Materials Letters*, pp. 1642 - 1648, 57 (2003).
- [8] V. M. Mzenda, S. A. Goodman, F. D. Auret, L. C. Prinsloo, Characterization of electrical charge transfer in conducting polyaniline over

the temperature rang $300 < T \text{ (K)} < 450$, Synth. Met., pp. 279 – 283, 126 (2002).

[9] D. T. Wu, Theory for conductivity in conducting star polymer blends, Synth. Met., pp. 289 – 293, 127 (2002).

[10] M. A. Valente, L. C. Costa, S. K. Mendiratta, F. Henry, L. Ramanitra, Structural and electrical properties of polystyrene – carbon composites, Solid State Commu., pp. 67 – 72, 112 (1999).

[11] A. Akhiezer, Electromagnétisme et onde électromagnétique, Edition Mir, 1988.

[12] S. Heddar, Etude comparative d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs composites en champs proche et lointain, Mémoire de magister, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, (2011).

[13] H. Azizi, Conception d'une cellule de mesure CEM destinée pour l'évaluation des perturbations rayonnées, Mémoire de magister, Ecole militaire polytechnique, (2011).

[14] M. Belabaci, Contribution à l'étude théorique de l'efficacité du blindage électromagnétique en champ lointain: cas des polymères conducteurs composites, Mémoire de magister, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, (2008).

[15] Y. I. Djilani Kobibi, Contribution à l'étude de blindage électromagnétique, Mémoire de Master, Faculté des Sciences, Université de Sidi Bel-Abbes, (2011).

[16] S Khoubzaoui, Contribution à l'étude des propriétés électriques des polymères conducteurs composites, Mémoire de Magister, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, (2005).

- [17] H. Miloudi, A. Bendaoud, A. Groubi, Caractérisation électromagnétique du blindage en champ proche et lointain, CNCEM09, 1^{ère} Conférence nationale sur la compatibilité électromagnétique, Tiaret, 22-24 novembre, (2009).
- [18] L. Charoy, Compatibilité électromagnétique, parasites et perturbations des électroniques, blindage-filtres-câbles blindés, règles et conseils d'installation, Tom 3, Dunod, paris, (1992).
- [19] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Physique 2, Electricité et magnétisme, 6^{ème} Edition, (2003).
- [20] S. Hamri, Contribution à l'étude des propriétés des polymères conducteurs composites : application pour le blindage électromagnétique, Mémoire de D.E.S, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, (2007).
- [21] J. Cu villier, Cour de CEM, notion élémentaire, IUT de Nante, Génie électrique et informatique industriel, (1979).
- [22] F. Rachedi, Compatibilité électromagnétique, Notes de cours, Ecole polytechnique fédérale de lausanne, (2004).
- [23] M. Hamouni, S. Heddar, A. Ansri, S. Khaldi, A comparative study of electromagnetic shielding efficiency of composites conducting polymers in near and far-fields, J. Mater. Environ. Sci., 5(3) (2014) 945-950.

1. INTRODUCTION

L'un des problèmes essentiels du rayonnement électromagnétique est l'étude des phénomènes qui surviennent, en particulier la réflexion, lorsqu'une onde électromagnétique rencontre dans son chemin des milieux, des matériaux différents. Le présent chapitre, a pour objet de présenter, d'une manière détaillée, un formalisme mathématique relatif aux propriétés des ondes réfléchies et transmises. Nous calculons l'impédance caractéristique, le coefficient de réflexion et la réflexion en introduisant la notion de la matrice caractéristique de l'écran du blindage électromagnétique.

2. ATTENUATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

Quand un champ électromagnétique arrive sur une enceinte blindée, une partie est réfléchiée, une partie est absorbée par l'écran du blindage (se traduisant par un échauffement) et l'autre partie est transmise de l'autre côté du blindage (Figure II-1)[1-4].

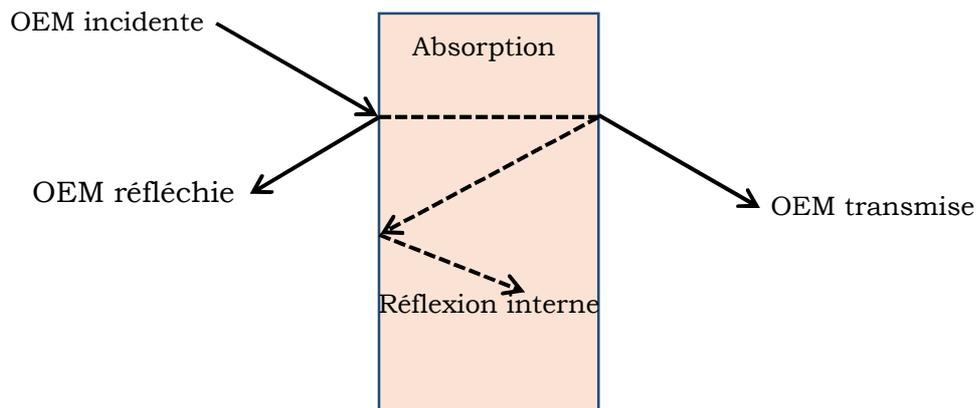


Figure II-1: Réflexion, absorption, réflexion interne et transmission dans un blindage électromagnétique

La première contribution à l'efficacité du blindage est la réflexion. Cette contribution est liée à la désadaptation de l'onde électromagnétique rencontrant un changement brut du milieu. La réflexion dépend, alors, de

l'impédance intrinsèque η et de la surface du matériau du blindage. Le mécanisme de la réflexion dépend de la permittivité et de la conductivité du matériau du blindage. La deuxième contribution à l'efficacité du blindage électromagnétique est l'absorption $A(SE)$. Cette contribution est liée à l'épaisseur du blindage, à la conductivité électrique et à la perméabilité électrique. La dernière contribution à l'efficacité du blindage est les réflexions multiples; elle représente la réflexion interne à l'intérieure du matériau du blindage. La perte due aux réflexions multiples peut être négligée lorsque la distance entre les surfaces réfléchissantes est grande par rapport à l'épaisseur de peau.

3. IMPEDANCE CARACTERISTIQUE DU BLINDAGE

Soit un milieu constitué de N couches ayant chacune une conductivité électrique σ_i , une perméabilité μ_i , une permittivité ϵ_i et une épaisseur d_i . Une onde électromagnétique plane de pulsation ω pour laquelle $\vec{H} = (H_x, 0, 0)$ et $\vec{E} = (0, E_y, 0)$, se propageant selon l'axe des z , est incidente sur ce milieu tabulaire [5,6].

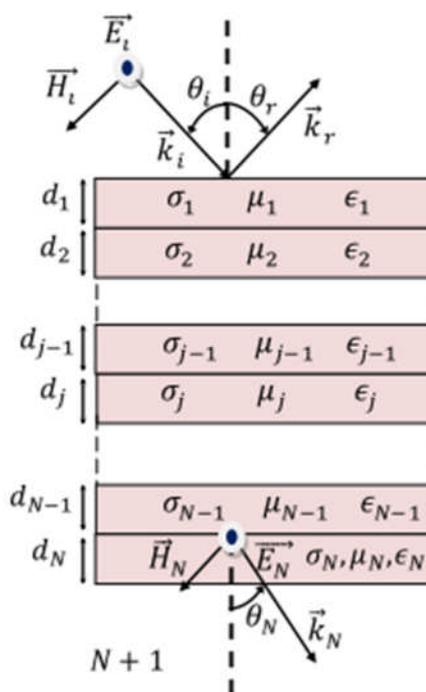
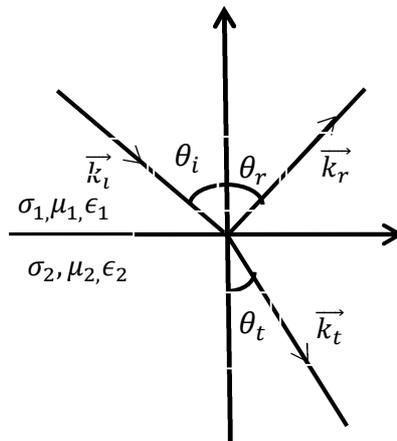


Figure II-2 : Onde Electromagnétique plane incidente normalement sur un milieu tabulaire à N couches.

Lorsque cette onde électromagnétique de vecteur d'onde \vec{k}_i , se dirige d'un milieu (1) vers un milieu (2) différent, on observe deux phénomènes:

La réfraction; le changement du milieu induit une déviation de l'onde, son vecteur \vec{k}_t , fait un angle θ_t avec l'axe verticale Oy .

La réflexion; l'onde est renvoyée vers le milieu (1), son vecteur \vec{k}_r , fait un angle θ_r avec l'axe verticale Oy (Figure II-3).



A l'intérieur de chaque couche du blindage électromagnétique, on peut décomposer les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} en ondes montantes et descendantes. Dans la couche j , on a alors

$$\mathbf{E}_{yj} = \mathbf{E}_j^+ e^{-ik_i(z-z_j)} + \mathbf{E}_j^- e^{-ik_i(z-z_j)} \quad (\text{II-1})$$

$$\mathbf{H}_{xj} = \mathbf{H}_j^+ e^{-ik_i(z-z_j)} + \mathbf{H}_j^- e^{-ik_i(z-z_j)} \quad (\text{II-2})$$

Comme $\vec{H} = \frac{\vec{K} \times \vec{E}}{\omega \mu_0}$, l'équation (II-2) s'écrit:

$$\mathbf{H}_{xj} = \frac{-k}{\omega \mu_0} [\mathbf{E}_j^+ e^{-ik_i(z-z_j)} - \mathbf{E}_j^- e^{-ik_i(z-z_j)}] \quad (\text{II-3})$$

En $z = z_j$, soit en bas de la couche j

$$\mathbf{E}_{yj} = \mathbf{E}_j^+ + \mathbf{E}_j^- \quad (\text{II-4})$$

$$\mathbf{H}_{xj} = \frac{1}{Z_j} (\mathbf{E}_j^- - \mathbf{E}_j^+) \quad (\text{II-5})$$

Où $Z_j = \frac{\omega\mu_0}{k_j}$, représente l'impédance intrinsèque de la couche j dans le cas d'un blindage électromagnétique multicouches.

Les équations (II-4) et (II-5) nous ont permis de calculer les champs électriques E_j^+ et E_j^- des ondes électromagnétiques montantes et descendantes dans la couche j .

$$\mathbf{E}_j^+ = \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} - Z_j \mathbf{H}_{xj}) \quad (\text{II-8})$$

$$\mathbf{E}_j^- = \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} + Z_j \mathbf{H}_{xj}) \quad (\text{II-9})$$

Au toit de la couche j , c'est-à-dire, En $z = z_{j-1}$, la continuité des composantes tangentièlles du champ électrique E et du champ magnétique H nécessite que $E_{yj} = E_{yj-1}$ et $H_{xj} = H_{xj-1}$

$$\mathbf{E}_{yj-1} = \left[\mathbf{E}_j^+ e^{-ik_j(z_{j-1} - z_j)} + \mathbf{E}_j^- e^{-ik_j(z_{j-1} - z_j)} \right] \quad (\text{II-10})$$

$$\mathbf{H}_{xj-1} = \frac{-1}{Z_j} \left[\mathbf{E}_j^+ e^{-ik_j(z_{j-1} - z_j)} - \mathbf{E}_j^- e^{-ik_j(z_{j-1} - z_j)} \right] \quad (\text{II-11})$$

En remplaçant E_j^+ et E_j^- par leurs expressions dans les équations (II-10) et (II-11), nous obtenons:

$$\mathbf{E}_{yj-1} = \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} - Z_j \mathbf{H}_{xj}) e^{ik_j d_j} + \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} + Z_j \mathbf{H}_{xj}) e^{-ik_j d_j} \quad (\text{II-12})$$

$$\mathbf{E}_{yj-1} = \mathbf{E}_{yj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} + e^{-ik_j d_j}}{2} \right) - \mathbf{Z}_j \mathbf{H}_{xj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} - e^{-ik_j d_j}}{2} \right) \quad (\text{II-13})$$

$$\mathbf{E}_{yj-1} = \mathbf{E}_{yj} \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) - \mathbf{Z}_j \mathbf{H}_{xj} \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \quad (\text{II-14})$$

Et

$$\mathbf{H}_{xj-1} = \frac{-1}{\mathbf{Z}_j} \left[\frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} - \mathbf{Z}_j \mathbf{H}_{xj}) e^{ik_j d_j} - \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{yj} + \mathbf{Z}_j \mathbf{H}_{xj}) e^{-ik_j d_j} \right] \quad (\text{II-15})$$

$$\mathbf{H}_{xj-1} = \mathbf{H}_{xj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} + e^{-ik_j d_j}}{2} \right) - \frac{1}{\mathbf{Z}_j} \mathbf{E}_{yj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} - e^{-ik_j d_j}}{2} \right) \quad (\text{II-16})$$

$$\mathbf{H}_{xj-1} = \mathbf{H}_{xj} \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) - \frac{1}{\mathbf{Z}_j} \mathbf{E}_{yj} \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \quad (\text{II-17})$$

Finalement, on peut exprimer les équations (II-14) et (II-17) sous forme matricielle, soit:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{yj-1} \\ \mathbf{H}_{xj-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) & -\mathbf{Z}_j \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \\ -\frac{1}{\mathbf{Z}_j} \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) & \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{yj} \\ \mathbf{H}_{xj} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

L'équation (II-18), nous a permis de calculer les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} dans une couche j en fonction des propriétés physiques des champs électrique et magnétique et en fonction de l'épaisseur de la couche sous jacente. Soit M la matrice caractéristique de la couche j telle que:

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) & -\mathbf{Z}_j \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \\ -\frac{1}{\mathbf{Z}_j} \sinh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) & \cosh(\mathbf{ik}_j \mathbf{d}_j) \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

L'équation (II-18) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{j-1}} \\ \mathbf{H}_{x_{j-1}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_j \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_j} \\ \mathbf{H}_{x_j} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Donc pour passer de la couche $j-1$ à la couche $j-2$, on peut exprimer les champs électrique $\overrightarrow{E_{j-2}}$ et magnétique $\overrightarrow{H_{j-2}}$ de la couche $j-2$ en fonction des champs électrique et magnétique et en fonction de la matrice caractéristique de la couche $j-1$.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{j-2}} \\ \mathbf{H}_{x_{j-2}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{j-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{j-1}} \\ \mathbf{H}_{x_{j-1}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

L'insertion de l'équation (II-20) dans (II-21) donne

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{j-2}} \\ \mathbf{H}_{x_{j-2}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{j-1} \mathbf{M}_j \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_j} \\ \mathbf{H}_{x_j} \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

On peut généraliser ce résultat dans le cas d'un blindage électromagnétique multicouches de N couches.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_1} \\ \mathbf{H}_{x_1} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{N+1}} \\ \mathbf{H}_{x_{N+1}} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_{N+1}} \\ \mathbf{H}_{x_{N+1}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

Où $M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \dots M_N$, représente la matrice de la couche équivalente.

Si on connaît les champs dans les demis espaces, on peut résoudre complètement le problème. Or, on ne connaît jamais ces champs. A cet effet on fait appel à la notion de l'impédance caractéristique du blindage électromagnétique. Rappelons que l'impédance intrinsèque Z est le rapport

entre les composantes orthogonales de \vec{E} et \vec{H} . Donc meme si on ne connait pas ces composantes orthogonales, leur rapport est toujours connu. En effet, on a vu auparavant que[7]:

$$\mathbf{Z}_j = \frac{\omega\mu}{k_j} \quad (\text{II-24})$$

On peut exprimer l'impédance caractéristique de la couche j par :

$$\hat{\mathbf{Z}}_{j-1} = -\frac{\mathbf{E}_{y(j-1)}}{\mathbf{H}_{x(j-1)}} = -\frac{\alpha_{11}\mathbf{E}_{y(N+1)} + \alpha_{12}\mathbf{H}_{x(N+1)}}{\alpha_{21}\mathbf{E}_{y(N+1)} + \alpha_{22}\mathbf{H}_{x(N+1)}} \quad (\text{II-25})$$

Si on utilise, $\mathbf{Z}_{n+1} = -\frac{\mathbf{E}_{y(N+1)}}{\mathbf{H}_{x(N+1)}}$ et que l'on substitue dans l'équation (II-25), on retrouve:

$$\hat{\mathbf{Z}}_{j-1} = \frac{\alpha_{11}\mathbf{Z}_{n+1} - \alpha_{12}}{\alpha_{22} - \alpha_{21}\mathbf{Z}_{n+1}} \quad (\text{II-26})$$

Où, les coefficients $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}$ et α_{22} , représentent les éléments de la matrice caractéristique, M, du blindage électromagnétique.

Il est claire que ces coefficients sont données par:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} = \cosh(\mathbf{ikd}) \\ \alpha_{12} = -\mathbf{Z} \sinh(\mathbf{ikd}) \\ \alpha_{21} = -\frac{1}{\mathbf{Z}} \sinh(\mathbf{ikd}) \\ \alpha_{22} = \cosh(\mathbf{ikd}) \end{array} \right. \quad (\text{II-27})$$

Où, Z, d et k sont respectivement, l'impédance intrinsèque du blindage, l'épaisseur du blindage et le vecteur d'onde dans le blindage.

Finalement, l'impédance caractéristique d'un blindage électromagnétique s'exprime en fonction des éléments de la matrice caractéristique et de l'impédance du vide Z_0 par la relation suivante:

$$Z_b = \frac{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12}}{\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0} \quad (\text{II-28})$$

5. COEFFICIENT DE REFLEXION

Le coefficient de réflexion est défini comme étant le rapport entre le champ électrique réfléchi sur le champ électrique incident [8,9].

À la première interface du blindage (figure II-4), la continuité des champs électrique et magnétique nécessite que:

$$\begin{cases} E_i + E_r = E_t \\ H_i - H_r = H_t \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

Sachant que $H = \frac{E}{Z}$.

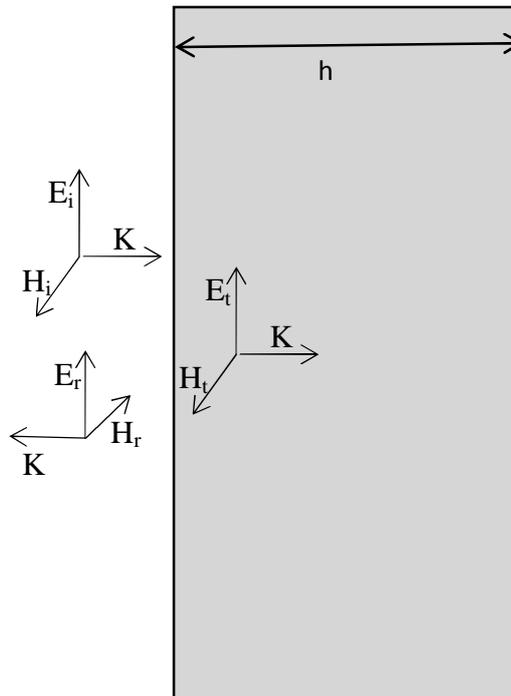


Figure II-4 : Atténuation d'une onde électromagnétique par réflexion.

En remplaçant H_i, H_r et H_t par leurs expressions dans les équations (II-29), nous obtenons:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r = \mathbf{E}_t \\ \frac{\mathbf{E}_i}{Z_0} - \frac{\mathbf{E}_r}{Z_0} = \frac{\mathbf{E}_t}{Z_b} \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

Avec Z_0 et Z_b sont respectivement les impédances du vide et de l'écran du blindage.

La résolution du système d'équation (II-30), donne:

$$\frac{\mathbf{E}_r}{\mathbf{E}_i} = \frac{Z_b - Z_0}{Z_b + Z_0} \quad (\text{II-31})$$

L'insertion de l'équation (II-28) dans (II-31) donne

$$\frac{\mathbf{E}_r}{\mathbf{E}_i} = \frac{\frac{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12}}{\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0} - Z_0}{\frac{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12}}{\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0} + Z_0} \quad (\text{II-32})$$

Finalement, le coefficient de réflexion est donné par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{\mathbf{E}_r}{\mathbf{E}_i} = \frac{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12} - Z_0(\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0)}{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12} + Z_0(\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0)} \quad (\text{II-33})$$

D'autre part l'atténuation due à la réflexion est donné par [10] :

$$\mathbf{R} = 20 \log \Gamma = 20 \log \left(\frac{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12} - Z_0(\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0)}{\alpha_{11}Z_0 - \alpha_{12} + Z_0(\alpha_{22} - \alpha_{21}Z_0)} \right) \quad (\text{II-34})$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. HAMOUNI, S. HEDDAR, A. ANSRI, S. KHALDI, A comparative study of electromagnetic shielding efficiency of composites conducting polymers in near and far-fields, *J. Mater. Environ. Sci.*, 5(3), 945-950, (2014).
- [2] M. A. Valente, L. C. Costa, S. K. Mendiratta, F. Henry, L. Ramanitra, Structural and electrical properties of polystyrene – carbon composites, *Solid State Commu.*, 67 – 72, 112 (1999).
- [3] D. T. Wu, Theory for conductivity in conducting star polymer blends, *Synth. Met.*, 289 – 293, 127 (2002).
- [4] B. Kuzmanovic, Z. Baus, S. Nikolovski, Multi-layered spherical magnetic shielding, *Journal of electrical engineering*, Vol. 60, 350-353, (2009).
- [5] Z. Yildiz, I. Usta, A. Gungor, Investigation of the electrical properties and electromagnetic shielding effectiveness of polypyrrole coated cotton yarns, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 32-37, (1998).
- [6] X. Jing, Y. Y. Wang, B. Zhang, Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of polyaniline/polyacrylate composite coatings, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, 2149-2156, (2005).
- [7]I. Ciesielska-Wrobel, K. Grabowska, Estimation of the EMR shielding effectiveness of Knit structures, *Fibres & textiles in Eastern Europe 2012*), 53-60, (1992).
- [8] O. Schütze, L. Jourdan, T. Legrand, E. Talbi, J. L. Wojkiewicz, New analysis of the optimization of electromagnetic shielding properties using

conducting polymers and multi-objective approach, Poly. Adv. Technol., Vol. 19, 762-769, (2008).

[9] Y. Yang, M. C. Gupta, K. L. Dudley, Studies on electromagnetic interference shielding characteristics of metal nanoparticale and carbon nanostructure-filled polymer composites in the Ku-band frequency, Micro & Nano Letters, Vol. 2, NO. 4, 85-89, (2007).

[10] C. Morari, I. Balan, J. Pinteá, E. Chitanu, I. Iordache, Electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of silicone rubber filled with ferrite and graphite powders, Progress in electromagnetics Research M, Vol. 21, 93-104, (2011).

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons notre contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs en fonction de plusieurs paramètres tels que l'angle d'incidence, la conductivité électrique et la fréquence de la source de rayonnement.

Dans une première étape, nous examinons la réflexion de deux écrans à base du polyacétylène dopé à l'iode dans le cas d'un blindage monocouche. Dans une deuxième étape, nous examinons la réflexion de deux écrans du blindage à base du nickel et du polyacétylène dopé à l'iode.

Dans le cas de l'étude de l'effet de l'angle d'incidence sur la réflexion, nous fixons la fréquence de la source de rayonnement à 300 MHz et la fraction volumique de l'iode à 80% et 4.5% respectivement.

Dans le cas de l'étude de l'effet de la conductivité électrique sur la réflexion, nous fixons l'angle d'incidence à 30° et la fréquence de la source de rayonnement à 300 MHz.

Finalement pour l'examen de l'effet de la fréquence de la source de rayonnement sur la réflexion, nous fixons l'angle d'incidence à 30° et la conductivité électrique à $1.97 \cdot 10^5$ S/m et à 300 S/m dans le cas du polyacétylène dopé à l'iode à 80% et 4.5% respectivement.

2. BLINDAGE MONOCOUCHE

2.1 Effet de l'angle d'incidence

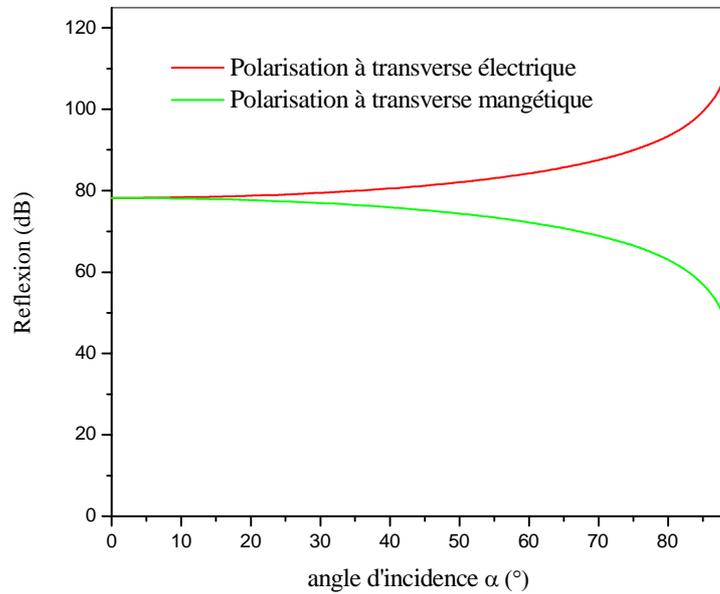


Figure III-1: Variation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence: cas du polyacétyle Cis-(CHI_{0.8})_x.

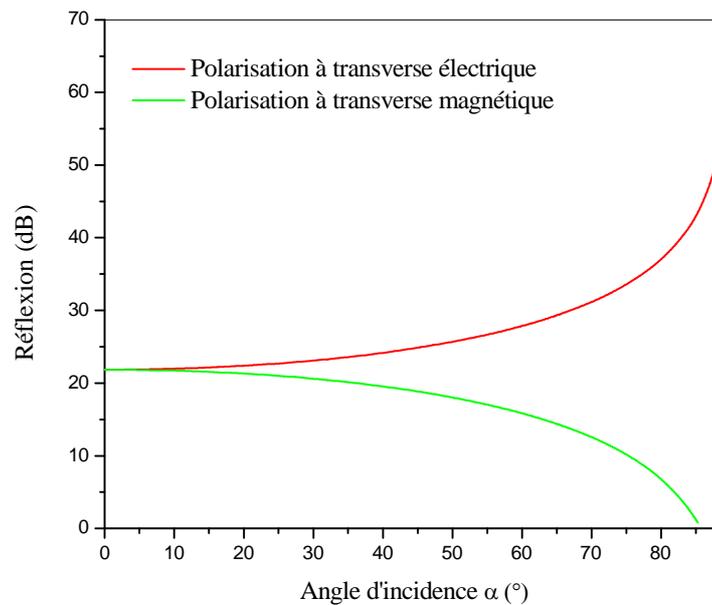


Figure III-2: Variation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence: cas du polyacétyle Cis-(CHI_{0.045})_x.

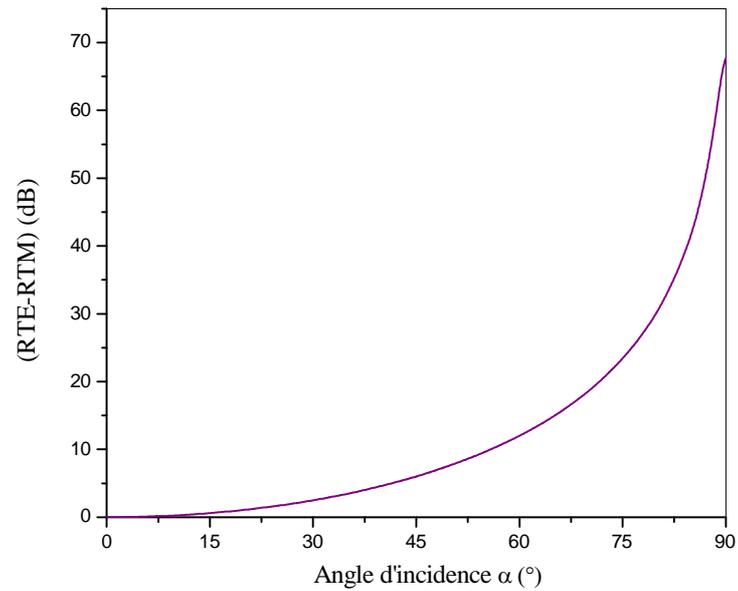


Figure III-3: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de l'angle d'incidence: cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x.

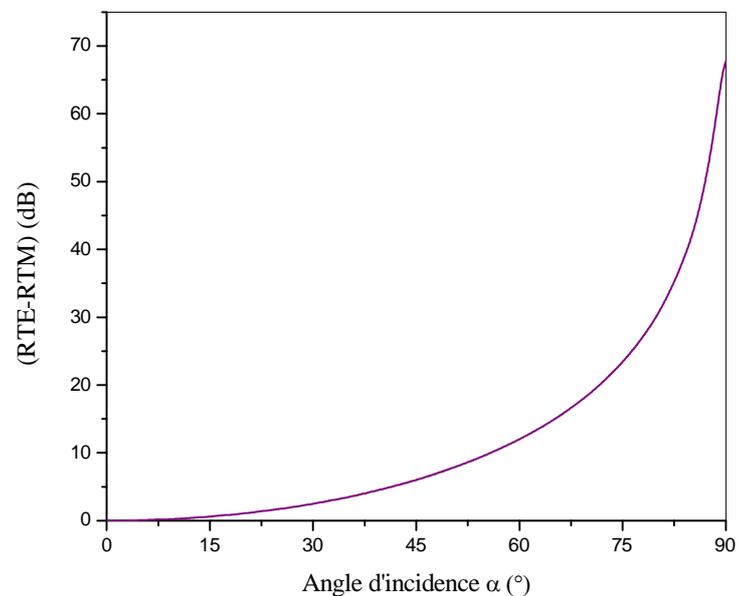


Figure III-4: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de l'angle d'incidence: cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.045})_x.

Résultats et discussions

Les figures III-1 et III-2, montrent respectivement les variations de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour un écran en polyacétylène dopé à l'iode avec différents taux de dopage, et des polarisations à transverses électrique et magnétique.

Sur ces figures, on remarque une augmentation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence dans le cas d'une polarisation à transverse électrique. Cette même réflexion diminue dans le cas d'une polarisation à transverse magnétique.

Les figures III-1 et III-2, montrent que pour une polarisation à transverse électrique la réflexion croit de 78 à 140 dB dans le cas du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 21 à 83 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%.

Pour une polarisation à transverse magnétique, la réflexion décroît de 78 à 16 dB dans le cas du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 21 à 16 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%. Ces variations, montrent que la réflexion est beaucoup plus importante dans le cas d'une polarisation à transverse électrique. La réflexion est liée à la désadaptation de l'onde électromagnétique rencontrant un changement du milieu; elle dépend donc de l'impédance de la surface du matériau du blindage.

Les figures III-3 et III-4, représentent respectivement les variations des écarts entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique. Sur ces figures, on remarque que cet écart est indépendant de la fraction volumique du dopant. En effet, dans les deux écrans du blindage l'écart de la réflexion croit de 0 à 67 dB.

Les différents résultats que nous avons obtenus, sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

	Polarisation électrique	Polarisation magnétique
PA Cis-(CHI _{0.8}) _x	78 dB - 140 dB	78 dB - 16 dB
PA Cis-(CHI _{0.045}) _x	21 dB - 83 dB	21dB - 16 dB

2.2 Effet de la conductivité électrique

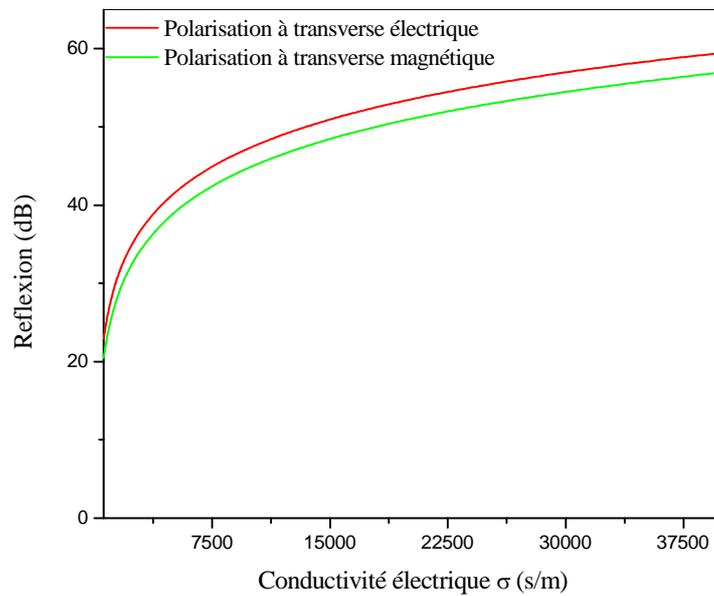


Figure III-5: Variation de la réflexion en fonction de la conductivité électrique: cas du polyacétylène dopé à l'Iode (Cis-(CHI)_x).

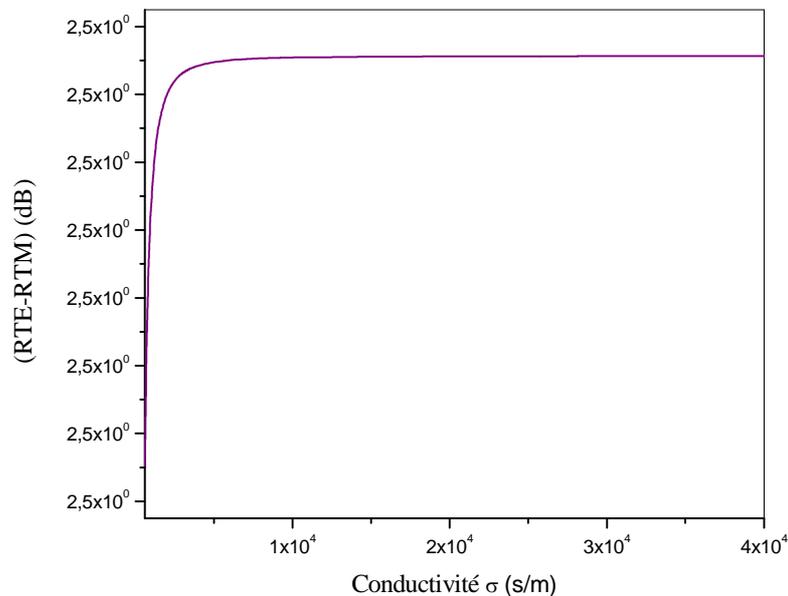


Figure III-6: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de la conductivité électrique: cas du polyacétylène dopé à l'Iode ($\text{Cis-(CHI)}_{0.8}$).

La figure III-5, représente les variations de la réflexion en fonction de la conductivité électrique du polyacétylène dopé à l'Iode pour des polarisations à transverses électrique et magnétique.

Sur cette figure, on remarque une augmentation de la réflexion en fonction de la conductivité électrique pour les deux types de polarisation. Cette augmentation varie sensiblement avec l'augmentation de la conductivité électrique de 600 à 10^3 S/m. Au-delà de cette valeur de la conductivité électrique, cette augmentation devient plus faible.

La figure III-5, montre que pour une polarisation à transverse électrique, la réflexion croit de 23 à 59 dB et de 20 à 56 dB pour une polarisation à transverse magnétique.

Ces variations, montrent que la réflexion est plus importante dans le cas de la polarisation à transverse électrique.

La figure III-6, montre les variations de l'écart entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique en fonction de la conductivité électrique pour le polyacétylène dopé à l'Iode.

Sur cette figure, on remarque une légère augmentation de l'écart de la réflexion en fonction de l'augmentation de la conductivité électrique du matériau du blindage entre 2.4949 dB et 2.4961 dB. Ceci s'explique par le fait que la conductivité électrique influe de la même manière sur les deux types de polarisation.

2.3 Effet de la fréquence

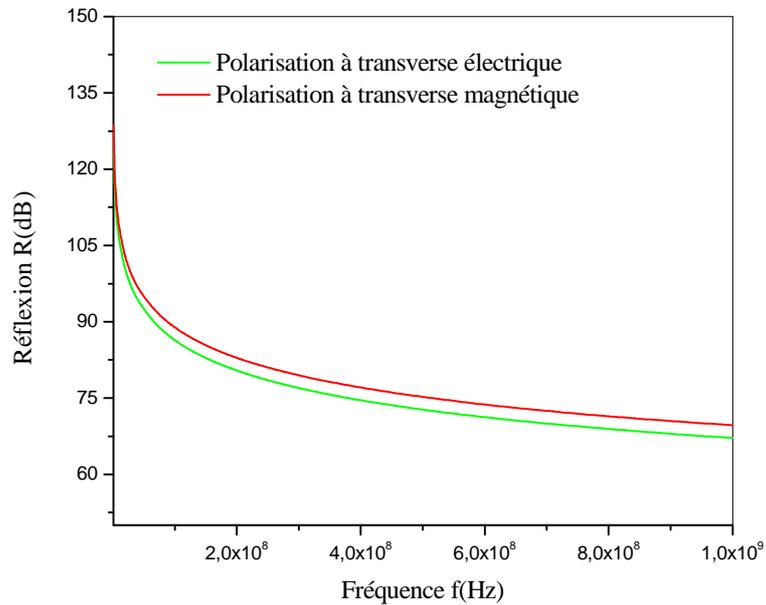


Figure III-7: Variation de la réflexion en fonction de la fréquence:
cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x.

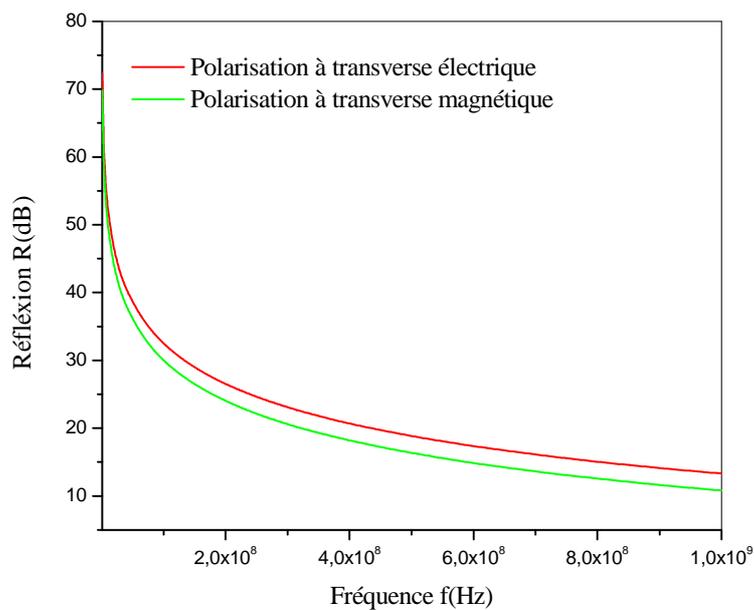


Figure III-8: Variation de la réflexion en fonction de la fréquence:
cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.045})_x.

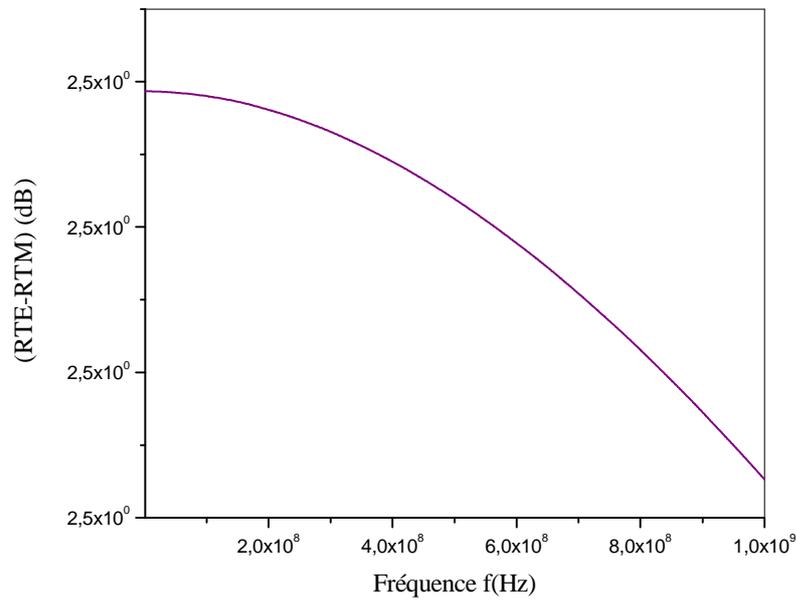


Figure III-9: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de la fréquence: cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x.

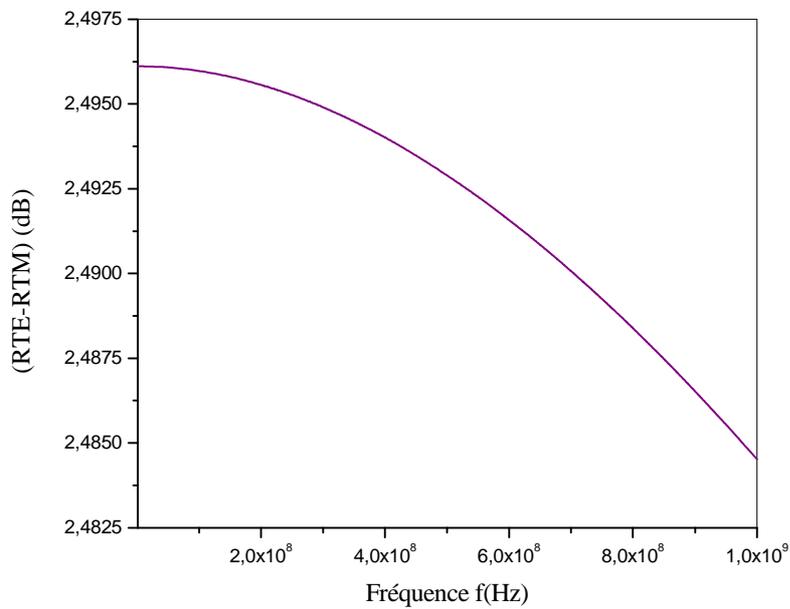


Figure III-10: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de la fréquence: cas du polyacétylène Cis-(CHI_{0.045})_x.

Résultats et discussions

Les figures III-7 et III-8, montrent respectivement les variations de la réflexion en fonction de la fréquence de la source de rayonnement pour un écran en polyacétyle dopé à l'iode avec différents taux de dopage, et des polarisations à transverses électrique et magnétique.

Sur ces figures, on remarque une diminution de la réflexion en fonction de la fréquence pour les deux types de polarisation.

Les figures III-7 et III-8, montrent que pour une polarisation à transverse électrique la réflexion décroît de 128.72 à 69.65 dB dans le cas du polyacétyle dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 126.23 à 67.65 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5% lorsque la fréquence de la source de rayonnement varie entre 10^6 et 10^9 . Pour une polarisation à transverse magnétique, la réflexion décroît de 72.34 à 13.47 dB dans le cas du polyacétyle dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 69.85 à 10.98 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%. Ces variations, montrent que la réflexion est pratiquement la même pour les deux types de polarisation.

Les figures III-9 et III-10, représentent respectivement les variations des écarts entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique. Sur ces figures, on remarque que cet écart est indépendant de la fraction volumique du dopant. En effet, dans les deux écrans du blindage l'écart de la réflexion décroît de 2.4961 à 2.4845 dB.

Les différents résultats que nous avons obtenus, sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

	Polarisation électrique	Polarisation magnétique
PA Cis-(CHI _{0.8}) _x	128.72 dB – 69.65 dB	126.23 dB – 67.65 dB
PA Cis-(CHI _{0.045}) _x	72.34 dB – 13.47 dB	69.85dB – 10.98 dB

3. BLINDAGE BICOUCHE

3.1 Effet de l'angle d'incidence

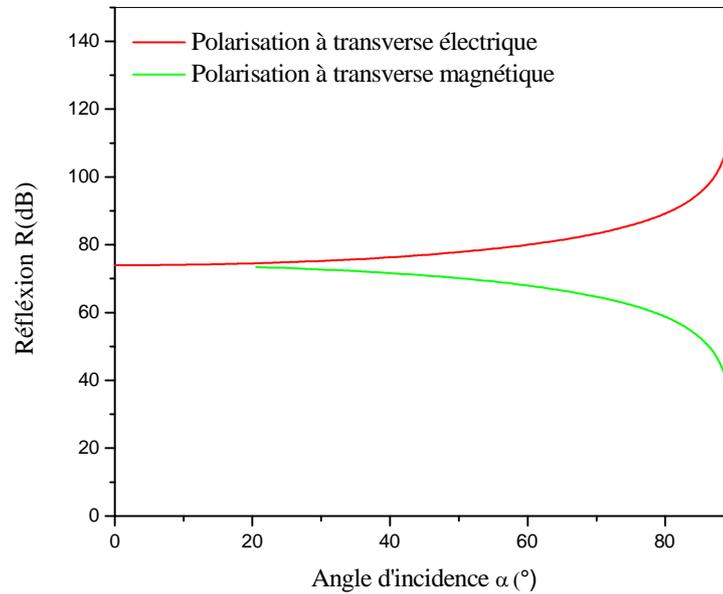


Figure III-11: Variation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x).

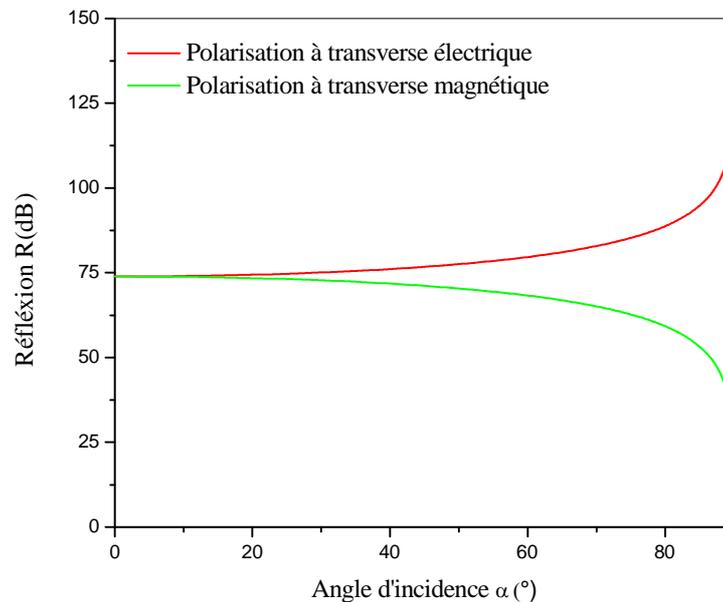


Figure III-12: Variation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.045})_x).

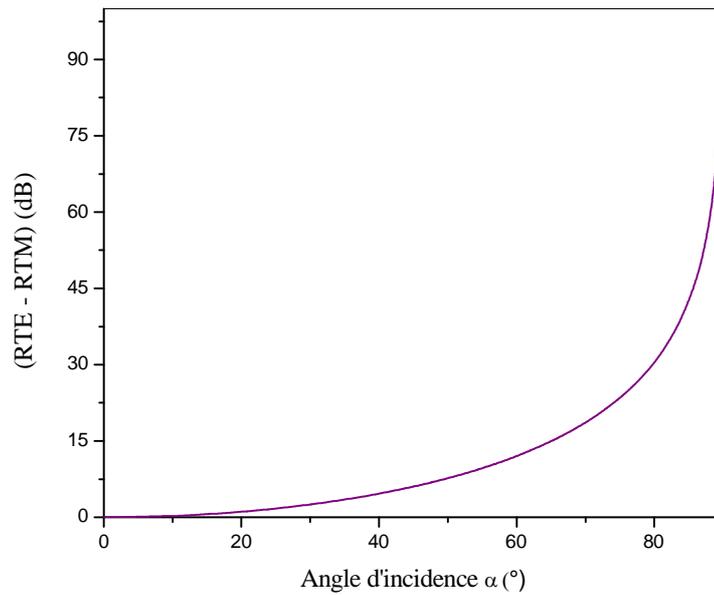


Figure III-13: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de l'angle d'incidence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0,8})_x).

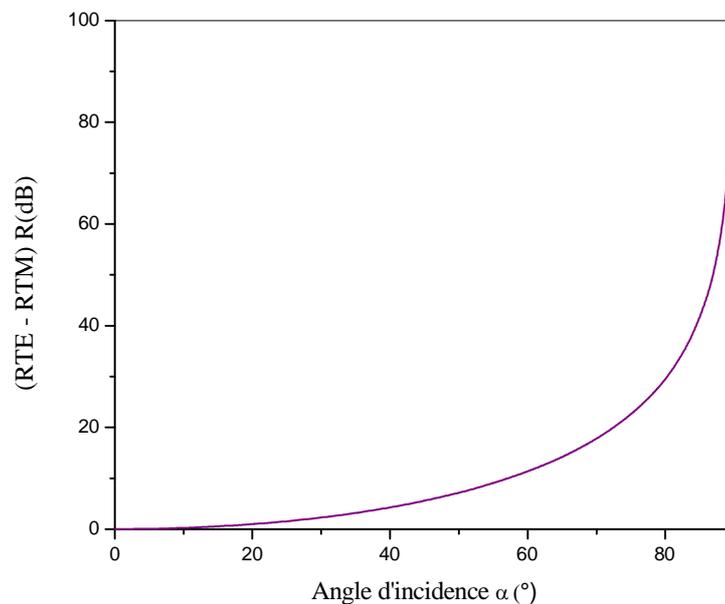


Figure III-14: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de l'angle d'incidence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0,045})_x).

Résultats et discussions

Les figures III-11 et III-12, représentent respectivement les variations de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour un blindage électromagnétique bicouches à base du nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec différents taux de dopage, et des polarisations à transverses électrique et magnétique. Sur ces figures, on remarque une augmentation de la réflexion en fonction de l'angle d'incidence dans le cas d'une polarisation à transverse électrique. Cette même réflexion diminue dans le cas d'une polarisation à transverse magnétique.

Les figures III-11 et III-12, montrent que pour une polarisation à transverse électrique la réflexion croît de 73.987 à 135.965 dB dans le cas d'un blindage à base du Nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 73.906 à 135.498 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%. Pour une polarisation à transverse magnétique, la réflexion décroît de 73.415 à 12.049 dB dans le cas d'un blindage à base du Nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 73.906 à 12.532 dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%. Ces variations, montrent que la réflexion est beaucoup plus importante dans le cas d'une polarisation à transverse électrique. La réflexion est liée à la désadaptation de l'onde électromagnétique lors d'un changement du milieu; elle dépend donc de l'impédance de la surface du matériau qu'elle rencontre.

Les figures III-13 et III-14, représentent respectivement les variations des écarts entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique. Sur ces figures, on remarque que cet écart est indépendant de la fraction volumique du dopant. En effet, dans les deux écrans du blindage l'écart de la réflexion croît de 0 à 123.91 dB.

Les différents résultats que nous avons obtenus, sont rassemblés dans le tableau ci-dessous:

	Polarisation électrique	Polarisation magnétique
Ni-PA Cis-(CHI _{0.8}) _x	73.987 dB – 135.965 dB	73.415 dB – 12.049 dB
Ni-PA Cis-(CHI _{0.045}) _x	73.906 dB – 135.498 dB	73.906 dB – 12.532 dB

3.2 Effet de la conductivité électrique

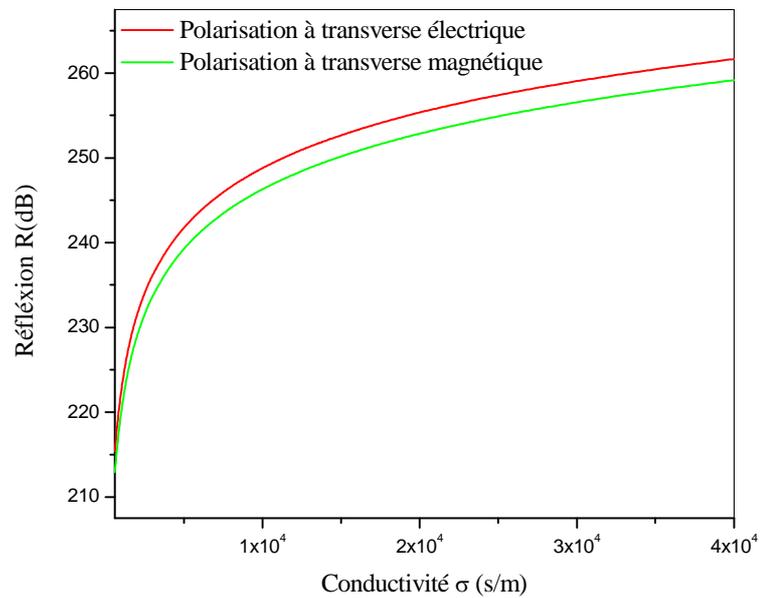


Figure III-15 : Variation de la réflexion en fonction de la conductivité électrique: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x).

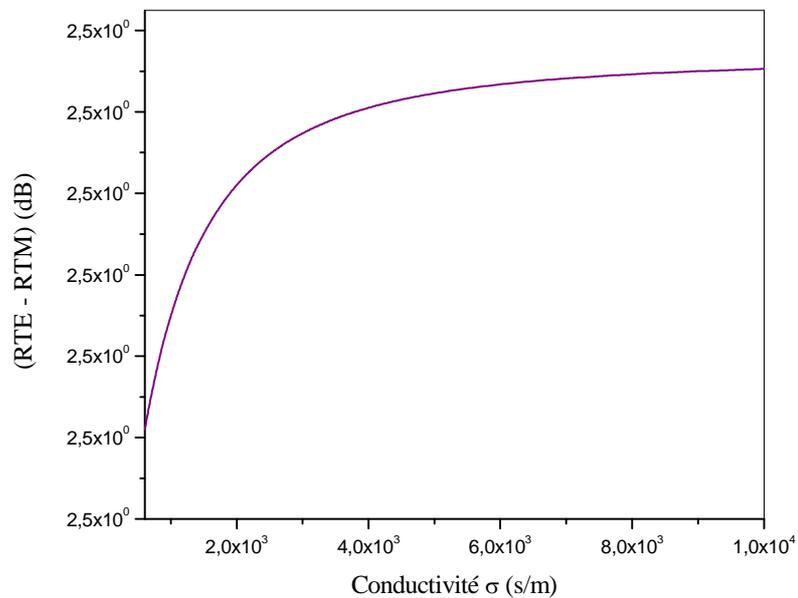


Figure III-16 : Variation de la différence RTE-RTM en fonction de la conductivité: cas du nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x.

La figure III-15, représente les variations de la réflexion en fonction de la conductivité électrique d'un blindage bicouches à base du nickel et du polyacétylène dopé à l'Iode pour des polarisations à transverses électrique et magnétique.

Cette figure, nous montre une augmentation de la réflexion en fonction de la conductivité pour les deux types de polarisation.

Cette augmentation varie sensiblement avec l'augmentation de la conductivité électrique de 600 à 10^3 s/m. Au-delà de cette valeur de la conductivité électrique, cette augmentation devient plus faible.

La figure III-15, montre que pour une polarisation à transverse électrique, la réflexion croit de 215.403 à 261.652 dB et de 212.906 à 259.156 dB pour une polarisation à transverse magnétique. Ces variations, montrent que la réflexion est légèrement meilleure dans le cas de la polarisation à transverse électrique.

La figure III-16, représente les variations de l'écart entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique en fonction de la conductivité électrique pour un blindage bicouche à base du nickel et du polyacétylène dopé à l'Iode. Sur cette figure, on remarque une légère augmentation de l'écart de la réflexion en fonction de l'augmentation de la conductivité électrique du matériau du blindage entre 2.4960 dB et 2.4961 dB. Ceci s'explique par le fait que la conductivité électrique influe de la même manière sur la réflexion dans les deux types de polarisation.

3.3 Effet de la fréquence

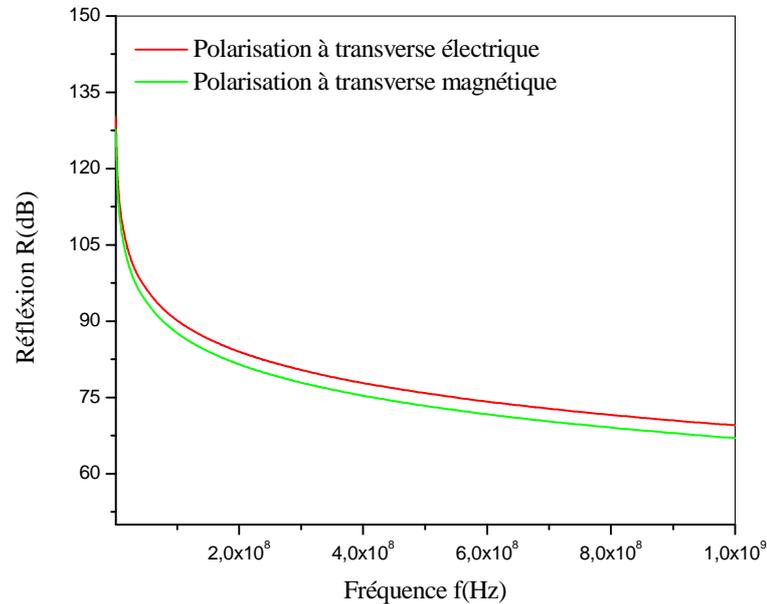


Figure III-17: Variation de la réflexion en fonction de la fréquence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.8})_x).

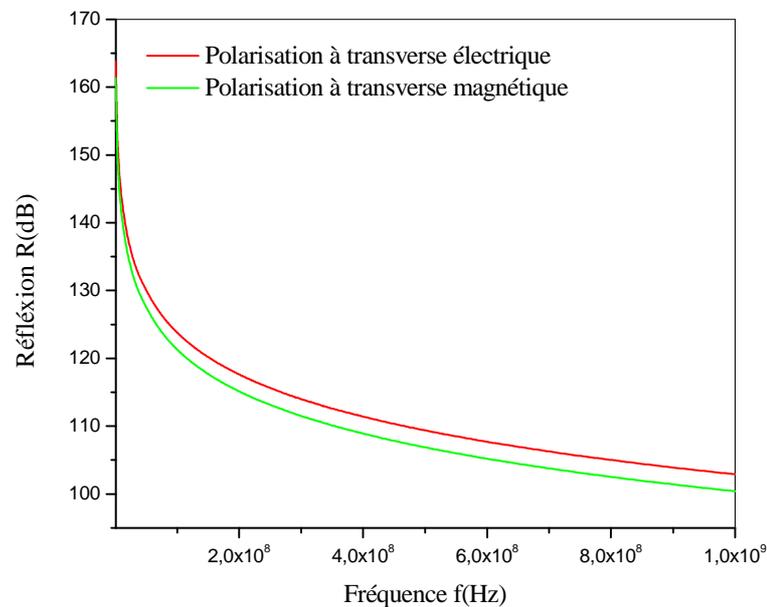


Figure III-18: Variation de la réflexion en fonction de la fréquence: cas du (nickel-polyacétylène Cis-(CHI_{0.045})_x).

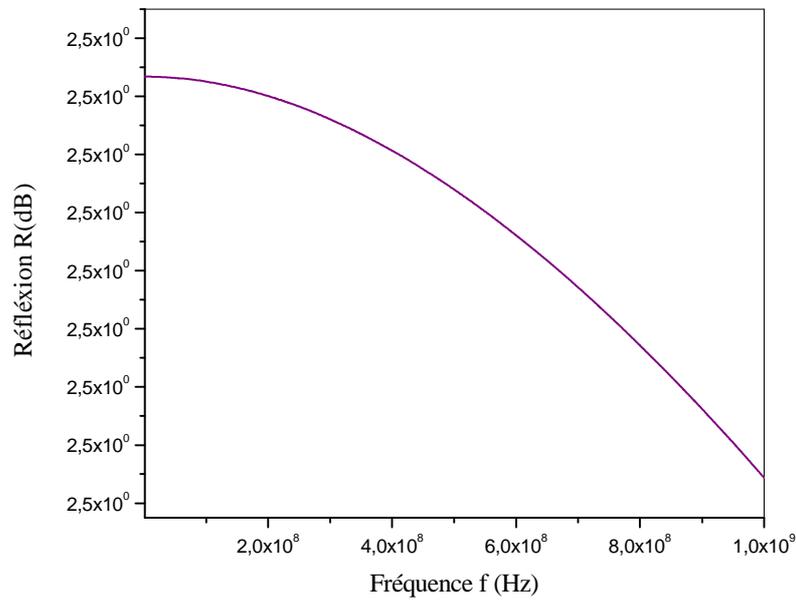


Figure III-19: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de la fréquence: cas du (nickel-polyacétylène $\text{Cis}-(\text{CHI}_{0.8})_x$).

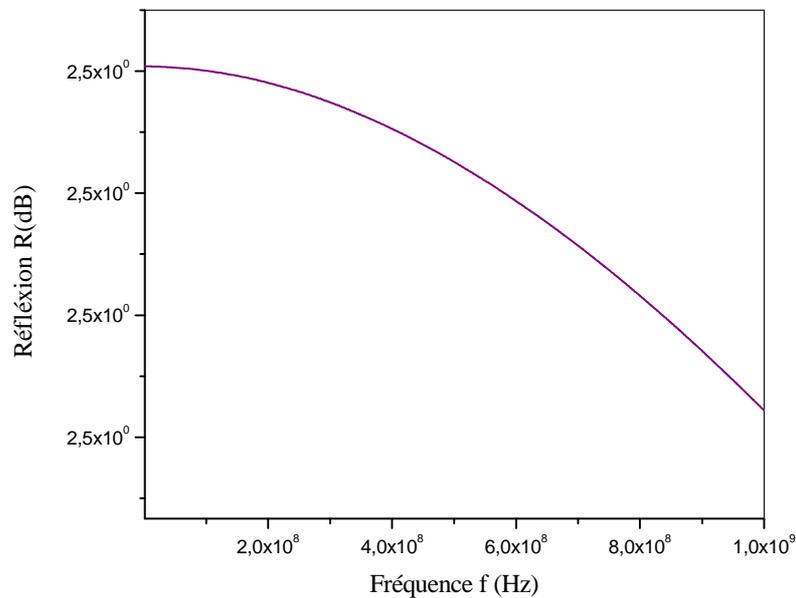


Figure III-20: Variation de la différence de la réflexion à transverses électrique et magnétique (RTE-RTM) en fonction de la fréquence: cas du (nickel-polyacétylène $\text{Cis}-(\text{CHI}_{0.045})_x$).

Résultats et discussions

Les figures III-17 et III-18, représentent respectivement les variations de la réflexion en fonction de la fréquence de la source de rayonnement pour un blindage bicouches à base du nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec différents taux de dopage, et des polarisations à transverses électrique et magnétique.

Sur ces figures, on remarque une diminution de la réflexion en fonction de la fréquence dans les deux types de polarisation.

Les figures III-17 et III-18, montrent que pour une polarisation à transverse électrique la réflexion décroît de 130.137 à 69.497 dB dans le cas d'un blindage bicouches à base du Nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 163.822 à 102.899 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5% lorsque la fréquence de la source de rayonnement varie entre 10^6 et 10^9 Hz.

Pour une polarisation à transverse magnétique, la réflexion décroît de 127.641 à 67.001 dB dans le cas d'un blindage bicouches à base du Nickel et du polyacétylène dopé à l'iode avec une fraction volumique de 80% et de 161.326 à 100.411 dB dans le cas d'une fraction volumique de 4.5%. Ces valeurs, montrent que les variations de la réflexion sont pratiquement les mêmes dans les deux types de polarisation.

Les figures III-19 et III-20, montrent respectivement les variations des écarts entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et la réflexion dans le cas d'une polarisation magnétique. Sur ces figures, on remarque que cet écart est indépendant de la fraction volumique du dopant. En effet, dans les deux écrans du blindage l'écart de la réflexion décroît de 2.4961 à 2.4846 dB.

Les différents résultats que nous avons obtenus, sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

	Polarisation électrique	Polarisation magnétique
PA Cis-(CHI _{0.8}) _x	128.72 dB – 69.65 dB	127.641 dB – 67.001 dB
PA Cis-(CHI _{0.045}) _x	161.326 dB – 100.411 dB	161.326 dB – 100.411 dB

RESUME

Ce travail est une contribution à l'étude théorique de la réflexion d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs pour des polarisations à transverses électrique et magnétique. Dans ce cadre, nous réalisons une étude sur les blindages électromagnétiques monocouche et bicouches à base de polymères conducteurs. Nous examinerons, respectivement, l'influence de l'angle d'incidence, de la conductivité électrique du polymère conducteur et de la fréquence de la source de rayonnement sur la réflexion.

Ce mémoire se subdivise en une introduction, trois chapitres et une conclusion générale.

Au premier chapitre, nous présentons certains concepts fondamentaux tel que, les polymères conducteurs et le blindage électromagnétique.

Au deuxième chapitre, nous présentons un calcul mathématique détaillé de l'impédance caractéristique et du coefficient de réflexion d'un blindage électromagnétique avec l'introduction de la notion de la matrice caractéristique du matériau de blindage.

Le troisième chapitre, constitue notre contribution personnelle. Dans ce chapitre, nous examinons les effets de l'angle d'incidence, de la conductivité électrique du polymère et de la fréquence de la source de rayonnement sur la réflexion.

Mots clés : polymère conducteur, blindage électromagnétique, réflexion, polarisations électrique et magnétique.

ABSTRACT

This work is a theoretical contribution to the study of the electromagnetic shielding reflection of conductive polymers for electrical and magnetic polarization. We are going to examine the effect of incidence angle, electrical conductivity and frequency on the reflexion.

This memory subdivides one introduction, three chapters and a general conclusion.

At first, we present some fundamental concepts, as conductive polymer, electrical and magnetic fields, electromagnetic shielding and electromagnetic wave.

In the second chapter, we present a detailed mathematical calculation of characteristic impedance and the reflexion coefficient.

In the last chapter, we are going to examine the effects of the incidence angle, the electrical conductivity and the frequency.

Keys words: conductive polymer, electromagnetic shielding, reflexion, electrical and magnetic polarization.

ملخص

هذا العمل عبارة عن مساهمة نظرية لدراسة انعكاس الأمواج بواسطة حاجز كهرومغناطيسي مصنع باللدائن الناقلة. ندرس على التوالي مفعول الزاوية، مفعول الناقلية الكهربائية و مفعول التواتر. هذه المذكرة تنقسم إلى مقدمة، ثلاثة فصول و خاتمة. في الفصل الأول نتعرف على بعض المفاهيم العامة لفهم و شرح النتائج مثل: اللدائن الناقلة و الحماية الكهرومغناطيسية. الفصل الثاني يتضمن براهين رياضية لحساب معامل الإنعكاس. في الفصل الثالث نتعرض إلى تأثير العوامل السابقة على معامل الإنعكاس

المفاتيح: اللدائن الناقلة، الحماية الكهرومغناطيسية، الإنعكاس، الإستقطاب الكهربائي و المغناطيسي.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce mémoire de master, nous avons entrepris l'étude de la réflexion d'un blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs.

Cette étude nous a permis de mettre en évidence les effets de l'angle d'incidence, de la conductivité électrique et de la fréquence de la source de rayonnement sur la réflexion des blindages électromagnétiques monocouche et bicouches à base de polymères conducteurs.

En particulier, nous avons discuté les effets de l'angle d'incidence, de la conductivité électrique et de la fréquence de la source de rayonnement sur la réflexion et l'écart de la réflexion dans le cas d'une polarisation à transverses électrique et magnétique des blindages électromagnétiques monocouche et bicouches.

Pour mettre en évidence l'influence de l'angle d'incidence sur la réflexion des blindages électromagnétiques monocouche et bicouches à base de polymères conducteurs, nous avons pris des fractions volumiques du dopant de 80% et de 4.5% respectivement. Ces fractions volumiques induisent des conductivités électriques de 1.9710^5 s/m et de 300 s/m. Nous avons fixé la fréquence de la source de rayonnement à 300 MHz.

Pour mettre en évidence les effets de la conductivité électrique du polymère conducteurs sur la réflexion des blindages électromagnétiques monocouche et bicouches, nous avons fixé l'angle d'incidence à 30° . La fréquence de la source de rayonnement est toujours fixée à 300 MHz.

Pour mettre en évidence l'effet de la fréquence de la source de rayonnement, l'angle d'incidence du rayonnement électromagnétique est fixé à 30° . Nous avons pris des fractions volumiques du dopant de 80% et de 4.5% respectivement. Ces fractions volumiques induisent des conductivités électriques de 1.9710^5 s/m et de 300 s/m.

Effet de l'angle d'incidence

Les différents résultats que nous avons obtenus, montrent que la réflexion augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence dans le cas d'une polarisation à transverse électrique et diminue dans le cas d'une polarisation à transverse magnétique dans les différents types de blindages.

La réflexion est beaucoup plus importante pour une polarisation à transverse électrique que celle pour une polarisation à transverse magnétique. Nos résultats montrent, aussi, que l'écart entre la réflexion dans le cas d'une polarisation à transverses électrique et magnétique augmente toujours avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

Cet écart est indépendant de la nature du polymère conducteur constituant le blindage. Il est aussi indépendant du nombre de couche ; en effet cet écart est le même dans le cas du blindage monocouche et bicouches.

Effet de la conductivité électrique

Les différents résultats que nous avons obtenus révèlent que :

D'une part, pour les deux types de polarisation la réflexion augmente avec l'augmentation de la conductivité électrique du polymère conducteur. Cette augmentation est très sensible pour des conductivités électriques comprises entre 600 et 10^3 . La réflexion est plus grande dans le cas d'une polarisation à transverse électrique.

D'autre part, l'écart entre la réflexion dans le cas d'une polarisation à transverse électrique et d'une polarisation à transverse magnétique augmente avec l'augmentation de la conductivité électrique. Cet écart est indépendant de la nature du polymère et du nombre de couche.

Effet de la fréquence de la source de rayonnement

Pour les quatre blindages électromagnétiques étudiés, la réflexion diminue avec l'augmentation de la fréquence de la source de rayonnement pour les deux types de polarisations. Les résultats que nous avons obtenus

Conclusion générale et perspectives

montrent aussi que l'écart entre la réflexion dans le cas d'une polarisation électrique et d'une polarisation magnétique diminue aussi avec l'augmentation de la fréquence de la source de rayonnement.

PERSPECTIVES

A la lumière des résultats que nous avons obtenus dans ce travail, nous suggérons de consacrer ultérieurement nos activités de recherches à l'étude des problèmes suivants :

1. Effet de la nature du dopant sur la réflexion et les réflexions multiples d'un blindage électromagnétique multicouches.
2. Effet de la taille et de la géométrie des nanoparticules sur l'efficacité d'un blindage électromagnétique.

CHAPITRE I
CONCEPTS GENERAUX

CHAPITRE II
FORMALISME MATHÉMATIQUE

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSIONS

CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES

INTRODUCTION GENERALE

REMERCIEMENT

**Mémoire
de Master**

Thème
**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Présenté par
Mme. Nadia BELARBI

**Mémoire
de Master**

Thème
**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Présenté par
Mme. Nadia BELARBI

**Mémoire
de Master**

Thème
**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Présenté par
Mme. Nadia BELARBI

**Mémoire
de Master**

Thème
**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Présenté par
Mme. Nadia BELARBI

**Mémoire
de Master**

Thème
**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

Présenté par
Mme. Nadia BELARBI

Thème

**Contribution à l'étude de la réflexion d'un blindage
électromagnétique à base de polymères conducteurs**

