



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Physique des Polymères

Par :

Mr. BENHAMOU Sidi Mohamed

Sur le thème

Contribution à l'étude théorique de l'efficacité du blindage électromagnétique multicouche à base de polymères conducteurs: Cas d'une incidence oblique.

Soutenue publiquement le 13/03/2016 à Tlemcen devant le jury composé de :

BERRAYAH Abdelkader	Professeur	Université de Tlemcen	Président
HAMOUNI Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
KHALDI Smain	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Directeur de thèse
TRIKI Houria	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
BENDAOU Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel-abbès	Examineur
MECHERNENE Lahcen	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
OULD-KADDOUR Fouzia	Professeur	Université de Tlemcen	Invitée

*Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules (LRM)
Bloc laboratoires de recherche, Faculté des sciences, Pôle Chetouane
Tlemcen-Algérie*

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été effectué au sein du Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules (LRM), département de physique, Faculté des sciences, Université de Tlemcen. Je remercie tout le personnel de ce laboratoire qui m'a accueilli et qui m'a fourni les moyens matériels pour mener à bien cette étude.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Mohammed HAMMOUNI, Professeur à l'Université de Tlemcen, en tant que directeur de thèse, de m'avoir fait l'honneur d'avoir dirigé ce travail de recherche. Je le remercie pour son aide précieuse, pour le temps qu'il m'a consacré, pour la confiance qui m'a accordée tout au long de ce parcours de recherche très bénéfique et pour ses conseils scientifiques ses qualités humaines qui m'ont permis d'être très à l'aise lors de la discussion avec lui.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur Smain KHALDI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour ses conseils scientifiques et ses encouragements qui m'ont à chaque fois apporté la motivation nécessaire à l'avancement de mes travaux de recherche.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur Abdelkader BERRAYAH, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

J'exprime ma gratitude envers Madame Houria TRIKI, Professeur à l'Université d'Annaba et Monsieur Abdelber BENDAOUD, Professeur à l'Université de Sidi Bel-abbès pour avoir évalué ce travail de thèse et avoir accepté d'en faire parti du jury.

Que Monsieur Lahcen MECHERNENE, Professeur à l'Université de Tlemcen, soit chaleureusement remercié pour avoir bien voulu mobiliser de son temps et de ses compétences pour juger ce travail et participer au jury de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Fouzia OULD-KADDOUR, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour ses conseils très utiles et ses encouragements permanents.

Enfin, un grand merci à mes amis et collègues enseignants de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger (ENSTP) et de l'Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques de Tlemcen (EPSTT) qui m'ont supporté, accompagné et soutenu.

A mes chers parents qui m'ont tout donné

A mes chers frères et sœurs

A toute la famille

A tous mes amis (es)

A ma femme

A mes deux anges: Barae et Amir

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

$A[dB]$	perte par absorption
$B[dB]$	atténuation par réflexion internes multiples
$d[mm]$	épaisseur de la couche
$\vec{E}[V.m^{-1}]$	champ électrique
$E_0[V.m^{-1}]$	amplitude complexe du champ électrique
$f[Hz]$	fréquence de l'onde électromagnétique
$f_c[Hz]$	fréquence de coupure
$f_{cm}[Hz]$	fréquence de coupure d'un blindage multicouche
$f_{cs}[Hz]$	fréquence de coupure d'un blindage simple
$\vec{H}[A.m^{-1}]$	champ magnétique
$H_0[V.m^{-1}]$	amplitude complexe du champ magnétique
i	nombre imaginaire
$I[A]$	courant électrique
$k[m^{-1}]$	vecteur d'onde
$k_i[m^{-1}]$	vecteur d'onde incident
$k_r[m^{-1}]$	vecteur d'onde réfléchi
$k_t[m^{-1}]$	vecteur d'onde transmis
$L[m]$	longueur du conducteur
$r[m]$	distance entre la source et le blindage
$R[dB]$	atténuation par réflexion
$S[m^2]$	section de la boucle
$SE[dB]$	efficacité du blindage
t	exposant critique
T	coefficient de transmission

$Z_0[\Omega]$	impédance de l'air
$\delta[m]$	épaisseur de peau
$\varepsilon_0[F.m^{-1}]$	permittivité électrique du vide
$\varepsilon[F.m^{-1}]$	permittivité diélectrique
$\theta_i[^\circ]$	angle d'incidence
$\theta_r[^\circ]$	angle de réflexion
$\theta_t[^\circ]$	angle de transmission
$\lambda[m]$	longueur d'onde électromagnétique
$\mu_0[H.m^{-1}]$	perméabilité de l'air
$\mu[H.m^{-1}]$	perméabilité magnétique
ρ	densité volumique
$\sigma_0[S.m^{-1}]$	conduction des inclusions conductrices
$\sigma[S.m^{-1}]$	conductivité électrique
ϕ	fraction volumique
ϕ_c	fraction volumique critique
$\varphi[^\circ]$	longitude
$\psi[^\circ]$	colatitude
$\omega[rad/s]$	pulsation

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Listes des polymères conducteurs et leurs abréviations	6
Tableau II.1: Champs électrique, magnétique et impédance en champ proche et champ lointain	35
Tableau III.1: Caractéristiques des matériaux sectionnés pour le blindage électromagnétique	67
Tableau III.2: Conductivités, perméabilités relatives et épaisseurs des matériaux sectionnés pour le blindage électromagnétique	89

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles	7
Figure I.2: Schéma explicatif de la conductivité électrique des polymères conducteurs	8
Figure I.3: Schéma descriptif de la formation par dopage du polaron, bipolaron, et une paire soliton sur une chaîne polymérique	10
Figure I.4: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K	11
Figure I.5: Mise en place de la synthèse électrochimique	13
Figure I.6: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère	15
Figure I.7: Structure du polypyrrole	16
Figure I.8: Structure de la polyaniline	17
Figure I.9: Structure du (PEDOT)	17
Figure I.10: Variation de la conductivité de films de PANI-(CSA)0.5/PU en fonction de la concentration massique de PANI	18
Figure I.11: Variation de la conductivité électrique de films de PPy-CHI en fonction de la concentration de CHI	19
Figure I.12: Illustration de la synthèse de nanocomposite conducteur polymère/nanofils métalliques	20
Figure I.13: Illustration du mouvement des électrons dans un composite nanotubes de carbone/polymère	21
Figure I.14: Classification des CPC en fonction de leurs résistivités électriques et leurs domaines d'application	21
Figure II.1: Blindage électromagnétique extérieur ↔ intérieur	29
Figure II.2: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2).....	30
Figure II.3: Polarisation d'une onde électromagnétique	32
Figure II.4: Modélisation d'une source électrique: dipôle rayonnant	33
Figure II.5: Modélisation d'une source magnétique: boucle rayonnante	34
Figure II.6: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source-matériau	35
Figure II.7: Mécanisme du blindage électromagnétique	36
Figure II.8: Pénétration d'une onde électromagnétique à une incidence normale	39

Figure II.9: Pénétration d'une onde électromagnétique de polarisation électrique	42
Figure II.10: Blindage monocouche sous une onde électromagnétique polarisée horizontalement	45
Figure II.11: Représentation schématique d'onde électromagnétique pénétrant une structure multicouche	49
Figure III.1: Incidence d'une onde électromagnétique sur une structure multicouche	56
Figure III.2: Incidence d'une onde électromagnétique sur la couche j	56
Figure III.3: Champs électromagnétiques aux interfaces	60
Figure III.4: Propagation d'une onde électromagnétique dans un bon conducteur	62
Figure III.5: Equivalence entre le blindage mono et multicouche	66
Figure III.6: Atténuation par réflexion en champ lointain de: (a) PANI44/PU et (b) (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence	68
Figure III.7: Atténuation par réflexion en champ lointain de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	69
Figure III.8: Atténuation par réflexion en champ proche de PANI44/PU à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source	70
Figure III.9: Atténuation par réflexion en champ proche de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source	71
Figure III.10: Atténuation par réflexion pour un champ électrique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	72
Figure III.11: Atténuation par réflexion pour un champ magnétique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	72
Figure III.12: Perte par absorption de PANI44/PU à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence	73
Figure III.13: Perte par absorption de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence	74
Figure III.14: Variation de l'efficacité du blindage en champ lointain de: (a) PANI44/PU et (b) (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence	75
Figure III.15: Variation de l'efficacité du blindage en champ lointain de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	76

Figure III.16: Variation de l'efficacité du blindage en champ proche de PANI44/PU à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source	77
Figure III.17: Variation de l'efficacité du blindage en champ proche de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source	78
Figure III.18: Efficacité du blindage pour un champ électrique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	79
Figure III.19: Efficacité du blindage pour un champ magnétique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	79
Figure III.20: Atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence de: (a) CNTs et (b) (Ni – CNTs – Al).....	90
Figure III.21: Atténuation par réflexion de (CNTs) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	91
Figure III.22: Atténuation par réflexion de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence	92
Figure III.23: Atténuation par réflexions internes multiples en fonction de l'angle d'incidence de: (a) une couche de (CNTs) et (b) une structure multicouche composée de (Ni – CNTs – Al)	93
Figure III.24: Atténuation par réflexions internes multiples de 0.3 mm de (CNT2wt.%) en fonction de l'angle d'incidence	94
Figure III.25: Atténuation par réflexions internes multiples en fonction de la fréquence	95
Figure III.26: Perte par absorption de (CNTs) en fonction de la fréquence .	97
Figure III.27: Perte par absorption de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence	97
Figure III.28: Dépendance de l'efficacité du blindage de (CNTs) avec l'angle d'incidence pour: (a) matériau électriquement mince $f = 10\text{ KHz} \ll f_{cs} = 128\text{ MHz}$ et (b) matériau électriquement épais $f = 10\text{ GHz} \gg f_{cs} = 128\text{ MHz}$	98
Figure III.29: Dépendance de l'efficacité du blindage de (Ni – CNTs – Al) avec l'angle d'incidence pour: (a) matériau électriquement mince $f = 10\text{ KHz} \ll f_{cm} = 21\text{ KHz}$ et (b) matériau électriquement épais $f = 10\text{ GHz} \gg f_{cm} = 21\text{ KHz}$	99
Figure III.30: Variation de l'efficacité du blindage de (CNTs) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence quand: (a) $f < f_{cs}$ et (b) $f > f_{cs}$	101
Figure III.31: Variation de l'efficacité du blindage de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence quand: (a) $f < f_{cm}$ et (b) $f > f_{cm}$	102

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Bibliographie.....	4
Chapitre I: Généralités sur les polymères conducteurs	
Introduction	5
1. Historique.....	5
2. Polymères conducteurs intrinsèques (PCI).....	7
2.1. Mécanisme de conduction.....	7
2.2. Le dopage.....	8
2.3. Synthèse et préparation	11
2.3.1.Synthèse chimique	12
2.3.2.Synthèse électrochimique	12
3. Polymères conducteurs extrinsèques ou polymères conducteurs composites (CPC).....	13
4. Polymères conducteurs les plus étudié	15
4.1. Le polypyrrole	15
4.2. La polyaniline	16
4.3. Polythiophène et ses dérivées	17
5. Exemple de synthèse de quelques polymères	18
5.1. (Polyaniline + Acide Camphre Sulfonique)-polyuréthane	18
5.2. Polypyrrole-Chitosane	18
5.3. Nanocomposite conducteur polymère/nanofils métalliques et nanotubes de carbone/polymères	19
6. Application des polymères conducteurs en blindage électromagnétique	21
Bibliographie.....	23
Chapitre II: Notions sur le blindage électromagnétique	
Introduction	29
1. Interaction onde électromagnétique/matière	30
1.1. Définition et propriétés d'une onde électromagnétique plane ..	30
1.2. Propagation d'une onde électromagnétique	30
1.3. Polarisation linéaire d'une onde électromagnétique	31

2. Source électrique et source magnétique	32
2.1. Source électrique (dipôle rayonnant)	32
2.2. Source magnétique (boucle rayonnante).....	33
3. Champ proche et champ lointain	34
4. Mécanismes physiques d'un blindage électromagnétique	36
4.1. Atténuation par réflexion	37
4.2. Perte par absorption	37
4.3. Atténuation par réflexions internes multiples	38
5. Détermination de l'efficacité du blindage	38
5.1. Blindage monocouche en champ lointain	38
5.1.1.Cas d'une incidence normale	38
5.1.2.Cas d'une incidence oblique	41
a- Polarisation transversale électrique (TE).....	42
b- Polarisation transversale magnétique (TM).....	45
5.2. Blindage multicouche en champ lointain	48
6. Blindage électromagnétique en champ proche	40
Conclusion	50
Bibliographie	52

Chapitre III: Résultats et discussions

Introduction	54
Partie 1: Equivalence entre le blindage monocouche et le blindage multicouche	55
1. Formalisme matriciel de la théorie de la ligne de transmission	56
1.1. La matrice caractéristique	56
1.2. Impédance caractéristique	59
1.3. Calcul des coefficients de transmission et de réflexion	60
2. Blindage électromagnétique à base de bons conducteurs	62
2.1. Blindage monocouche	62
2.1.1 En champ lointain	62
2.1.2 En champ proche	63
2.2. Blindage multicouche	64
2.2.1.En champ lointain	64
2.2.2.En champ proche	65

3. Equivalence entre le blindage monocouche et le blindage multicouche	65
4. Applications	67
4.1. Atténuation par réflexion	68
4.1.1. En champ lointain	68
a- Effet de l'angle d'incidence	68
b- Effet de la fréquence	69
4.1.2. En champ proche	70
a- Effet de l'angle d'incidence	70
b- Effet de la fréquence	71
4.2. Perte par absorption	73
4.3. Efficacité du blindage	74
4.3.1. En champ lointain	75
a- Effet de l'angle d'incidence	75
b- Effet de la fréquence	76
4.3.2. En champ proche	77
a- Effet de l'angle d'incidence	77
b- Effet de la fréquence	78
Partie 2: Formalisme matriciel de la ligne de transmission: Cas des matériaux bons conducteurs électriquement minces et électriquement épais	81
1. Première étape d'approximation: formalisme matriciel pour un bon conducteur	83
1.1. Blindage simple (monocouche)	83
1.2. Blindage multicouche	84
2. Deuxième étape d'approximation: matériaux électriquement minces et électriquement épais	84
2.1. Blindage simple (monocouche)	85
2.1.1. Matériau électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$)	85
2.1.2. Matériau électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$)	85
2.2. Blindage multicouche	86
2.2.1. Matériau électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$)	87
2.2.2. Matériau électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$)	87
3. Applications	88
3.1. Atténuation par réflexion	89
3.1.1. Effet de l'angle d'incidence	89
3.1.2. Effet de la fréquence	91

3.2. Atténuation par réflexions internes multiples	92
3.2.1.Effet de l'angle d'incidence	93
3.2.2.Effet de la fréquence	95
3.3. Perte par absorption	96
3.4. Efficacité du blindage	98
3.4.1.Effet de l'angle d'incidence	98
3.4.2.Effet de la fréquence	100
Conclusion	103
Bibliographie	105
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	107

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, les interférences électromagnétiques sont devenues un problème majeur en raison de prolifération des appareils électriques commerciaux, militaires et scientifiques qui émettent des ondes électromagnétiques. En outre de son interférence facile avec les dispositifs électroniques, le rayonnement électromagnétique génère des impacts nuisibles sur la santé humaine. Suite à cette intense pollution électromagnétique, des blindages sont conçus et développés pour inhiber ces rayonnements indésirables [1]. Généralement, les matériaux de bonne conductivité électrique tels que le cuivre, l'aluminium et le nickel exhibent de bonnes performances de blindage électromagnétique. Cependant, dans certaines applications, le matériel utilisé en blindage, en plus d'être efficace, doit être léger et souple, en particulier dans des applications électroniques et l'industrie aéronautique ou automobile [2]. Le choix du matériau de blindage est selon le type d'application: civiles (atténuation des puissances d'ondes $> 40\text{dB}$) ou militaires (atténuation des puissances d'ondes $> 80\text{dB}$). Par conséquent, une importante attention a été consacrée au développement de ces de matériaux [3, 4]. En raison de leur faible densité, la facilité de synthèse, la possibilité de varier facilement les propriétés électriques et le prix de revient réduit, les polymères conducteurs peuvent être de forts candidats pour le blindage électromagnétique [4]. Ces matériaux peuvent présenter des caractéristiques électriques relativement similaires aux conducteurs classiques tels que le cuivre, l'aluminium et le nickel, avec un poids plus léger et une bonne stabilité environnementale [5]. Néanmoins, l'une des méthodes qui permet de bénéficier de tous les avantages en blindage électromagnétique offerts par tous ces matériaux déjà cités (conducteurs classiques ou polymères conducteurs) est de les associer en formant une structure multicouche.

La théorie de la ligne de transmission sous la forme matricielle est utilisée pour modéliser la propagation d'une onde électromagnétique dans une structure constituée d'un empilement de couches [6]. La majeure partie des travaux qui ont été effectués à l'aide de cette théorie, suppose que l'incidence est normale, en ignorant par conséquent, les effets de la

polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique sur les caractéristiques du blindage résultant.

Notre travail de thèse s'inscrit dans ce contexte et vise à apporter une contribution significative à l'étude théorique de l'efficacité d'un blindage électromagnétique multicouche à base de polymères conducteurs dans le cas d'une incidence oblique des ondes électromagnétiques. A cet effet, nous proposons, dans une première partie, une nouvelle approche permettant d'étudier le blindage électromagnétique et dans une deuxième partie, une simplification mathématique du formalisme matriciel de la ligne de transmission.

Notre travail est divisé en trois chapitres déclinés comme suit:

Le premier chapitre est une recherche bibliographique consacrée aux polymères conducteurs. Ainsi, après avoir exposé l'historique des polymères conducteurs, nous abordons le mécanisme de conduction et les différentes méthodes de synthèse et de préparation de ces matériaux. Les polymères conducteurs les plus étudiés y sont cités et quelques exemples de synthèse y sont rapportés. En fin de ce chapitre, nous rappelons certaines applications des polymères conducteurs, en particulier, celles traitant le blindage électromagnétique.

Le deuxième chapitre porte sur des concepts relatifs au blindage électromagnétique. Nous abordons ce chapitre en rappelant les notions relatives à l'interaction onde électromagnétique matière et la définition des limites de zone champ proche et champ lointain. Les mécanismes physiques d'un blindage électromagnétique (l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples et la perte par absorption) sont également traités. A la fin de ce chapitre, nous présentons le calcul de l'efficacité du blindage électromagnétique à l'aide de la théorie de la ligne de transmission, en champ lointain et en champ proche, pour des incidences normale et oblique en tenant compte du type de polarisation de l'onde électromagnétique.

Le troisième chapitre est constitué de deux parties, consacrées essentiellement à l'étude théorique des propriétés du blindage électromagnétique mono et multicouche. Dans la première partie, après avoir présenté le formalisme matriciel de la ligne de transmission, nous proposons une approche permettant de modéliser et de calculer l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage multicouche en effectuant une analogie entre le blindage simple et le blindage multicouche. A cet effet, une nouvelle formule de l'impédance équivalente d'une structure multicouche sera établie. Dans la deuxième partie, nous effectuons une simplification mathématique du formalisme matriciel afin d'aboutir à des formules simples et faciles à utiliser des atténuations par réflexion, par réflexions internes multiples, de la perte par absorption et de l'efficacité du blindage multicouche à base de bons conducteurs. Dans les deux parties, une analyse sera effectuée des atténuations par réflexion et par réflexions internes multiples, de la perte par absorption et de l'efficacité du blindage électromagnétique d'une couche de polymère conducteur et celui d'une structure multicouche obtenue à partir de polymère conducteur associé à des bons conducteurs classiques. Ces quantités seront calculées et analysées, en particulier, en fonction de l'angle d'incidence pour les deux types de polarisation de l'onde électromagnétique; électrique et magnétique et en fonction de la fréquence en considérant des différents scénarios possibles: en champ lointain ou en champ proche (source électrique ou magnétique) et matériau électriquement mince ou électriquement épais.

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] Zhang L, Alvarez NT, Zhang M, Haase M, Malik R, Mast D, Shanov V. Preparation and characterization of graphene paper for electromagnetic interference shielding. *CARBON.* **2015**; 82: 353 – 359.
- [3] Jin L, Haiyan Z, Ping L, Xijiang Y, Guoxun Z. The Electromagnetic Shielding Effectiveness of a Low-Cost and Transparent Stainless Steel Fiber/Silicone Resin Composite. *IEEE Trans. on EMC.* **2014**; 56: 328 – 334.
- [4] Zhou J, He J, Li G, Wang T, Sun D, Ding X, Zhao J, Wu S. Direct Incorporation of Magnetic Constituents within Ordered Mesoporous Carbon-Silica Nanocomposites for Highly Efficient Electromagnetic Wave Absorbers. *J. Phys. Chem. C.* **2010**; 114: 7611 – 17.
- [5] Song WL, Cao MS, Fan LZ, Lu MM, Li Y, Wang CY, Ju HF. Highly ordered porous carbon/wax composites for effective electromagnetic attenuation and shielding. *CARBON.* **2014**; 77: 130 – 142.
- [6] Thomassin JM, Jérôme C, Pardoën T, Bailly C, Huynen I, Detrembleur C. Polymer/carbon Based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Mat. Sci Eng R.* **2013**; 74: 211 – 232.

CHAPITRE I

Généralités sur les
polymères conducteurs

INTRODUCTION

L'amélioration des propriétés des polymères a permis d'étendre leur présence dans de nombreux secteurs: industrie automobile, emballage, industrie spatiale, fabrication d'instruments pour la médecine, etc... Les polymères sont connus pour être de très bons isolants électriques et sont notamment utilisés pour cette propriété dans diverses applications (isolation de câbles, tableaux et armoires électriques, ...). Cependant, certaines applications spécifiques exigent la conception de nouveaux matériaux associant les propriétés mécaniques des polymères classiques et les propriétés électriques des matériaux conducteurs. Ces propriétés peuvent résulter de la structure chimique du matériau en elle-même ou d'une incorporation des inclusions dans le polymère. Ces nouveaux matériaux, possédant une conductivité électrique, sont nommés polymères conducteurs.

Les polymères conducteurs peuvent présenter de très bonnes propriétés électriques et optiques, un rapport conductivité/poids élevé et un aspect biocompatible, biodégradable et poreux [1]. En outre, leurs propriétés chimiques, physiques et électriques peuvent être modifiées, contrôlées et même optimisées, même après leurs synthèse, pour les adapter aux besoins spécifiques de leurs applications industrielles: la protection contre la corrosion, la métallisation des plastiques, la réalisation de nouveaux capteurs ou la fabrication d'éléments chauffants [2, 3].

Dans ce chapitre, nous rassemblons de nombreuses informations disponibles dans la littérature spécialisée sur les polymères conducteurs: types, utilisations, applications, conductivités et synthèses.

1. HISTORIQUE

Les premiers travaux sur les polymères conducteurs ont été réalisés après l'observation selon laquelle la conductivité du polyacétylène, un polymère qui est au meilleur un semi-conducteur, augmente de 10 millions de fois lorsque le polyacétylène est oxydé en utilisant la vapeur d'iode [4, 5]. Ce processus qui permet d'augmenter la conductivité du polymère est appelé dopage. Comme le polyacétylène est difficile à synthétiser et instable à

l'oxygène de l'air, d'autres polymères conducteurs, avec une stabilité plus importante à l'air, ont été développés, tels que le polyparaphénylène, le polythiophène, le polypyrrole ou la polyaniline [1]. Aujourd'hui, il existe plus de 20 polymères conducteurs listés dans le tableau I.1 [6 – 9].

Polymères conducteurs	Abréviations
Polypyrrole	(PPy)
Polyaniline	(PANI)
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)	(PEDT, PEDOT)
Polythiophene	(PTh)
Polythiophene-vinylene	(PTh-V)
Poly(2,5-thienylenevinylene)	(PTV)
Poly(3-alkylthiophene)	(PAT)
Poly(p-phenylene)	(PPP)
Poly-p-phenylene-sulphide	(PPS)
Poly(p-phenylenevinylene)	(PPV)
Poly(p-phenylene-terephthalamide)	(PPTA)
Polyacetylene	(PAc)
Poly(isothianaphthene)	(PITN)
Poly(a-naphthylamine)	(PNA)
Polyazulene	(PAZ)
Polyfuran	(PFu)
Polyisoprene	(PIP)
Polybutadiene	(PBD)
Poly(3-octylthiophene-3-methylthiophene)	(POTMT)
Poly(p-phenylene-terephthalamide)	(PPTA)

Tableau I.1: Liste des polymères conducteurs et leurs abréviations [6 – 9].

Les efforts des chercheurs ont porté d'une part sur la compréhension des mécanismes de conduction, d'autre part sur la synthèse chimique en vue d'accroître la conductivité, de faciliter la mise en œuvre (solubilité en particulier) et d'améliorer la tenue au vieillissement des polymères conducteurs [10, 11].

2. POLYMERES CONDUCTEURS INTRINSEQUES (PCI)

Les polymères deviennent conducteurs grâce à la mobilité facile des électrons à l'intérieur et entre les chaînes du polymère [1]. En réalité, la conductivité est un résultat de combinaison de certains facteurs.

2.1. Mécanisme de conduction

Les polymères conjugués sont ceux possédant une chaîne principale formée par une série d'alternance de liaisons simples et doubles [4]. Les liaisons simples contiennent une forte liaison chimique (type σ), les liaisons doubles contiennent en plus, une liaison moins forte (type π) [12], ceci est représenté par la figure I.1.

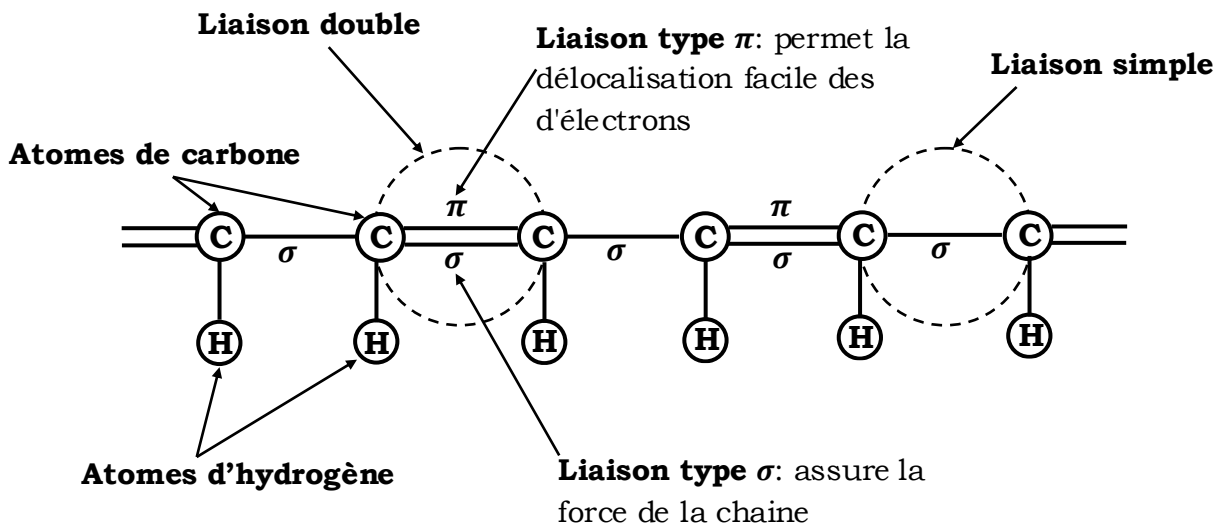


Figure I.1: Chaîne conjuguée contenant des alternances de liaisons simples et doubles [1].

Le chevauchement des orbitales offre un mouvement plus libre aux électrons entre les atomes [4]. La conductivité de ces polymères augmente par dopage avec des atomes donneurs ou accepteurs d'électrons. Ces polymères, peuvent être obtenus à l'état oxydé, donc conducteur, ou à l'état réduit isolant [13] et sont appelés: polymères conducteurs intrinsèques.

Comme illustré par la figure I.2, le dopant introduit un porteur de charge dans ce système en supprimant ou en ajoutant des électrons à partir

de ou à la chaîne de polymère et leurs relocalisés comme des polarons ou bipolarons [11, 12].

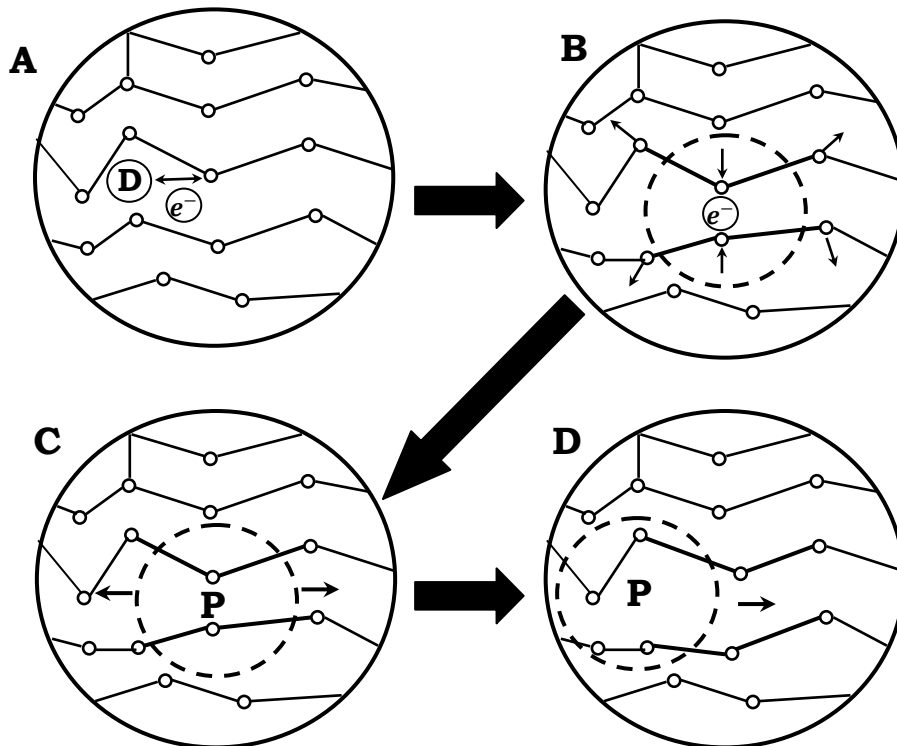


Figure I.2: Schéma explicatif de la conductivité électrique des polymères conducteurs. (A) Le dopant élimine ou ajoute un électron à partir de/à la chaîne du polymère, créant ainsi une charge délocalisée. (B) Localiser cette charge et la cerner d'une distorsion locale du réseau cristallin. (C) La charge entourée par une distorsion est connue sous le nom de polaron [14]. (D) Le polaron est capable de se déplacer le long de la chaîne polymère, permettant ainsi de conduire l'électricité [1].

2.2. Le dopage

Le dopage peut être réalisé par voie chimique, électrochimique ou par photodopage [15]. Il existe une relation de proportionnalité entre la quantité de dopant utilisée et la conductivité du polymère dopé [16]. La conductivité peut être augmentée en choisissant un dopant différent, mais cela aura un impact sur la surface et les propriétés structurales du polymère (par exemple la couleur, la porosité et le volume) [15]. Les dopants peuvent être classés en deux catégories en fonction de leurs tailles moléculaires: petits dopants (par exemple Cl^-) et grands dopants (par exemple le polystyrène sulfonate de sodium, PSS), les deux se comportent et affectent le polymère lui-même de façon différente [15, 17]. En plus de l'impact sur la conductivité

et les propriétés structurales du polymère, le dopant de grande taille moléculaire peut influencer sur les propriétés des matériaux: par exemple, augmenter la densité. Ce type de dopant est le plus utilisé, car il accorde au polymère une plus grande stabilité électrochimique [17]. Le dopage peut se concrétiser de deux façons [5, 12, 18]:

- i- p-dopage, où le polymère est oxydé et aura une charge positive.
- ii- n-dopage, où le polymère est réduit et possède une charge négative.

Dans le cas des polymères conjugués, l'injection d'une charge, positive ou négative, crée un « défaut » chargé et associé à une déformation locale de la chaîne (appelé ion radical pour les chimistes et polaron ou soliton pour les physiciens) apte à se mouvoir le long de la chaîne conjuguée (conduction intra-chaîne) ou de chaîne à chaîne (conduction inter-chaîne), sous l'effet d'un champ électrique. Les liaisons simples étant plus longues que les liaisons doubles, une déformation est créée par la permutation des ces liaisons. L'injection d'une nouvelle charge conduit à la présence de deux charges sur la chaîne qui s'associent et forment une nouvelle espèce appelée bipolaron [19, 20]. La présence de ces espèces (polaron, bipolaron et soliton), formées lors du processus de dopage, est confirmée par des différentes méthodes d'analyse à l'instar de la résonance paramagnétique électronique (RPE), de la spectroscopie d'absorption UV/visible/proche infrarouge et des spectroscopies infrarouge et Raman [21].

Deux cas peuvent se présenter, illustrés dans la figure I.3:

- Quand un électron est ajouté (ou retiré) à la partie inférieure de la bande de conduction (à partir de la partie supérieure de la bande de valence) d'un polymère conjugué (figure I.3 (a)), la bande de conduction devient partiellement remplie et un polaron (anion radical) est créé (figure I.3 (b)). Un polaron porte à la fois un spin ($1/2$) et une charge (électron). L'addition (ou le retrait) d'un second électron sur une chaîne ayant déjà un polaron négatif (positif) conduit à la formation d'un bipolaron (sans spin) par la dimérisation de deux polarons, ce qui peut réduire l'énergie totale (figure I.3 (c)). Ce cas qui correspond à l'ensemble des polymères conducteurs, excepté le trans-

polyacétylène, et conduisant à une structure d'énergie différente est appelé système non-dégénéré.

- La structure obtenue après permutation des liaisons a la même énergie: nous parlons de système dégénéré. Pour les polymères conjugués avec un état fondamental dégénéré (polyacétylène sous la forme trans.), les bipolarons peuvent abaisser encore plus leurs énergies (jusqu'à la moitié de l'énergie de la bande interdite) en se dissociant en deux solitons sans spin (figure I.3 (d)).[14, 22].

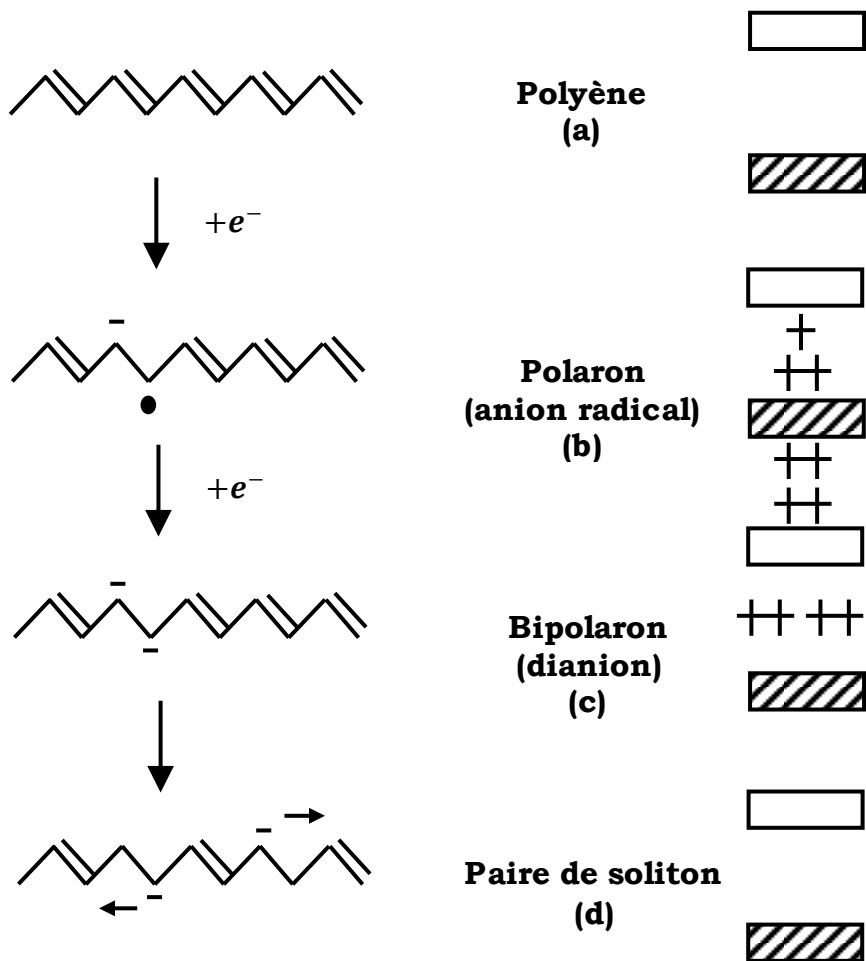


Figure I.3: Schéma descriptif de la formation par dopage du polaron, bipolaron, et une paire soliton sur une chaîne polymérique [14].

La figure I.4 rapporte les valeurs de conductivité électrique des principaux PCI. Toutes ces valeurs sont issues de la littérature. A des fins de comparaison, nous avons indiqué également la conductivité des matériaux

classiques, allant de l'isolant au conducteur, en passant par le semi-conducteur.

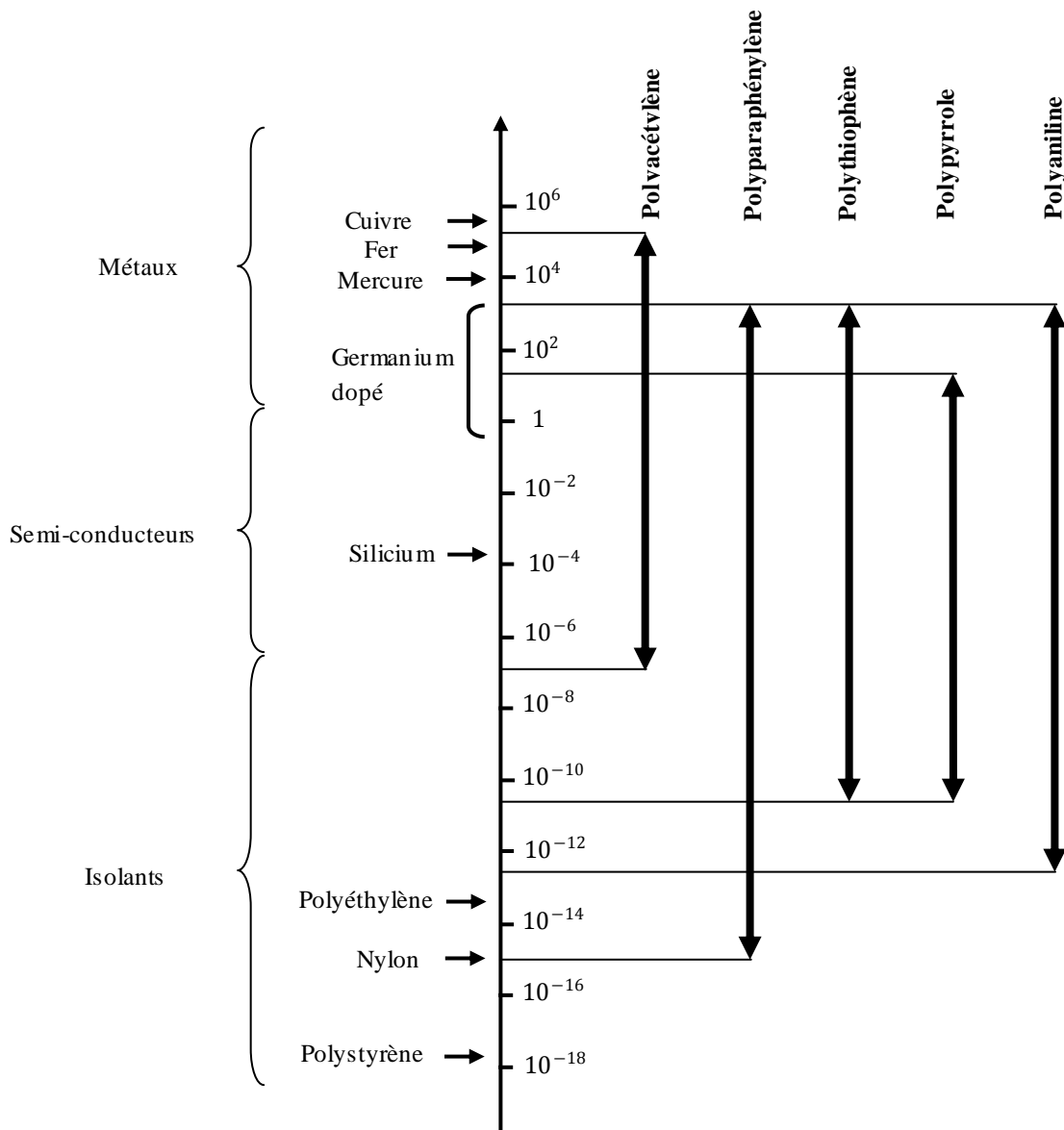


Figure I.4: Conductivité électrique de matériaux classiques et de divers PCI (différents taux de dopage) à 300 K [23].

2.3. Synthèses et préparation

Actuellement, il existe deux principales méthodes de synthèse de polymères conducteurs intrinsèques: chimique et électrochimique [5, 12].

2.3.1.Synthèse chimique

Lors de la synthèse chimique, la solution de monomère est mélangée avec un agent oxydant (par exemple le chlorure ferrique, le persulfate d'ammonium) [24, 25]. Ce processus aboutit à une poudre ou un film épais du polymère et permet sa production en vrac. Cette méthode est le premier choix pour les applications commerciales [25, 26]. L'avantage de cette technique est son utilisation en synthèse de tous les types de polymères conducteurs, y compris certains nouveaux polymères conducteurs qui ne peuvent pas être synthétisés par le procédé électrochimique [15]. Malheureusement, la conductivité des polymères lorsqu'ils sont synthétisés par la voie chimique, a toujours été plus faible en comparaison à celle de leurs homologues obtenus par la voie électrochimique [26]. En outre, il est difficile d'assurer la fiabilité de la synthèse chimique, du moment que la conductivité du polymère synthétisé est connue pour être très sensible au choix et à la pureté du solvant, à l'agent oxydant, à la concentration relative des réactifs, au temps de réaction, à la température, etc... [26 - 29].

2.3.2.Synthèse électrochimique

La synthèse électrochimique présentée en figure I.5, s'effectue par application d'un courant électrique à travers les électrodes placées dans une solution contenant le monomère, le solvant et l'agent de dopage [30]. Cette méthode permet la déposition des films épais de polymère avec un bon contrôle de la morphologie et de l'épaisseur (jusqu'à 20 nm) [31]. Le courant électrique provoque la déposition et l'oxydation du monomère sur l'électrode à charge positive, formant ainsi, des chaînes polymériques insolubles [15].

La synthèse électrochimique peut être effectuée en utilisant trois techniques: la galvanostatique, la potentiostatique et la potentiodynamique. Dans la polymérisation galvanostatique, le courant électrique qui est contrôlé à la place du potentiel électrique et la vitesse à laquelle le polymère est déposé est stable et peut être contrôlée avec précision [5, 13]. Dans la polymérisation potentiostatique, nous contrôlons le potentiel des électrodes et nous faisons varier le courant électrique [13]. Lors de la polymérisation potentiodynamique, le potentiel est balayé entre deux limites: basse et haute

[32, 33]. Ceci provoque la formation d'une couche de polymère, qui devient électriquement active après que la deuxième couche sera synthétisée [34].

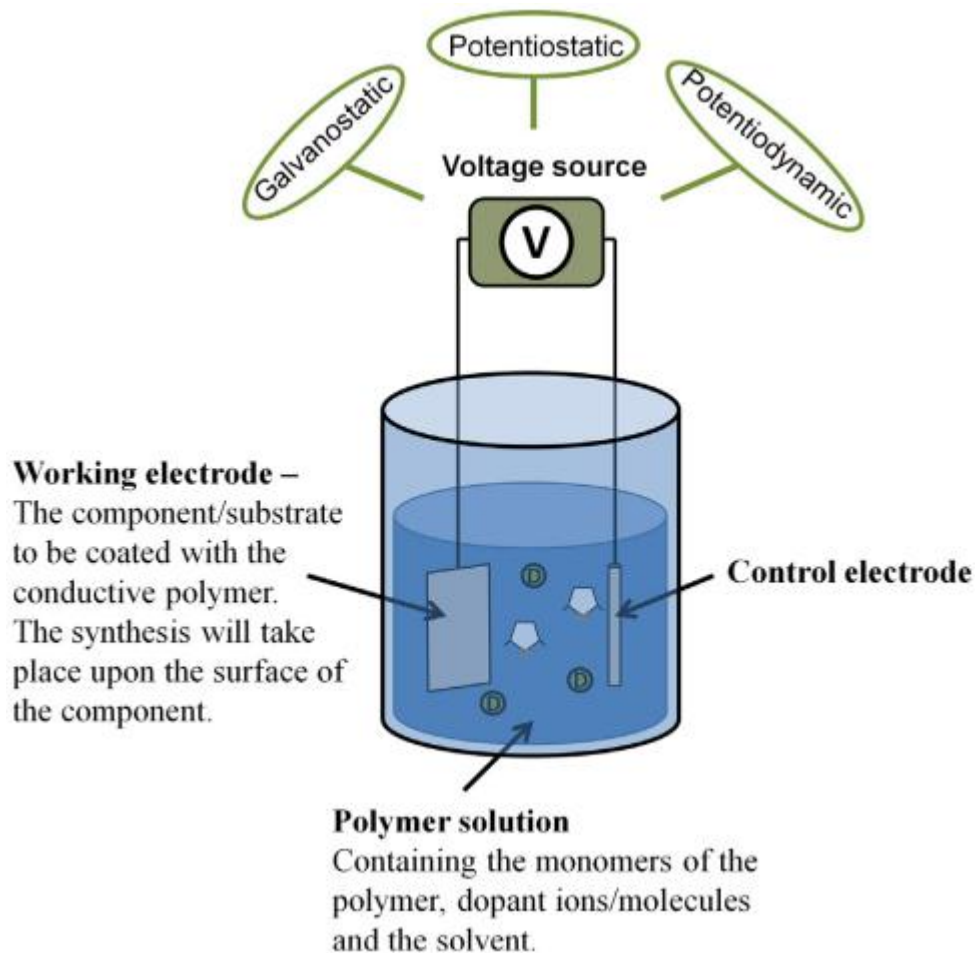


Figure I.5: Mise en place de la synthèse électrochimique, prise de réf. [1].

La synthèse électrochimique permet un dépôt rapide de polymères conducteurs, mais la quantité de molécules bioactives qui peuvent être dopées dans le polymère est limitée [35]. En plus, le polymère étant déposé sur l'électrode, la forme et la quantité pouvant être synthétisées sont limitées par la géométrie et la superficie de l'électrode [17].

3. POLYMERES CONDUCTEURS EXTRINSEQUES OU POLYMERES CONDUCTEURS COMPOSITES (CPC)

Lorsque la chaîne de polymère est non conjuguée, c'est-à-dire elle ne dispose pas d'électrons π délocalisés, la conductivité électrique est obtenue en incorporant des inclusions conductrices dans une matrice polymère

isolante. On obtient, alors, un polymère conducteur extrinsèque ou polymère conducteur composite (CPC).

Les polymères conducteurs composites (CPC), s'obtiennent par la dispersion des additifs ou des inclusions conductrices dans une matrice à base d'un seul polymère ou de plusieurs phases [36, 37]. Des exemples types des inclusions conductrices utilisées pour réaliser ce type de polymère conducteur comprennent des conducteurs solides (fibres de carbone, noir de carbone, particules métalliques, etc.) et les polymères conducteurs conjugués [14]. Divers matériaux polymères, y compris les polymères amorphes (le polystyrène, le PVC, le PMMA, le polycarbonate, acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polyéthersulfone, les polyétherimides, etc.) et les polymères cristallins (le polyéthylène, polypropylène, sulfure de polyphénylène, les nylons, etc.), deviennent conducteurs grâce à l'addition des ces composants conducteurs [38]. En raison de leur synthèse facile, leur faible coût et des propriétés électriques ajustables, comparaison faite avec les polymères conducteurs intrinsèques, les (CPC) sont les plus utilisés [39]. A cause du caractère isolant de la plupart des polymères hôtes, les propriétés électriques du (CPC) dépend uniquement du réseau continu conducteur formé après intégration des charges conductrices [40].

Lorsque la teneur des inclusions atteint un seuil critique, le matériau présentera une transition isolant/conducteur; la conductivité électrique augmente graduellement lorsque les premiers chemins conducteurs sont formés. Cette fraction volumique critique ϕ_c est définie comme le seuil de percolation [36]. Comme le montre la figure I.6, pour $\phi < \phi_c$, le nombre des particules conductrices n'est pas suffisant pour former un chemin conducteur continu, la conductivité du composite est donc presque identique à celle du polymère isolant. Pour $\phi = \phi_c$, les particules conductrices isolées communiquent entre elles pour former un réseau continu permettant la mobilité des électrons. Pour $\phi > \phi_c$, une légère augmentation de la concentration en particules conductrices induit une augmentation des ponts du réseau conducteur. Le composite est ainsi transformé en un matériau conducteur dans un mode «jump-wise». Une

augmentation supplémentaire de la concentration des particules conductrices, ne peut provoquer qu'une augmentation de volume des conducteurs sans augmentation significative des voies pour les électrons.

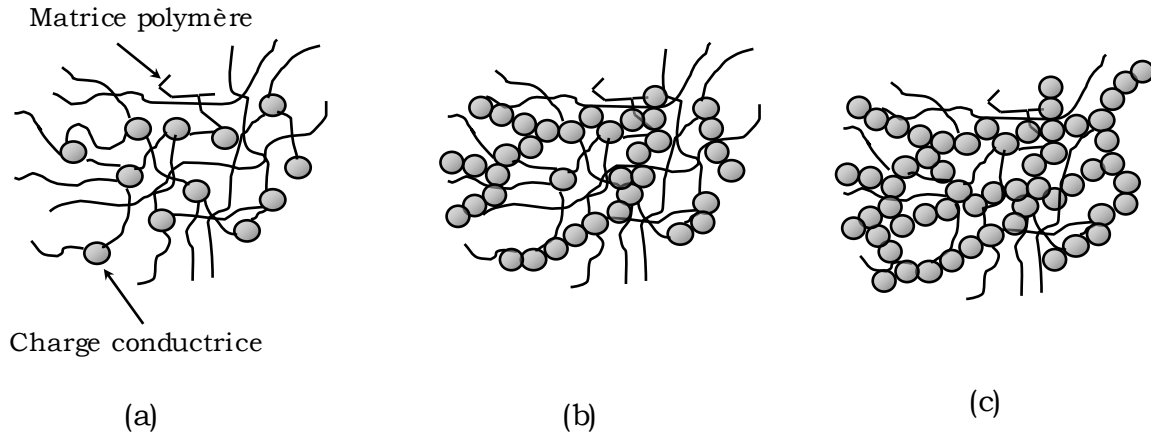


Figure I.6: Description de la dispersion des particules dans la matrice polymère: (a) $\phi < \phi_c$, (b) $\phi \approx \phi_c$ et (c) $\phi > \phi_c$ [14].

La conductivité électrique d'un matériau composite CPC, peut être décrite par la loi empirique suivante [40, 41]:

$$\sigma = \sigma_0(\phi - \phi_c)^t$$

où σ_0 et t , sont respectivement la conduction des inclusions conductrices et l'exposant critique liée à la dimension des réseaux conducteurs dans le polymère conducteur composite (CPC). Dans ce modèle, pour un réseau tridimensionnel, $t = 2$, alors que pour un bidimensionnel, $t = 1,3$.

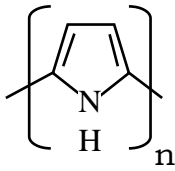
4. POLYMERES CONDUCTEURS LES PLUS ETUDIÉS

Nous présentons les différents polymères conducteurs les plus étudiés.

4.1. Le polypyrrole

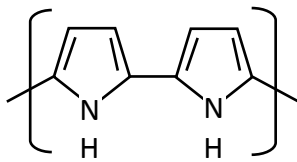
Le polypyrrole (PPy) est le polymère conducteur conjugué le plus synthétisé [42, 43]. Ce polymère présente une bonne stabilité chimique, par exemple, à l'air et à l'eau [44,46] et peut être facilement synthétisé en grande quantité à des températures ambiantes dans une large gamme de solvant, y

compris l'eau [47, 45, 48]. En revanche, ses propriétés mécanique sont médiocres [49].

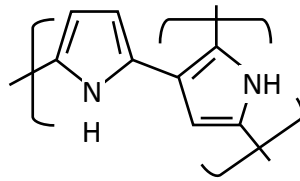


Structure primaire: Unité de répétition

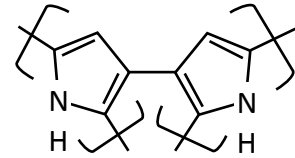
Structure secondaire: Un réseau plan des monomères liés en majorité par des liaisons α, α' et à un moins degré par les liaisons α, β' et β, β' .



α, α'



α, β'



β, β'

Structure tertiaire: Principalement amorphe avec des zones cristallines distribuées de façon aléatoire. Dans ces régions cristallines, les chaînes de polypyrrole s'orientent de façon coplanaire à la surface.

Figure I.7: Structure du polypyrrole [50].

4.2. La polyaniline

Le second polymère conducteur le plus étudié après le PPy est la polyaniline (PANI), connu aussi sous le nom: le noir d'aniline [5, 51]. Son état est lié directement au niveau d'oxydation et c'est l'état émeraaldine qui offre une meilleure stabilité et une bonne conductivité [5]. La PANI peut être facilement synthétisée, à faible cout et présente une bonne stabilité environnementale [52].

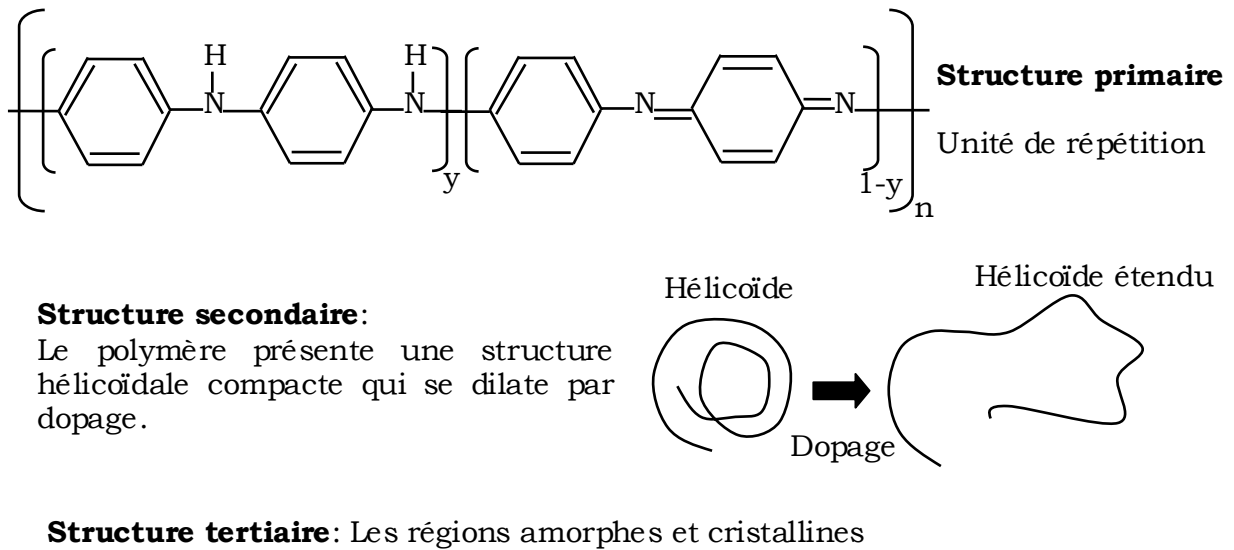


Figure I.8: Structure de la polyaniline [8, 53].

4.3. Polythiophène et ses dérivées

Parmi les dérivées du polythiophène (PTH), nous trouvons le poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) et le poly(3-hexylthiophene) (PHT) qui possèdent une meilleure conductivité et stabilité thermique que le polypyrrole [5, 54].

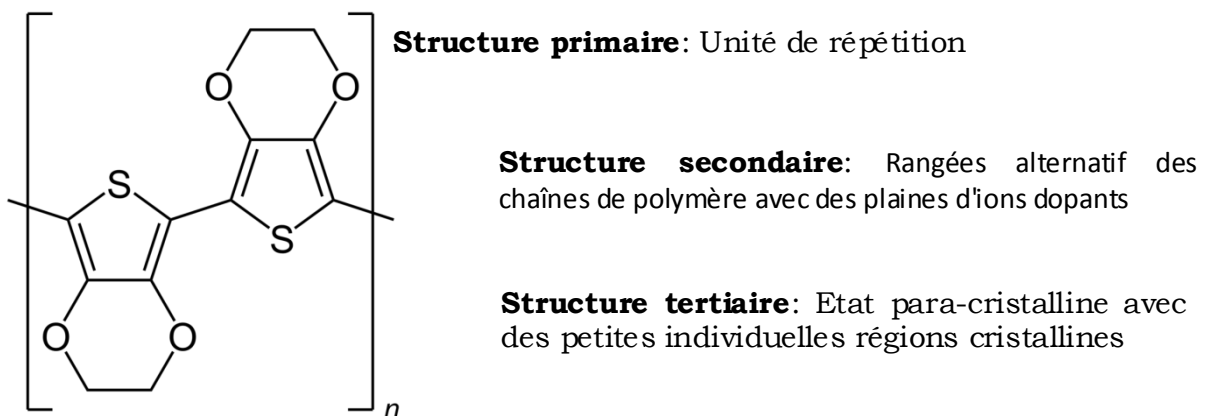


Figure I.9: Structure du (PEDOT) [55].

5. EXEMPLE DE SYNTHÈSE DE QUELQUES POLYMERES CONDUCTEURS

En se référant à la littérature spécialisée, nous citerons dans ce paragraphe trois exemples de synthèse de polymères conducteurs.

5.1. (Polyaniline + Acide Camphre Sulfonique)–polyuréthane

La polyaniline émeraldine (PANI-EB) peut être dopée par le couple solvant/dopant: l'acide dichloroacétique (DCAA)/l'acide camphre sulfonique (CSA) [56, 57]. En suite, et afin d'améliorer les propriétés mécanique du PANI, les chercheurs ont dispersé dans le mélange le polyuréthane (PU) déjà dissout dans l'acide dichloroacétique. Comme illustré dans la figure I.10, le composite PANI-(CSA) 0.5/PU présente un faible seuil de percolation et une conductivité électrique de l'ordre de 10^4 S/m [58].

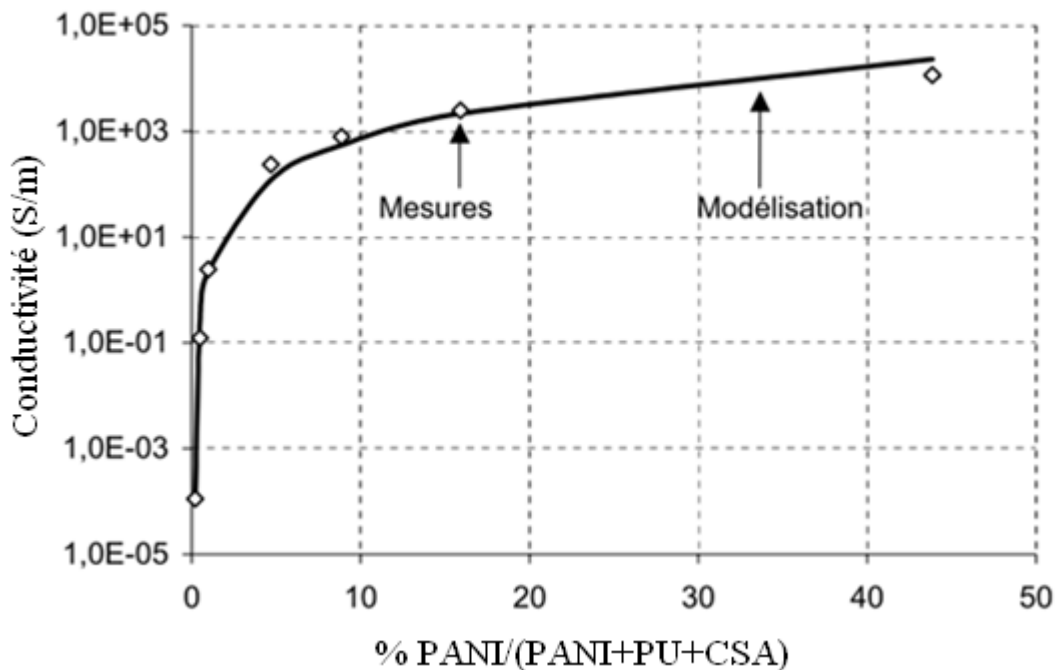


Figure I.10: Variation de la conductivité de films de PANI-(CSA)0.5/PU en fonction de la concentration massique de PANI, prise de réf. [58].

5.2. Polypyrrole-Chitosane

Le chitosane (CHI) est un biopolymère biodégradable, non toxique et peu coûteux qui peut être utilisé non seulement pour améliorer les

propriétés mécaniques de PPy mais aussi ses propriétés électriques et optiques [59]. Les polymères ont été préparés par voie électrochimique dans une solution contenant du pyrrole dopé en utilisant le p-toluene sulfonate (p-TS) et diverses concentrations de CHI dans l'acide acétique à la température ambiante. La conductivité électrique du composite est représentée, en fonction de la concentration du CHI, sur la figure I.11 [61]. Elle peut atteindre la valeur de $6,91 \cdot 10^3$ S/m.

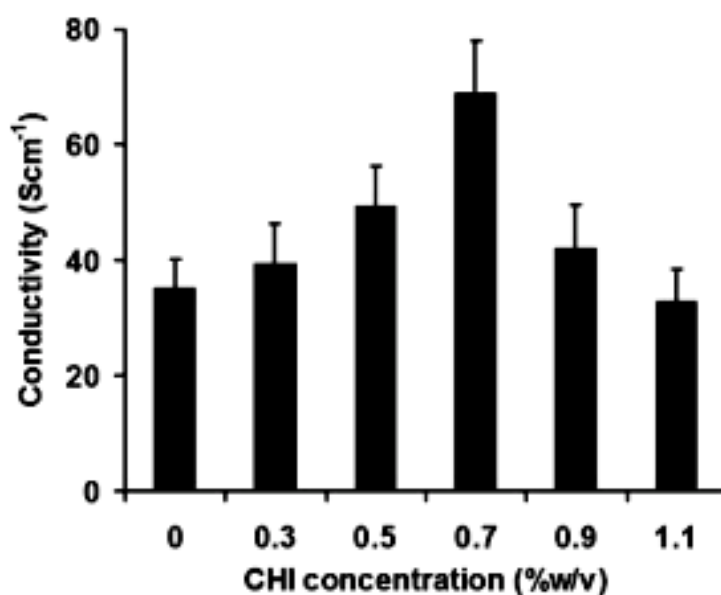


Figure I.11: Variation de la conductivité électrique de films de PPy-CHI en fonction de la concentration de CHI (0 % représente le PPy pure), prise de réf. [61].

5.3. Nanocomposite conducteur polymère/nanofils métalliques et nanotubes de carbone/polymères

Grace à leur importante conductivité électrique, les nanofils métalliques sont utilisés en synthèse des polymères conducteurs nanocomposites en utilisant des quantités extrêmement faibles de charges conductrices. Des nanofils de cuivre ont été mélangés avec des solutions de polystyrène pour synthétiser des polymères conducteurs nanocomposites. Le processus de synthèse est représenté sur la figure I.12. Le polymère conducteur nanocomposite synthétisé exhibe une conductivité électrique de l'ordre de 10^4 S/m [61].

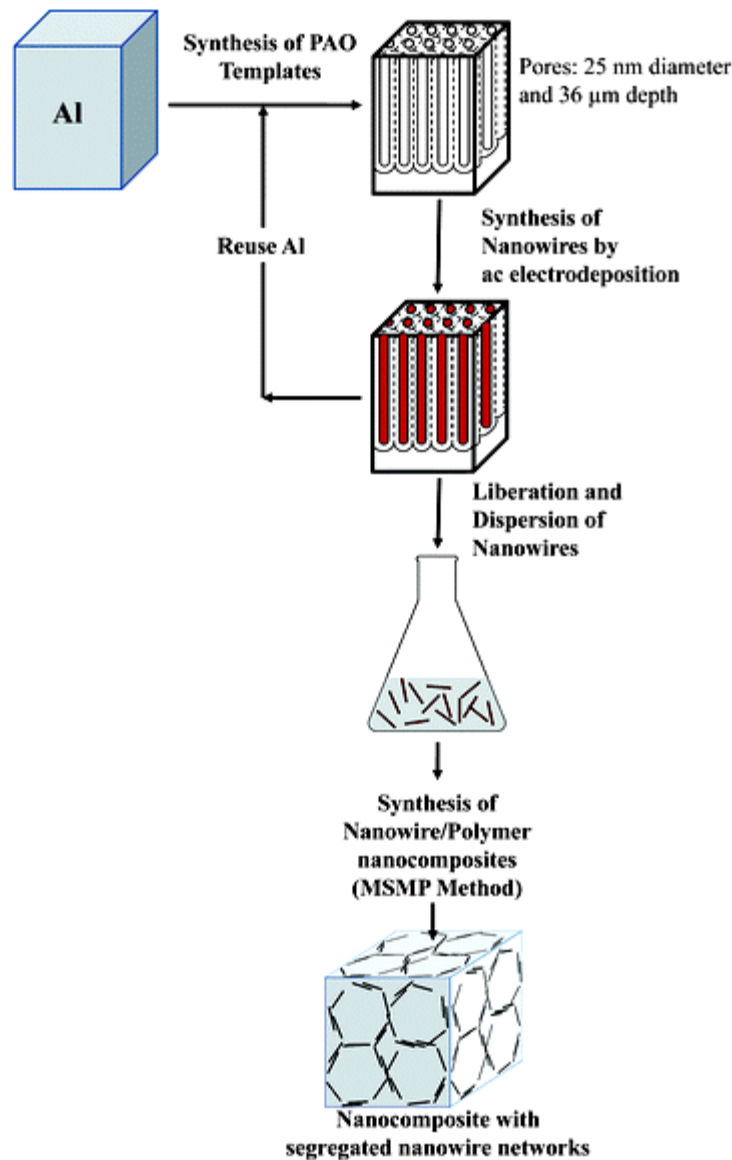


Figure I.12: Illustration de la synthèse de nanocomposite conducteur polymère/nanofils métalliques, prise de réf. [61].

Par ailleurs, l'incorporation des nanotubes de carbone avec un polymère aboutit à un matériau conducteur (CNTs). Des chercheurs ont montré l'effet de la disposition des nanotubes dans la matrice polymère sur la conductivité électrique du composite. En comparaison avec la dispersion aléatoire, comme l'explique la figure I.13, l'alignement vertical des nanotubes améliore la conductivité électrique. Cette dernière sera de l'ordre de $2,2 \cdot 10^4$ S/m à un seuil de percolation $\phi_c = 20\%$ de la fraction volumique de CNTs [62, 63].

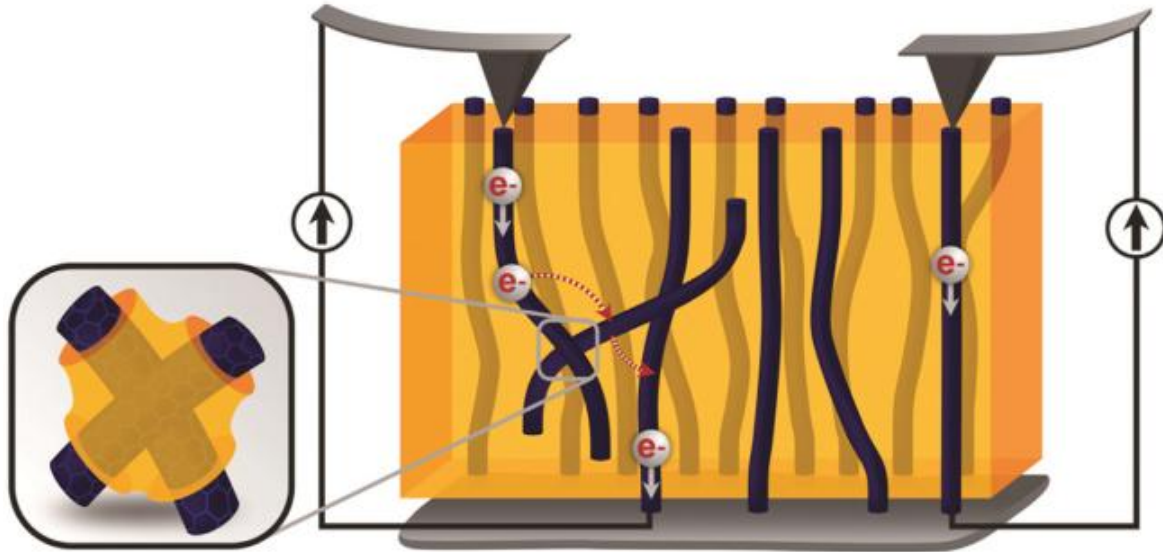


Figure I.13: Illustration du mouvement des électrons dans un composite nanotubes de carbone/polymère, prise de réf. [62].

6. APPLICATION DES POLYMERES CONDUCTEURS AU BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

Les polymères conducteurs peuvent servir dans plusieurs applications à savoir, les matériaux antistatiques, les interférences électromagnétiques et les capteurs. La figure I.14 illustre les différentes applications des polymères conducteurs suivant la valeur de leurs résistivités électriques.

Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Applications & Products	
10^{14}	Insulating	Insulators
10^{12}		
10^{10}	Electrostatic Dissipative	Anti-static Materials: fuel tanks, Mining pipes, anti-static storage containers, electrostatic paintable compounds, electronics connectors, microscope housing materials etc.
10^8		
10^6	Conductive	Sensors & EMI Shielding: self-regulated heating elements, strain sensing materials, Electronic-nose devices, over-current protector, organic liquid sensing devices etc.
10^4		
10^2		
10	Highly Conductive	Conductors: metal replacements, conducting adhesives and coatings, bipolar plates, resistors, thermoelectric materials, busbars, etc.
10^{-2}		
10^{-4}		

Figure I.14: Classification des CPC en fonction de leurs résistivités électriques et leurs domaines d'application, prise de réf. [36].

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 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ [36, 39].

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs travaux de recherche de conception de matériaux de blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs ont été réalisés pour bénéficier des avantages qu'offrent ces matériaux par rapport aux métaux, à l'instar de leur légèreté, leur faible coût, leur facilité de mise en forme, etc...[64]. Par exemple, dans leurs travaux, des chercheurs ont dispersé des charges métalliques, fibres ou nanoparticules au sein d'une matrice polymère afin d'augmenter l'interaction avec l'onde électromagnétique [67-70]. D'autres travaux, visent à améliorer les propriétés mécaniques du blindage électromagnétique à base de polymères conducteurs intrinsèques. Ce procédé consiste à fusionner un polymère conventionnel qui assure des propriétés mécaniques adéquates au polymère conducteur intrinsèque qui interagit avec le rayonnement électromagnétique. Le polypyrrole (PPy) et la polyaniline (PANI) sont les polymères conducteurs intrinsèques les plus couramment utilisés [71, 72].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Balint R, Cassidy NJ, Cartmell SH. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia*. **2014**; 10: 2341 – 2353.
- [2] Lakard B, Ploux L, Anselme K, Lallemand F, Lakard S, Nardin M, et al. Effect of ultrasounds on the electrochemical synthesis of polypyrrole, application to the adhesion and growth of biological cells. *Bioelectrochemistry*. **2009**; 75: 148 – 57.
- [3] Kim DH, Richardson-Burns SM, Hendricks JL, Sequera C, Martin DC. Effect of immobilized nerve growth factor on conductive polymers: electrical properties and cellular response. *Adv. Funct. Mater.* **2007**; 17: 79 – 86.
- [4] Shirakawa H, Louis EJ, MacDiarmid AG, Chiang CK, Heeger AJ. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1977**; 16: 578 – 80.
- [5] Zhou DD, Cui XT, Hines A, Greenberg RJ. Conducting polymers in neural stimulation applications. In: Zhou DD, Greenbaum E, editors. *Implantable neural prostheses*, vol. 2. Springer, Berlin; **2010**. p. 217 – 52.
- [6] Kumar D, Sharma RC. Advances in conductive polymers. *Eur. Polym. J.* **1998**; 34: 1053 – 60.
- [7] Wan M. Introduction of conducting polymers. In: Wan M, editor. *Conducting polymers with micro or nanometer structure*. Springer, Berlin; **2008**. p. 1 – 15.
- [8] Epstein AJ. Electrical conductivity in conjugated polymers. In: Rupprecht L, editor. *Conductive polymers and plastics in industrial applications*. Norwich, NY: William Andrew Publishing/Plastics Design Library; **1999**. p. 1 – 9.
- [9] Kirchmeyer S, Reuter K. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *J. Mater. Chem.* **2005**; 15: 2077 – 88.
- [10] Skotheim TA, Elsenbaumer RL, Reynolds JR. *Handbook of conducting polymers*. Second Edition . Marcel Dekker, NY; **1997**.
- [11] Bredas JL, Streer GB. Polarons, bipolarons and solitons in conductive polymers. *Acc. Chem. Res.* **1985**; 18: 309 – 315.
- [12] Ravichandran R, Sundarrajan S, Venugopal JR, Mukherjee S, Ramakrishna S. Applications of conducting polymers and their issues in biomedical engineering. *J. R. Soc. Interface.* **2010**; 7: S559 – 79.
- [13] Wallace G, Spinks G. Conducting polymers – bridging the bionic interface. *Soft Matter.* **2007**; 3: 665 – 71.

- [14] Dai L. Intelligent macromolecules for smart devices: from materials synthesis to device applications. Springer-Verlag, London; **2004**. p. 41–80.
- [15] Guimard NK, Gomez N, Schmidt CE. Conducting polymers in biomedical engineering. *Prog. Polym. Sci.* **2007**; 32: 876 – 921.
- [16] Kaynak A, Rintoul L, George GA. Change of mechanical and electrical properties of polypyrrole films with dopant concentration and oxidative aging. *Mater. Res. Bull.* **2000**; 35: 813 –24.
- [17] Shi G, Rouabhia M, Wang Z, Dao LH, Zhang Z. A novel electrically conductive and biodegradable composite made of polypyrrole nanoparticles and polylactide. *Biomaterials.* **2004**; 25: 2477 – 88.
- [18] Ghasemi-Mobarakeh L, Prabhakaran MP, Morshed M, Nasr-Esfahani MH, Ramakrishna S. Electrical stimulation of nerve cells using conductive nanofibrous scaffolds for nerve tissue engineering. *Tissue Eng. Part. A.* **2009**; 15: 3605 – 19.
- [19] Su WP, Schrieffer JR, Heeger AJ. Solitons in Polyacetylene. *Phys. Rev. Lett.* **1979**; 42: 1698 – 1701.
- [20] Brédas JL, Chance R, Silbey R. Theoretical Studies of Charged Defect States in Doped Polyacetylene and Polyparaphenylene. *Mol. Cryst.-Liq. Cryst.* **1981**; 77: 319 – 332.
- [21] ATTIAS AJ. Polymères conjugués et polymères conducteurs électroniques. e1862; *Techniques de l'ingénieur.* **2002**.
- [22] Boudreaux DS, Chance RR, Brédas JL, Silbey R. Solitons and polarons in polyacetylene: Self-consistent-field calculations of the effect of neutral and charged defects on molecular geometry. *Phys. Rev. B.* **1983**; 28: 6927 – 36.
- [23] Payerne R. Structure et propriétés électroniques à différentes échelles de systèmes modèles de polymères conducteurs et semi-conducteurs. Thèse doctorat de l'université Joseph Fourier. Grenoble. **2004**; p. 18.
- [24] Tan Y, Ghandi K. Kinetics and mechanism of pyrrole chemical polymerization. *Synth. Met.* **2013**; 175: 183 – 91.
- [25] Armes SP. Optimum reaction conditions for the polymerization of pyrrole by iron (III) chloride in aqueous solution. *Synth. Met.* **1987**; 20: 365 – 71.
- [26] Calvo PA, Rodriguez J, Grande H, Mecerreyes D, Pomposo JA. Chemical oxidative polymerization of pyrrole in the presence of m-hydroxybenzoic acid- and m-hydroxycinnamic acid-related compounds. *Synth. Met.* **2002**; 126: 111 – 6.
- [27] Cao Y, Andreatta A, Heeger AJ, Smith P. Influence of chemical polymerization conditions on the properties of polyaniline. *Polymer.* **1989**; 30: 2305 – 11.

- [28] Kudoh Y, Akami K, Matsuya Y. Chemical polymerization of 3,4-ethylenedioxythiophene using an aqueous medium containing an anionic surfactant. *Synth. Met.* **1998**; 98: 65 – 70.
- [29] Pron A, Genoud F, Menardo C, Nechtschein M. The effect of the oxidation conditions on the chemical polymerization of polyaniline. *Synth. Met.* **1988**; 24: 193 – 201.
- [30] Martins NCT, Moura e Silva T, Montemora MF, Fernandes JCS, Ferreira MGS. Electrodeposition and characterization of polypyrrole films on aluminium alloy 6061-T6. *Electrochim. Acta.* **2008**; 53: 4754 – 63.
- [31] Herrasti P, Díaz L, Ocón P, Ibáñez A, Fatas E. Electrochemical and mechanical properties of polypyrrole coatings on steel. *Electrochim. Acta.* **2004**; 49: 3693 – 9.
- [32] Patra S, Barai K, Munichandraiah N. Scanning electron microscopy studies of PEDOT prepared by various electrochemical routes. *Synth. Met.* **2008**; 158: 430 – 5.
- [33] Mondal SK, Prasad KR, Munichandraiah N. Analysis of electrochemical impedance of polyaniline films prepared by galvanostatic, potentiostatic and potentiodynamic methods. *Synth. Met.* **2005**; 148: 275 – 86.
- [34] Girija TC, Sangaranarayanan MV. Investigation of polyaniline-coated stainless steel electrodes for electrochemical supercapacitors. *Synth. Met.* **2006**; 156: 244 – 50.
- [35] Castano H, O'Rear EA, McFetridge PS, Sikavitsas VI. Polypyrrole thin films formed by admicellar polymerization support the osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells. *Macromol. Biosci.* **2004**; 4: 785–94.
- [36] Pang H, Xu L, Yan DX, Li ZM. Conductive polymer composites with segregated structures. *Prog. Polym. Sci.* **2014**; 39: 1908 – 33.
- [37] Deng H, Lin L, Ji MZ, Zhang SM, Yang MB, Fu Q. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials. *Prog. Polym. Sci.* **2014**; 39: 627 – 55.
- [38] Balberg I, Binenbaum N. Computer study of the percolation threshold in a two dimensional anisotropic system of conducting sticks. *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* **1983**; 28: 3799 – 812.
- [39] 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.
- [40] Xu S, Rezvanian O, Peters K, Zikry MA. The viability and limitations of percolation theory in modeling the electrical behavior of carbon nanotube–polymer composites. *Nanotechnology.* **2013**; 24: 155706/1–155706.
- [41] Stauffer D, Aharony A. *Introduction to Percolation Theory.* Taylor and Francis, London.; **1994**. p. 192.

- [42] Lee JY, Lee JW, Schmidt CE. Neuroactive conducting scaffolds: nerve growth factor conjugation on active ester-functionalized polypyrrole. *J. R. Soc. Interface.* **2009**; 6: 801 – 10.
- [43] Ateh DD, Vadgama P, Navsaria HA. Culture of human keratinocytes on polypyrrole based conducting polymers. *Tissue Eng.* **2006**; 12: 645 – 55.
- [44] Bousalem S, Mangeney C, Chehimi MM, Basinska T, Miksa B, Slomkowski S. Synthesis, characterization and potential biomedical applications of N-succinimidyl ester functionalized, polypyrrole-coated polystyrene latex particles. *Colloid. Polym. Sci.* **2004**; 282: 1301 – 7.
- [45] Li Y, Neoh KG, Kang ET. Plasma protein adsorption and thrombus formation on surface functionalized polypyrrole with and without electrical stimulation. *J. Colloid. Interf. Sci.* **2004**; 275: 488 – 95.
- [46] Cetiner S, Kalaoglu F, Karakas H, Sarac AS. Electrospun nanofibers of polypyrrole poly(acrylonitrile-co-vinyl acetate). *Text. Res. J.* **2010**; 80: 1784 – 92.
- [47] Cui X, Hetke JE, Wiler JA, Anderson DJ, Martin DC. Electrochemical deposition and characterization of conducting polymer polypyrrole/PSS on multichannel neural probes. *Sens. Actuator A-Phys.* **2001**; 93: 8 – 18.
- [48] Chronakis IS, Grapenson S, Jakob A. Conductive polypyrrole nanofibers via electrospinning: electrical and morphological properties. *Polymer.* **2006**; 47: 1597 – 603.
- [49] Brahim S, Guiseppi-Elie A. Electroconductive hydrogels: electrical and electrochemical properties of polypyrrole-poly(HEMA) composites. *Electroanalysis.* **2005**; 17: 556 – 70.
- [50] Wan M. Introduction of conducting polymers. In: Wan M, editor. *Conducting polymers with micro or nanometer structure.* Springer, Berlin; **2008**. p. 1 – 15.
- [51] Blinova NV, Stejskal J, Trchova M, Prokes J. Control of polyaniline conductivity and contact angles by partial protonation. *Polym. Int.* **2008**; 57: 66 – 9.
- [52] Yu QZ, Shi MM, Deng M, Wang M, Chen HZ. Morphology and conductivity of polyaniline sub-micron fibers prepared by electrospinning. *Mater Sci Eng B- Solid.* **2008**; 150: 70 – 6.
- [53] Pouget JP, Jdzefowicz ME, Epstein AJ, Tang X, MacDiarmid AG. X-ray structure of polyaniline. *Macromolecules.* **1991**; 24: 779 – 89.
- [54] Subramanian A, Krishnan UM, Sethuraman S. Axially aligned electrically conducting biodegradable nanofibers for neural regeneration. *J. Mater. Sci.: Mater. Med.* **2012**; 23: 1797 – 809.
- [55] Aasmundtveit KE, Samuelsen EJ, Pettersson LAA, Inganas O, Johansson T, Feidenhans R. Structure of thin films of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Synth. Met.* **1999**; 101: 561 – 4.

- [56] Cao Y, Qiu J, Smith P. Effect of solvents and co-solvents on the processibility of polyaniline: II. solubility and conductivity studies. *Synth. Met.* **1995**; 69: 187 – 190.
- [57] Anand J, Palaniappan S, Sathyanarayana DN. Conducting Polyaniline Blends and Composites. *Prog. Polym. Sci.* **1998**; 23: 993 – 1018.
- [58] Hoang NH, Wojkiewicz JL, Miane JL, Biscarro RS. Lightweight electromagnetic shields using optimized polyaniline composites in the microwave band. *Polym. Adv. Technol.* **2007**; 18: 257 – 262.
- [59] Abdi M, Ekramul Mahmud HNM, Abdullah L, Kassim A, Ab. Rahman M, Ying JL. Optical Band Gap and Conductivity Measurements of Polypyrrole-Chitosan Composite Thin Films, *Chinese J. of Polym. Sci.* **2012**; 90: 93 – 100.
- [60] 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.
- [61] Gelves GA, Al-Saleh MH, Sundararaj U. Highly electrically conductive and high performance EMI shielding nanowire/polymer nanocomposites by miscible mixing and precipitation. *J. Mater. Chem.*, **2011**; 21: 829 – 836.
- [62] Souier T, Maragliano C, Stefancich M, Chiesa M. How to achieve high electrical conductivity in aligned carbon nanotube polymer composites. *CARBON.* **2013**; 64: 150 – 157.
- [63] R. Mitchell R, Yamamoto N, Cebeci H, L. Wardle B, V. Thompson C. A technique for spatially-resolved contact resistance-free electrical conductivity measurements of aligned-carbon nanotube/polymer nanocomposites. *Compos. Sci. Technol.* **2013**; 74: 205 – 210.
- [64] Thomassin JM, Jérôme C, Pardoën T, Bailly C, Huynen I, Detrembleur C. Polymer/carbon Based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Mat. Sci Eng R.* **2013**; 74: 211 – 232.
- [67] Bagwell RM, McManaman JM, Wetherhold RC. Short shaped copper fibers in an epoxy matrix: Their role in a multifunctional composite. *Compos. Sci. Technol.* **2006**; 66: 522 – 530.
- [68] Wetherhold RC, Bagwell RM, McManaman JM. Short Shaped Copper Fibers in an Epoxy Matrix: Their Multifunctional Use — Fracture and Impact Toughening and EMI Shielding. *Am. Soc. Mech. Eng.* **2004**; 99: 1 – 6.
- [69] Babu VJ, Kumar VSP, Sundaray B, Murthy VRK, Natarjan TS. Preparation and characterization of electrospun nanofibers of Nylon-6 doped with copper (II) chloride. *Mater. Sci. Eng. B.* **2007**; 142: 46 – 50.
- [70] Yang Y, Gupta MC, Dudley KL. Studies on electromagnetic interference shielding characteristics of metal nanoparticle- and carbon nanostructure-filled polymer composites in the Ku-band frequency. *Micro Nano Lett.* **2007**; 2: 85 – 89.

- [71] Kim HK, Kim MS, Chun SY, Park YH, Jeon BS, Lee JY, Hong YK, Joo J, Kim SH. Characteristics of electrically conducting polymer-coated textiles. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **2003**; 405: 161 – 169.
- [72] Bhadra S, Singha NK, Khastgir D. Semiconductive composites from ethylene 1-octene copolymer and polyaniline coated nylon 6: Studies on mechanical, thermal, processability, electrical, and EMI shielding properties. *Polym. Eng. Sci.* **2008**; 48: 995 – 1006.

CHAPITRE II

Notions sur le blindage électromagnétique

INTRODUCTION

Le blindage électromagnétique est un écran ou une barrière conductrice qui protège des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques. Un blindage 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 réagit comme une frontière physique, isolant les composants sensibles aux perturbations des 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 leur fabrication ou leur installation, cette frontière n'est pas totalement imperméable. Un parasite résiduel peut donc pénétrer dans la zone protégée par le blindage. Il excite deux situations du blindage, illustré dans la figure II.1:

- réduire l'émission des ondes électromagnétiques vers l'extérieur.
- réduire l'émission des ondes électromagnétiques vers l'intérieur.

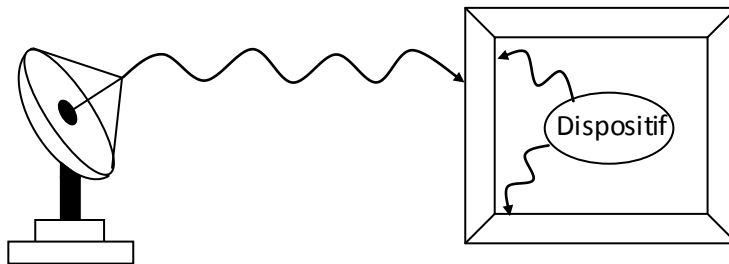


Figure II.1: Blindage électromagnétique extérieur ↔ intérieur.

Nous débutons ce chapitre par un rappel théorique sur l'interaction onde électromagnétique/matière et les différents phénomènes qui résultent de cette interaction. Nous définissons, ensuite, le blindage électromagnétique et les paramètres qui le caractérisent et nous rapportons aussi le calcul de l'efficacité du blindage électromagnétique d'une structure mono et multicouche.

1. INTERACTION ONDE ELECTROMAGNETIQUE/MATIERE

1.1. Définition et propriétés d'une onde électromagnétique plane

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

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

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

La grandeur physique la plus importante d'une onde électromagnétique est sa fréquence qui est définie par l'inverse de la période (temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle), elle s'exprime en Hertz (Hz).

1.2. Propagation d'une onde électromagnétique

La propagation d'une onde électromagnétique de vecteur d'onde \vec{k}_i , se dirigeant d'un milieu (1) vers un milieu (2) est illustrée par la figure II.2. Le vecteur \vec{k}_i fait un angle θ_i avec le plan vertical (angle d'incidence), qui est perpendiculaire à l'interface (surface qui sépare les deux milieux).

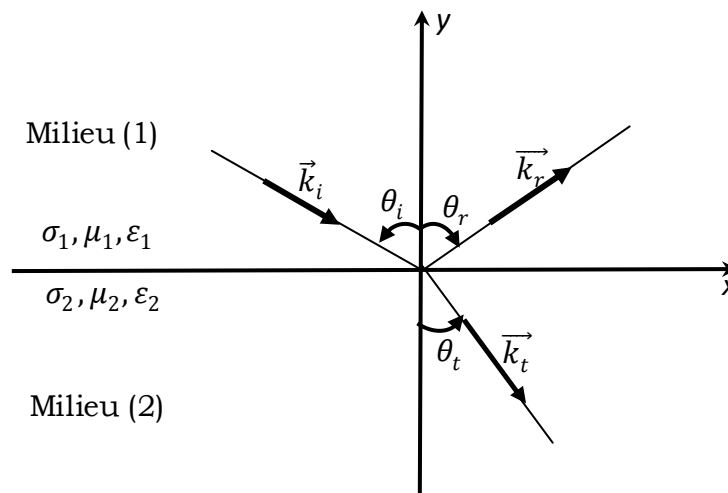


Figure II.2: Propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2).

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

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

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

La loi de Snell-Descartes donne la relation entre les différents vecteurs d'onde;

$$k_i \sin\theta_i = k_r \sin\theta_r = k_t \sin\theta_t \quad (\text{II.3})$$

Le vecteur d'onde dans le milieu de propagation est donné par [1]:

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

A partir des équations de Maxwell, nous pouvons définir aussi l'impédance intrinsèque du milieu, qui est le rapport de la composante du champ électrique à la composante du champ magnétique, donnée par [1]:

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

1.3. Polarisation linéaire d'une onde électromagnétique

Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique; si le champ électrique oscille perpendiculairement au plan de propagation, alors nous parlons d'une polarisation transversale électrique (TE) et si le champ électrique oscille dans le même plan de propagation, nous parlons d'une polarisation transversale magnétique (TM). Les deux types de polarisations sont présentés sur la figure II.3.

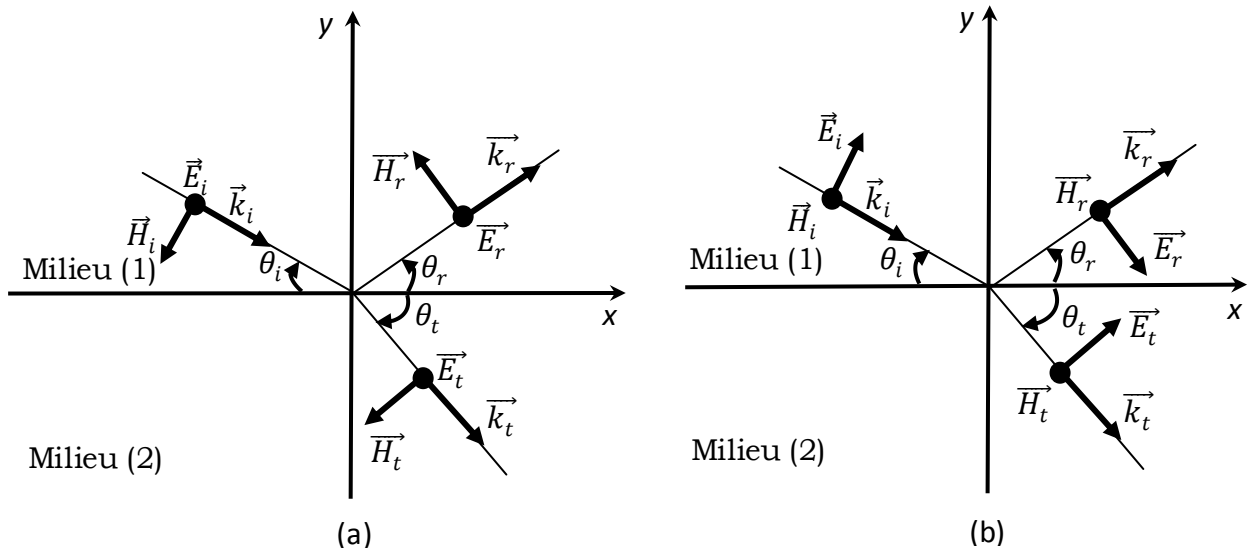


Figure II.3: Polarisation d'une onde électromagnétique: (a) polarisation transversale électrique (TE) et (b) polarisation transversale magnétique (TM).

2. SOURCE ELECTRIQUE ET SOURCE MAGNETIQUE

Nous distinguons deux types de sources: la source électrique et la source magnétique. En effet, une forte tension est à l'origine d'un fort champ électrique (il s'agit d'un dipôle électrique, c'est le cas d'un dipôle rayonnant) et un fort courant est à l'origine d'un champ magnétique élevé (il s'agit d'un dipôle magnétique, c'est le cas d'une boucle rayonnante), ceci étant valable lorsque l'on se trouve proche de la source.

2.1. Source électrique (dipôle rayonnant)

Une source électrique, comme illustré sur la figure II.4, peut être modélisée comme un dipôle rayonnant; c'est un courant électrique traversant un conducteur de longueur L . C'est une source qui émet davantage de champ électrique [2, 3]. Les trois composantes des champs électrique et magnétique au point P du conducteur à la distance r du dipôle s'écrivent en coordonnées sphériques [2, 3]:

$$\begin{cases} E_\psi = \frac{IL \sin\psi}{i4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \left[1 + i\frac{2\pi r}{\lambda} - \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2 \right] e^{-i\frac{2\pi r}{\lambda}} \\ E_r = \frac{IL \cos\psi}{i2\pi\omega\epsilon_0 r^3} \left[1 + i\frac{2\pi r}{\lambda} \right] e^{-i\frac{2\pi r}{\lambda}} \\ H_\varphi = \frac{IL \sin\psi}{i4\pi r^2} \left[1 + i\frac{2\pi r}{\lambda} \right] e^{-i\frac{2\pi r}{\lambda}} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

où

I est le courant électrique.

ϵ_0 représente la permittivité diélectrique du vide, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

et ω et λ représentent respectivement, la pulsation et la longueur d'onde électromagnétique.

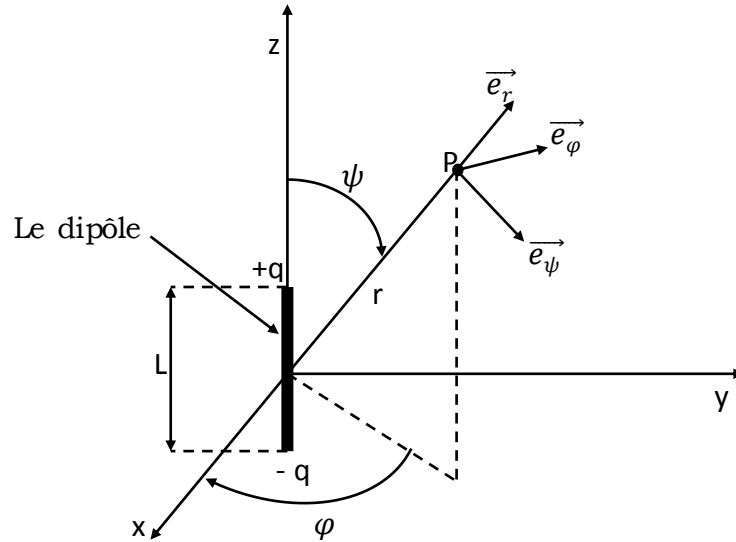


Figure II.4: Modélisation d'une source électrique: dipôle rayonnant.

2.2. Source magnétique (boucle rayonnante)

La modélisation d'une source magnétique par une boucle rayonnante est représentée sur la figure II.5; c'est un courant électrique sinusoïdal parcourant une boucle de section S et dont son rayon est petit devant r et λ . C'est une source qui émet davantage de champ magnétique [2, 3]. Les trois composantes du champ électrique et magnétique au point P du conducteur à la distance r de la boucle s'écrivent, en coordonnées sphériques [2, 3]:

$$\begin{cases} H_\psi = \frac{IS\sin\psi}{4\pi r^3} \left[1 + i \frac{2\pi r}{\lambda} - \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2 \right] e^{-i \frac{2\pi r}{\lambda}} \\ H_r = \frac{IS\cos\psi}{2\pi r^3} \left[1 + i \frac{2\pi r}{\lambda} \right] e^{-i \frac{2\pi r}{\lambda}} \\ E_\phi = i \frac{\pi IS\sin\psi}{\omega \epsilon_0 \lambda^2 r^2} \left[1 + i \frac{2\pi r}{\lambda} \right] e^{-i \frac{2\pi r}{\lambda}} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

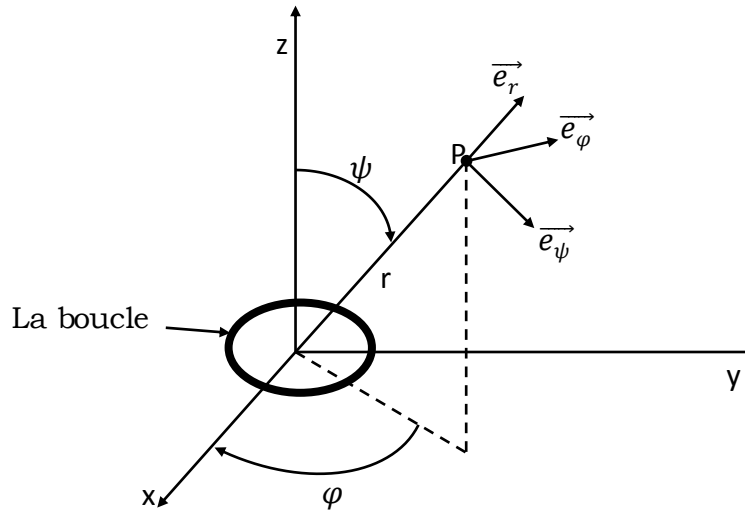


Figure II.5: Modélisation d'une source magnétique: boucle rayonnante.

3. CHAMP PROCHE ET CHAMP LOINTAIN

Les systèmes d'équations (II.6) et (II.7) peuvent se simplifier suivant la valeur du rapport $\frac{2\pi r}{\lambda}$, c'est-à-dire suivant la distance où l'on se trouve par rapport à la source; $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ ou $r > \frac{\lambda}{2\pi}$. Quand la distance source-matériau est $r < \frac{\lambda}{2\pi}$, le rayonnement est dominé par les composantes multipolaires inférieures des champs de source et nous sommes dans la limite du champ proche. Dans cette limite, le découplage apparaît pour les champs électriques et magnétiques donc il existe deux types de champs: champ haute impédance et champ basse impédance. La limite du champ lointain est déterminée par la condition que la distance source-matériau soit plus grande que la longueur d'onde dans l'air ($r > \frac{\lambda}{2\pi}$). Dans cette limite, le rayonnement est considéré comme une onde plane ou sphérique et l'impédance est donnée par l'impédance de l'air $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377 \Omega$, où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ représente la perméabilité magnétique de l'air [4, 5]. La figure II.6 illustre la variation de l'impédance en fonction de la distance séparant la source et le matériau [6]. Les expressions donnant les composantes des champs électrique et magnétique ainsi que l'impédance de l'onde électromagnétique en champ proche et champ lointain sont consignés dans le tableau II.1 [2].

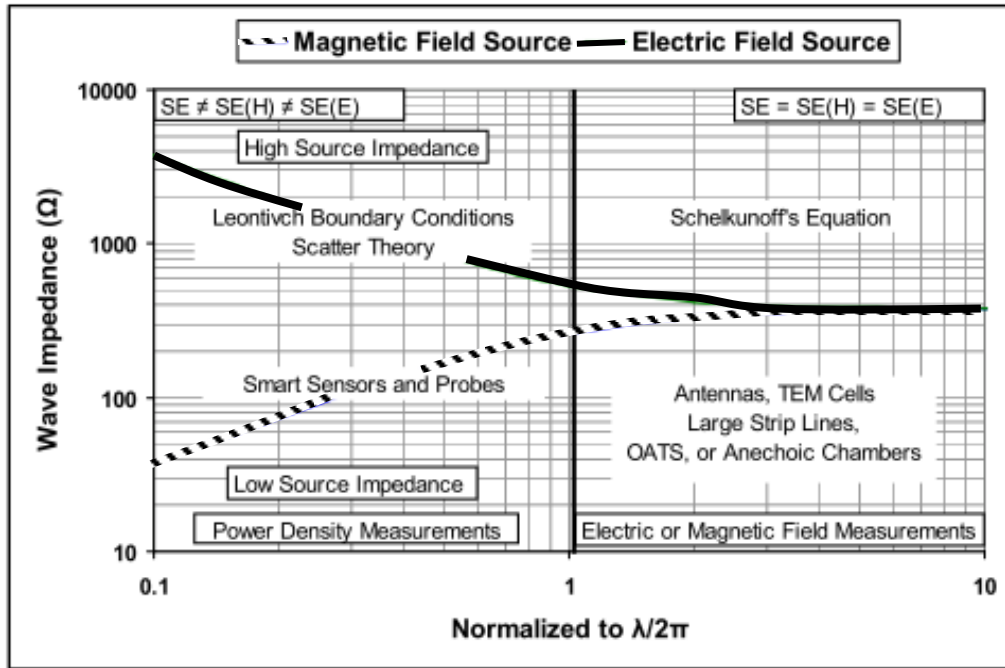


Figure II.6: Variation de l'impédance d'onde en fonction de la distance source-matériau, prise de réf. [6].

		Champ proche ($r < \frac{\lambda}{2\pi}$)	Champ lointain ($r > \frac{\lambda}{2\pi}$)
Source électrique	Les composantes du champ électromagnétique	$E_\psi = \frac{IL}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$ $E_r = \frac{IL}{2\pi\omega\epsilon_0 r^3} \left(\psi = 0\right)$ $H_\phi = \frac{IL}{4\pi r^2} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$	$E_\psi = \frac{I\pi L}{\lambda^2 \omega \epsilon_0 r} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$ $E_r = \frac{IL}{\lambda \omega \epsilon_0 r^2} \left(\psi = 0\right)$ $H_\phi = \frac{IL}{2\lambda r} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$
	L'impédance	$Z_E = \frac{E_\theta}{H_\phi} = 377 \frac{\lambda}{2\pi r}$	$Z_0 = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$
Source magnétique	Les composantes du champ électromagnétique	$H_\psi = \frac{IS}{4\pi r^3} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$ $H_r = \frac{IS}{2\pi r^3} \left(\psi = 0\right)$ $E_\phi = \frac{\mu\omega IS}{4\pi r^2} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$	$H_\psi = \frac{\pi IS}{\lambda^2 r} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$ $H_r = \frac{IS}{\lambda r^2} \left(\psi = 0\right)$ $E_\phi = \frac{\mu\omega IS}{2\lambda r} \left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$
	L'impédance	$Z_M = \frac{E_\phi}{H_\phi} = 377 \frac{r}{\lambda} \frac{2\pi}{\lambda}$	$Z_0 = \frac{E_\phi}{H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$

Tableau II.1: Champs électrique, magnétique et impédance en champ proche et champ lointain.

4. MECANISMES D'UN BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

Quand une onde électromagnétique est incidente sur une barrière; une partie est réfléchiée, une partie est absorbée par la barrière (se traduisant par un échauffement) et l'autre partie est transmise de l'autre coté de la barrière. L'efficacité du blindage SE pour un champ électrique [7, 8] est définie, en décibels (dB), par:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} |T| = -20 \log_{10} \left| \frac{E_t}{E_i} \right| \quad (\text{II.8})$$

où $T = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|$ est le coefficient de transmission.

En considérant le champ magnétique [1, 7 - 9], l'efficacité du blindage est définie par:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} \left| \frac{H_t}{H_i} \right| \quad (\text{II.9})$$

Pour une onde électromagnétique uniforme plane franchissant une barrière de cotés identiques, les relations (II.8) et (II.9) sont similaires, puisque les champs électrique et magnétique d'une onde électromagnétique uniforme plane ne sont liés qu'à l'impédance intrinsèque du milieu. Cependant, l'efficacité du blindage donnée par la relation (II.8) est souvent considérée comme la norme pour des deux cas.

Il existe trois phénomènes qui contribuent à la réduction du champ incident lorsqu'il traverse une barrière d'épaisseur d ; la réflexion, l'absorption et les réflexions internes multiples [1, 10 - 13] (figure II.7).

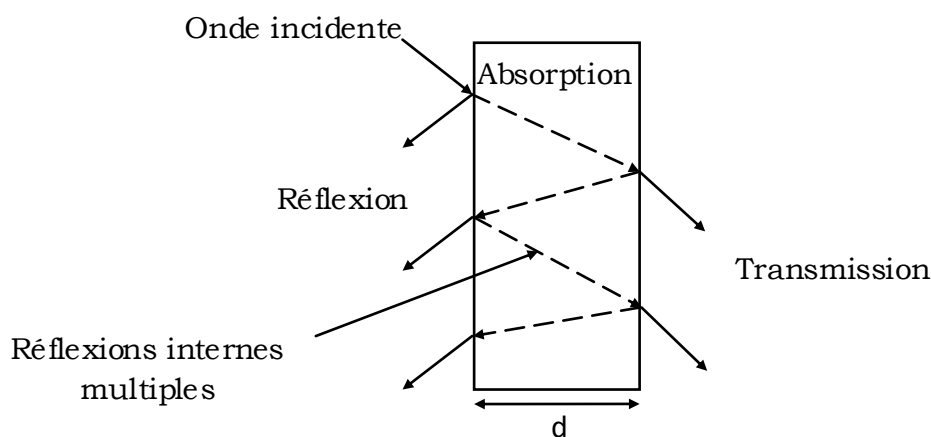


Figure II.7: Mécanisme du blindage électromagnétique.

L'efficacité du blindage donnée par la relation (II.8), peut être écrite en somme suivante [1, 14]:

$$SE(dB) = R(dB) + A(dB) + B(dB) \quad (\text{II.10})$$

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

4.1. 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 bon conducteur. La haute conductivité électrique n'est pas généralement une exigence pour le blindage électromagnétique, cependant, elle contribue à son amélioration [15, 16]. Pour cette raison, une grande partie de l'onde électromagnétique incidente est réfléchie.

4.2. Perte par absorption

L'absorption nécessite des propriétés électriques et/ou magnétiques pour le blindage [17]. Quand les champs électriques et magnétiques pénètrent un blindage, leurs amplitudes s'atténuent exponentiellement avec la profondeur à l'intérieur du blindage. C'est l'effet de peau ou effet pelliculaire (ou plus rarement effet Kelvin) qui est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, l'onde électromagnétique ne pénètre que la région proche de la surface d'un conducteur électrique. Une partie de cette énergie électromagnétique est cédée à la matière sous forme de courant de Foucault ce qui se traduit par un échauffement. Plus le blindage est épais, plus l'amplitude en sortie est faible. L'atténuation des champs dépend de l'épaisseur de peau δ qui représente la distance à laquelle l'amplitude des champs est atténuée à $1/e = 37\%$ de sa valeur initiale, elle est inversement proportionnelle à la fréquence et définit par [18]:

$$\delta = \sqrt{1/(\sigma\mu\pi f)} \quad (\text{II.11})$$

où f est la fréquence de l'onde électromagnétique.

4.3. Atténuation par réflexions internes multiples

Les réflexions internes multiples sont produites sur l'interface de sortie du blindage, lorsque l'épaisseur du matériau est plus faible devant l'épaisseur de peau. La somme de ces termes, de valeur négative, réduit de façon importante l'efficacité du blindage. Dans le cas où l'absorption $A(\text{dB}) > 15 \text{ dB}$, l'atténuation par réflexions internes multiples peut être négligée devant l'atténuation par réflexion et la perte par absorption [19].

5. DETERMINATION DE L'EFFICACITE DU BLINDAGE

La diminution du champ électromagnétique par le blindage dépend de plusieurs facteurs:

- Suivant que la source qui génère les champs parasites se trouve proche ou, au contraire, loin du circuit perturbé (champ proche ou champ lointain). D'autre part, l'efficacité du blindage n'est pas la même suivant que le champ incident est à prédominance de champ électrique ou de champ magnétique.
- La diminution du champ dépend du type de matériau, de l'épaisseur du matériau, de la forme du blindage, de la présence d'ouvertures et de la polarisation du champ incident. La fréquence du champ incident est également un paramètre très important [20, 21].

5.1. Blindage monocouche en champ lointain

Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 3 de ce chapitre, la limite du champ lointain est déterminée par la condition que la distance source-matériau soit plus grande que la longueur d'onde dans l'air ($r > \frac{\lambda}{2\pi}$). L'impédance est donnée par celle de l'air $Z_0 = 377 \Omega$.

5.1.1. Cas d'une incidence normale

La figure II.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 yz, 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.

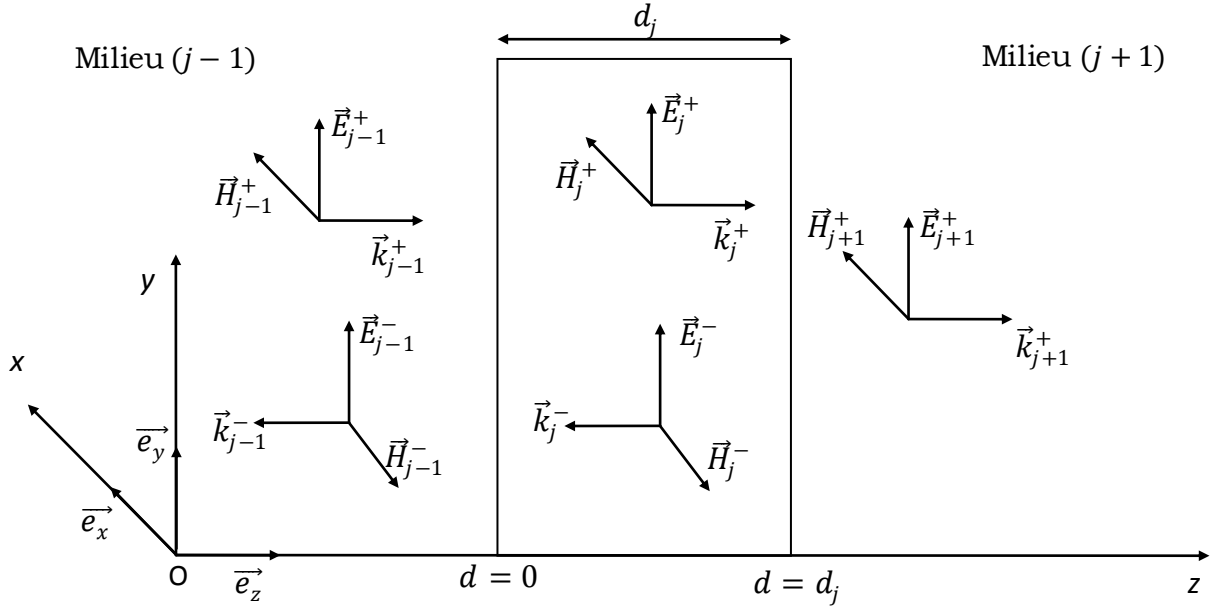


Figure II.8: Pénétration d'une onde électromagnétique à une incidence normale. Le signe (+) indique une propagation dans la direction des axes, tandis que le signe (-) dans le sens contraire.

Les différents champs électromagnétiques s'écrivent:

- Dans le milieu $j - 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^+ = H_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^- = -H_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^- = -\frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (\text{II. 12})$$

- Dans la couche j

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^+ = H_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^- = -H_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{array} \right. \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^- = -\frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (\text{II. 13})$$

- Dans le milieu $j + 1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j+1}^+ = H_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

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

- Quand $d = 0$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ + \vec{E}_{j-1}^- = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{j-1}^+ + \vec{H}_{j-1}^- = \vec{H}_j^+ + \vec{H}_j^- \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

$$\begin{cases} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{1}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

- Quand $d = d_j$

$$\begin{cases} E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ \\ \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} - \frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

Nous aurons un système de quatre équations à cinq inconnues:

$$\begin{cases} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- & \times \frac{1}{Z_{j-1}} & (1) \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{1}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) & & (2) \\ E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ & \times \frac{1}{Z_j} & (3) \\ \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} - \frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} & & (4) \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{cases} (1) + (2) \Rightarrow E_{j-1}^+ = \frac{1}{2} \left[(E_j^+ + E_j^-) + \frac{Z_{j-1}}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \right] & (5) \\ (3) + (4) \Rightarrow E_j^+ = \frac{Z_j}{2} \left(\frac{1}{Z_j} + \frac{1}{Z_{j+1}} \right) E_{j+1}^+ e^{+ik_j d_j} & (6) \\ (3) - (4) \Rightarrow E_j^- = \frac{Z_j}{2} \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{Z_{j+1}} \right) E_{j+1}^+ e^{-ik_j d_j} & (7) \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

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

$$E_{j-1}^+ = \frac{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})}{4Z_j Z_{j+1}} \left[1 - \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} e^{-i2k_j d_j} \right] e^{+ik_j d_j} E_{j+1}^+ \quad (\text{II.20})$$

Ainsi le coefficient de transmission s'écrit [22, 23]:

$$T = \frac{E_{j+1}^+}{E_{j-1}^+} = p [1 - q e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \quad (\text{II.21})$$

avec

$$p = \frac{4Z_j Z_{j+1}}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (\text{II.22})$$

$$q = \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (\text{II.23})$$

Finalement, l'efficacité du blindage est donnée par:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} |T| = -20 \log_{10} \left| p [1 - q e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right| \quad (\text{II.24})$$

ou encore:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} |p| + 20 \log_{10} |e^{ik_j d_j}| + 20 \log_{10} |[1 - q e^{-i2k_j d_j}]| \quad (\text{II.25})$$

dans laquelle nous définissons l'atténuation par réflexion $R(dB)$, la perte par absorption $A(dB)$ et l'atténuation par réflexions internes multiples $B(dB)$ comme suit [1, 20, 22, 23]:

$$R(dB) = -20 \log_{10} |p| \quad (\text{II.26})$$

$$A(dB) = 20 \log_{10} |e^{ik_j d_j}| \quad (\text{II.27})$$

et

$$B(dB) = 20 \log_{10} |[1 - q e^{-i2k_j d_j}]| \quad (\text{II.28})$$

5.1.2. Cas d'une incidence oblique

Nous avons rappelé la relation de l'efficacité du blindage monocouche sous une incidence normale. Que se passe-t-il si l'onde a une incidence oblique?

Dans le cas général de l'incidence oblique, on doit d'emblée distinguer deux situations différentes:

- Le cas où le champ électrique appartient au plan d'incidence (polarisation parallèle ou TM pour transverse magnétique).

- Le cas où le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence (polarisation perpendiculaire ou TE pour transverse électrique).

Les deux cas ne sont en effet pas équivalents comme ils l'étaient pour l'incidence normale.

a- Polarisation transversale électrique (TE)

La figure II.9 illustre une onde électromagnétique plane de polarisation électrique 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 yz , de $d = 0$ à gauche, jusqu'à $d = d_j$ à droite. Les signes + et - renvoient au sens de propagation, la source du rayonnement se trouvant sur la gauche de la figure selon la convention classique.

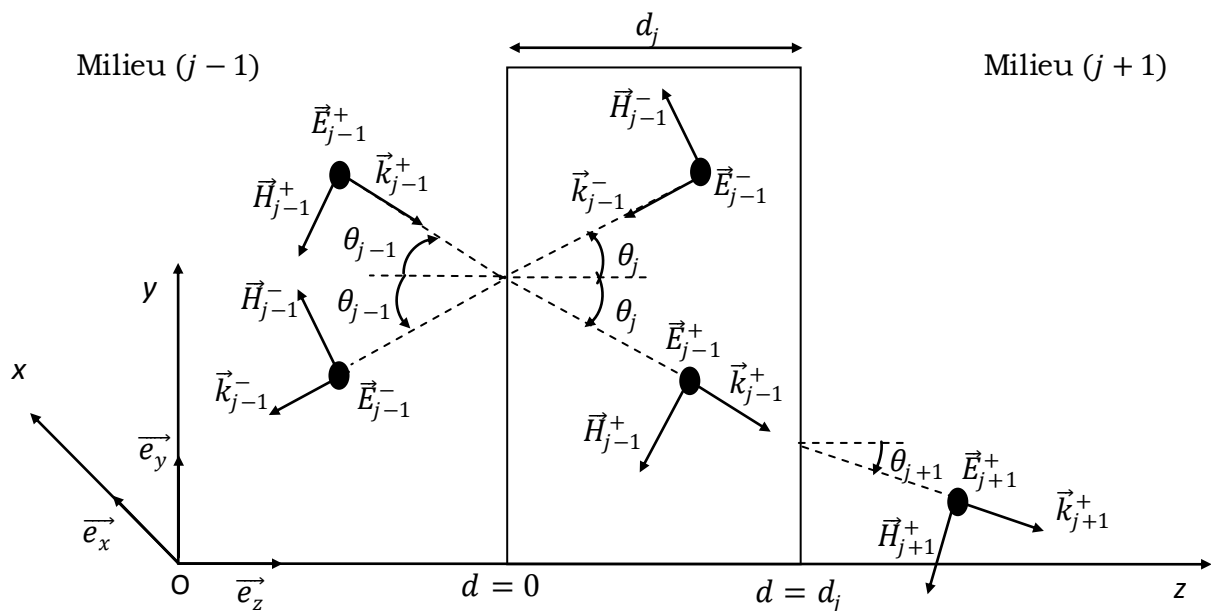


Figure II.9: Pénétration d'une onde électromagnétique de polarisation électrique.

Les différents champs électromagnétiques s'écrivent:

- Dans le milieu $j - 1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^+ = H_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} (-\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^- = -H_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} (\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

$$\text{ou encore} \begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} (-\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^- = -\frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} (\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

- Dans la couche j

$$\begin{cases} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^+ = H_j^+ e^{-ik_j d_j} (-\cos\theta_j \vec{e}_y + \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^- = -H_j^- e^{+ik_j d_j} (\cos\theta_j \vec{e}_y + \sin\theta_j \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

$$\text{ou} \begin{cases} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} (-\cos\theta_j \vec{e}_y + \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^- = -\frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} (\cos\theta_j \vec{e}_y + \sin\theta_j \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

- Dans le milieu $j + 1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j+1}^+ = H_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} (-\cos\theta_{j+1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j+1} \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

$$\text{ou} \begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} (-\cos\theta_{j+1} \vec{e}_y + \sin\theta_{j+1} \vec{e}_z) \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

Comme l'impédance est un rapport entre les composantes tangentielles à l'interface de champ électrique et champ magnétique; le champ électrique est selon \vec{e}_x et le champ magnétique est selon \vec{e}_y . Les systèmes d'équations (II.30), (II.32) et (II.34) se réduisent, respectivement, à:

$$\text{Milieu } j-1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \cos\theta_{j-1} \vec{e}_y \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j-1}^- = -\frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \cos\theta_{j-1} \vec{e}_y \end{array} \right. \quad (\text{II. 35})$$

$$\text{La couche } j \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} \cos\theta_j \vec{e}_y \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{H}_j^- = -\frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} \cos\theta_j \vec{e}_y \end{array} \right. \quad (\text{II. 36})$$

$$\text{Milieu } j+1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \cos\theta_{j+1} \vec{e}_y \end{array} \right. \quad (\text{II. 37})$$

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

- Quand $d = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ + \vec{E}_{j-1}^- = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{j-1}^+ + \vec{H}_{j-1}^- = \vec{H}_j^+ + \vec{H}_j^- \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- \\ \frac{\cos\theta_{j-1}}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{\cos\theta_j}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \end{array} \right. \quad (\text{II. 38})$$

- Quand $d = d_j$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ \\ \frac{\cos\theta_j}{Z_j} \left(\frac{E_j^+}{Z_j} e^{-ik_j d_j} - \frac{E_j^-}{Z_j} e^{+ik_j d_j} \right) = \frac{\cos\theta_{j+1}}{Z_{j+1}} E_{j+1}^+ \end{array} \right. \quad (\text{II. 39})$$

Nous aurons un système de quatre équations:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{j-1}^+ + E_{j-1}^- = E_j^+ + E_j^- \\ \frac{\cos\theta_{j-1}}{Z_{j-1}} (E_{j-1}^+ - E_{j-1}^-) = \frac{\cos\theta_j}{Z_j} (E_j^+ - E_j^-) \\ E_j^+ e^{-ik_j d_j} + E_j^- e^{+ik_j d_j} = E_{j+1}^+ \\ \frac{\cos\theta_j}{Z_j} (E_j^+ e^{-ik_j d_j} - E_j^- e^{+ik_j d_j}) = \frac{\cos\theta_{j+1}}{Z_{j+1}} E_{j+1}^+ \end{array} \right. \quad (\text{II. 40})$$

Ce système d'équation est similaire au système (II.18), donc le coefficient de transmission, et par suite l'efficacité du blindage, évoluent selon la même

expression obtenue dans le cas d'une incidence normale, il suffit juste de remplacer $\frac{\cos \theta_{j-1}}{Z_{j-1}}$ par Z_{j-1}^\perp , $\frac{\cos \theta_j}{Z_j}$ par Z_j^\perp et $\frac{\cos \theta_{j+1}}{Z_{j+1}}$ par Z_{j+1}^\perp . Pour une polarisation électrique (verticale) l'impédance intrinsèque est [24, 25]:

$$Z^\perp = \frac{Z}{\cos \theta_i} \quad (\text{II. 41})$$

Ainsi, pour une polarisation électrique (verticale), l'efficacité du blindage est donnée par:

$$SE(\text{dB}) = -20 \log_{10} \left| p^\perp [1 - q^\perp e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right| \quad (\text{II. 42})$$

avec

$$p^\perp = \frac{4Z_j^\perp Z_{j+1}^\perp}{(Z_j^\perp + Z_{j-1}^\perp)(Z_j^\perp + Z_{j+1}^\perp)} \quad (\text{II. 43})$$

$$q^\perp = \frac{(Z_{j+1}^\perp - Z_j^\perp)(Z_{j-1}^\perp - Z_j^\perp)}{(Z_j^\perp + Z_{j-1}^\perp)(Z_j^\perp + Z_{j+1}^\perp)} \quad (\text{II. 44})$$

b- Polarisation transversale magnétique (TM)

La figure II.10 illustre une onde électromagnétique plane de polarisation magnétique 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 .

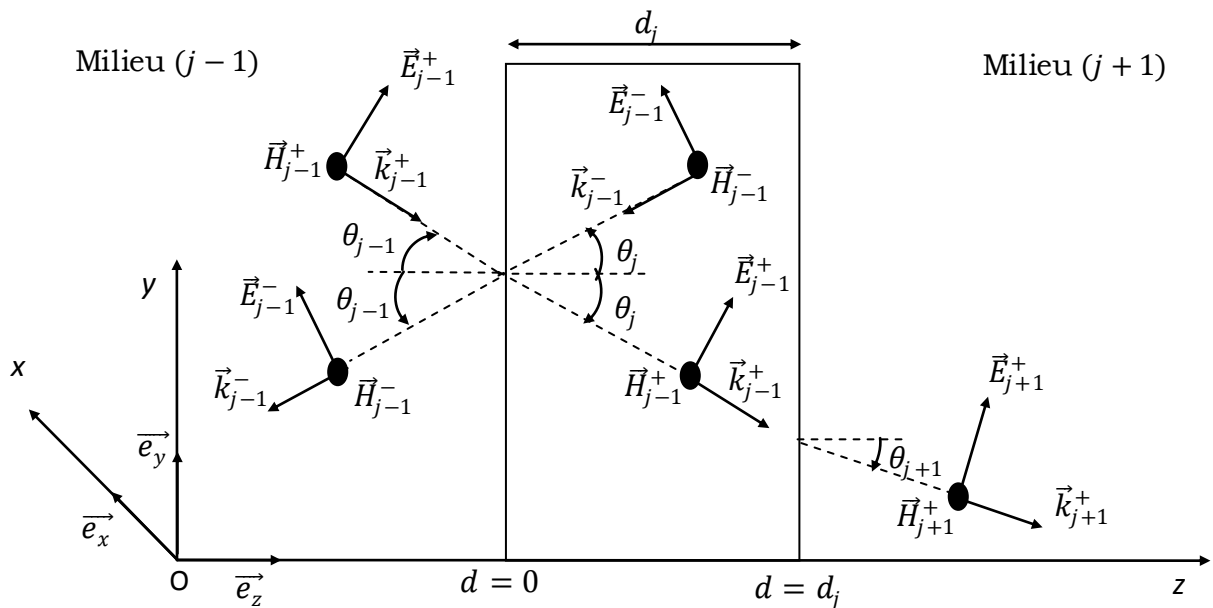


Figure II.10: Blindage monocouche sous une onde électromagnétique polarisée horizontalement.

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 yz , de $d = 0$ à gauche, jusqu'à $d = d_j$ à droite.

Les différents champs électromagnétiques s'écrivent:

- Dans le milieu $j-1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} (\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j-1}^+ = H_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} (-\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j-1}^- = H_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 45})$$

$$\text{ou} \begin{cases} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} (\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} (-\cos\theta_{j-1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j-1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j-1}^- = \frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

- Dans la couche j

$$\begin{cases} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} (\cos\theta_j \vec{e}_y - \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{H}_j^+ = H_j^+ e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} (-\cos\theta_j \vec{e}_y - \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{H}_j^- = H_j^- e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 47})$$

$$\text{ou} \begin{cases} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} (\cos\theta_j \vec{e}_y - \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = E_j^- e^{+ik_j d_j} (-\cos\theta_j \vec{e}_y - \sin\theta_j \vec{e}_z) \\ \vec{H}_j^- = \frac{E_j^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 48})$$

- Dans le milieu $j+1$

$$\begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} (\cos\theta_{j+1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j+1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j+1}^+ = H_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 49})$$

$$\text{ou} \begin{cases} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} (\cos\theta_{j+1} \vec{e}_y - \sin\theta_{j+1} \vec{e}_z) \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{II. 50})$$

Comme l'impédance est un rapport entre les composantes tangentielles à l'interface de champ électrique et champ magnétique; le champ électrique est selon \vec{e}_y et le champ magnétique est selon \vec{e}_x . Les systèmes d'équations (II.46), (II.48) et (II.50) se réduisent, respectivement, à:

$$\text{Milieu } j - 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ = E_{j-1}^+ e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \cos\theta_{j-1} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^+ = \frac{E_{j-1}^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \\ \vec{E}_{j-1}^- = -E_{j-1}^- e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \cos\theta_{j-1} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j-1}^- = \frac{E_{j-1}^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_{j-1}d_{j-1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (\text{II.51})$$

$$\text{La couche } j \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_j^+ = E_j^+ e^{-ik_j d_j} \cos\theta_j \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^+ = \frac{E_j^+}{Z_{j-1}} e^{-ik_j d_j} \vec{e}_x \\ \vec{E}_j^- = -E_j^- e^{+ik_j d_j} \cos\theta_j \vec{e}_y \\ \vec{H}_j^- = \frac{E_j^-}{Z_{j-1}} e^{+ik_j d_j} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (\text{II.52})$$

$$\text{Milieu } j + 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j+1}^+ = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \cos\theta_{j+1} \vec{e}_y \\ \vec{H}_{j+1}^+ = \frac{E_{j+1}^+}{Z_{j+1}} e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} \vec{e}_x \end{array} \right. \quad (\text{II.53})$$

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

- Quand $d = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{j-1}^+ + \vec{E}_{j-1}^- = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{j-1}^+ + \vec{H}_{j-1}^- = \vec{H}_j^+ + \vec{H}_j^- \end{array} \right. \quad (\text{II.54})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{j-1} \cos\theta_{j-1} (H_{j-1}^+ - H_{j-1}^-) = Z_j \cos\theta_j (H_j^+ - H_j^-) \\ H_{j-1}^+ + H_{j-1}^- = H_j^+ + H_j^- \end{array} \right. \quad (\text{II.55})$$

- Quand $d = d_j$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_j \cos\theta_j (H_j^+ e^{-ik_j d_j} - H_j^- e^{+ik_j d_j}) = Z_{j+1} \cos\theta_{j+1} H_{j+1}^+ \\ H_j^+ e^{-ik_j d_j} + H_j^- e^{+ik_j d_j} = H_{j+1}^+ \end{array} \right. \quad (\text{II.56})$$

Nous aurons un système de quatre équations:

$$\begin{cases} Z_{j-1} \cos \theta_{j-1} (H_{j-1}^+ - H_{j-1}^-) = Z_j \cos \theta_j (H_j^+ - H_j^-) \\ H_{j-1}^+ + H_{j-1}^- = H_j^+ + H_j^- \\ Z_j \cos \theta_j (H_j^+ e^{-ik_j d_j} - H_j^- e^{+ik_j d_j}) = Z_{j+1} \cos \theta_{j+1} H_{j+1}^+ \\ H_j^+ e^{-ik_j d_j} + H_j^- e^{+ik_j d_j} = H_{j+1}^+ \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

En remplaçant $Z_{j-1} \cos \theta_{j-1}$ par Z_{j-1}^{\parallel} , $Z_j \cos \theta_j$ par Z_j^{\parallel} et $Z_{j+1} \cos \theta_{j+1}$ par Z_{j+1}^{\parallel} , le système d'équation sera similaire au système II.18. Le coefficient de transmission, et par suite l'efficacité du blindage, évoluent selon la même relation obtenue dans le cas d'une incidence normale, dans laquelle l'impédance intrinsèque pour une polarisation magnétique est [24, 25]:

$$Z^{\parallel} = Z \cos \theta_i \quad (\text{II.58})$$

Ainsi, pour une polarisation magnétique (horizontale), l'efficacité du blindage est donnée par:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} \left| p^{\parallel} [1 - q^{\parallel} e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right| \quad (\text{II.59})$$

avec

$$p^{\parallel} = \frac{4Z_j^{\parallel} Z_{j+1}^{\parallel}}{(Z_j^{\parallel} + Z_{j-1}^{\parallel})(Z_j^{\parallel} + Z_{j+1}^{\parallel})} \quad (\text{II.60})$$

$$q^{\parallel} = \frac{(Z_{j+1}^{\parallel} - Z_j^{\parallel})(Z_{j-1}^{\parallel} - Z_j^{\parallel})}{(Z_j^{\parallel} + Z_{j-1}^{\parallel})(Z_j^{\parallel} + Z_{j+1}^{\parallel})} \quad (\text{II.61})$$

5.2. Blindage multicouche en champ lointain

Un blindage multicouche est obtenu à partir d'assemblage de deux ou plusieurs couches de matière différentes. Ce type de blindage consiste à développer une structure multicouche en utilisant les performances de chaque constituant. Pour calculer l'efficacité du blindage d'une structure multicouche, le raisonnement utilisé dans le cas d'un blindage monocouche peut être étendu. Pour ce faire, nous considérons une onde électromagnétique plane incidente sur une structure à j couches ($j = 1..n$). Chaque couche est supposée homogène et isotrope avec une permittivité ϵ_j ,

une perméabilité μ_j , une conductivité électrique σ_j et une épaisseur d_j (Figure II.11).

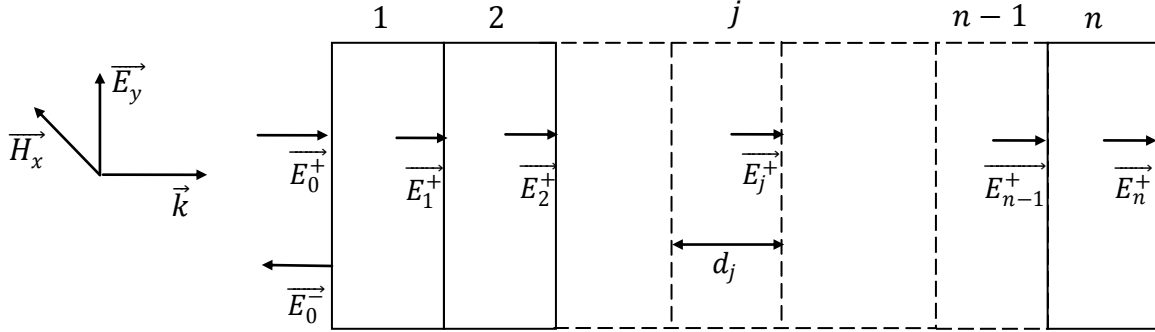


Figure II.11: Représentation schématique d'onde électromagnétique pénétrant une structure multicouche.

Le coefficient de transmission de la couche 1 est $T_1 = \frac{E_1^+}{E_0^+}$, de la couche 2 est $T_2 = \frac{E_2^+}{E_1^+}$, de la couche 3 est $T_3 = \frac{E_3^+}{E_2^+}$ de la couche j est $T_j = \frac{E_j^+}{E_{j-1}^+}$ et de la couche n est $T_n = \frac{E_n^+}{E_{n-1}^+}$. En substituant T_n dans T_{n-1} , en suite T_{n-1} dans T_{n-2} jusqu'à T_1 , nous pouvons écrire le coefficient de transmission total de la structure multicouche comme un produit de l'ensemble des coefficients de transmission de chaque couche, donné par [9, 22]:

$$T = \prod_{j=1}^n T_j \tag{II.62}$$

Finalement, en considérant que la structure multicouche est en contact avec de l'air ($Z_0 = Z_{n+1} = 377 \Omega$), la généralisation de la relation (II.24) permet d'avoir l'efficacité du blindage multicouche, donnée par [20]:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j [1 - q_j e^{-i2k_j d_j}]^{-1} e^{-ik_j d_j} \right| \tag{II.63}$$

$$SE(dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j \right| + 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| + 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n [1 - q_j e^{-i2k_j d_j}] \right| \tag{II.64}$$

où

$$R(dB) = -20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n p_j \right| \quad (\text{II. 65})$$

$$A(dB) = 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{II. 66})$$

$$B(dB) = 20 \log_{10} \left| \prod_{j=1}^n [1 - q_j e^{-i2k_j d_j}] \right| \quad (\text{II. 67})$$

$$p_j = \frac{4Z_j Z_{j+1}}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (\text{II. 68})$$

et

$$q_j = \frac{(Z_{j+1} - Z_j)(Z_{j-1} - Z_j)}{(Z_j + Z_{j-1})(Z_j + Z_{j+1})} \quad (\text{II. 69})$$

6. BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE EN CHAMP PROCHE

En champ proche, l'un des deux champs (électrique ou magnétique) est prédominant que l'autre. La détermination de l'efficacité du blindage en champ proche est un problème beaucoup plus difficile qu'en champ lointain, ceci est dû à la complexité des champs proches. Cependant, nous pouvons établir la relation de l'efficacité du blindage en champ proche en remplaçant l'impédance d'onde dans l'air en champ lointain ($Z_0 = 377 \Omega$) par les impédances suivant le type de source: électrique Z_E ou magnétique Z_M données dans le tableau II.1.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les aspects théoriques fondamentaux du blindage électromagnétique dont nous aurons besoin dans notre travail de thèse. En utilisant la théorie de la ligne de transmission et en effectuant un calcul détaillé, nous avons retrouvé les formules de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et de l'efficacité du blindage monocouche et multicouche en cas d'incidence normale et incidence oblique, en champ

proche et en champ lointain. Nous avons affirmé que la procédure de calcul est la même et ce, quelque soit le type d'incidence: normale ou oblique et le type du champ: proche ou lointain. Néanmoins, le choix de la valeur d'impédance d'onde électromagnétique suivant la situation étudiée est un facteur crucial avant d'entamer les calculs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Celozzi S, Araneo R, Lovatr G, Clayton P. Electromagnetic Shielding. John Wiley & Sons, New Jersey; **2008**; p. 56.
- [2] Mohr RJ. Fundamental models for near-field shielding. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC. **2008**; 1 – 4.
- [3] Adams WS, Mills AH. Electromagnetic shielding in the near field. IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record. **1968**; 317 – 329.
- [4] Colaneri NF, Shacklette LW. EMI shielding measurements of conductive polymer blends. IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS. **1992**; 41: 291 – 297.
- [5] HOANG NN, 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 de l'université Bordeaux 1. **2005**; p. 64.
- [6] Keebler PF, Phipps KO. Shielding effectiveness with a twist. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC. **2008**; 1 – 6.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Thomassin JM, Jérôme C, Pardoën T, Bailly C, Huynen I, Detrembleur C. Polymer/carbon Based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, Mat. Sci Eng R. **2013**; 74: 211–232.
- [10] Al-Saleh MH. Influence Of conductive network structure on the EMI Shielding and electrical percolation of carbon nanotube/polymer nanocomposites. Synth. Met. **2015**; 205: 78 – 84.
- [11] Yuan B, Yu L, Sheng L, An K, Zhao X. Comparison of electromagnetic interference shielding properties between single-wall carbon nanotube and graphene sheet/polyaniline composites. J. Phys. D: Appl. Phys. **2012**; 45: 235108.
- [12] Arjmand M, Apperley T, Okoniewski M, Sundararaj U. Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites. CARBON. **2012**; 50: 5126 – 5134.

- [13] Kim YY, Yun J, Kim HI, Lee YS. Effect of oxyfluorination on electromagnetic interference shielding of polypyrrole-coated multi-walled carbon nanotubes. *J. Ind. Eng. Chem.* **2012**; 18: 392 – 398.
- [14] 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.
- [15] Chung DDL. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *CARBON.* **2001**; 39: 279 – 85.
- [16] Von Klemperer CJ, Maharaj D. Composite electromagnetic interference shielding materials for aerospace applications. *Compos. Struct.* **2009**; 91: 467 – 472.
- [17] Al-Saleh MH, Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *CARBON.* **2009**; 47: 1738 – 46.
- [18] 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.
- [19] Das NC, Maiti S. Electromagnetic interference shielding of carbon nanotube/ethylene vinyl acetate composites. *J. Mater. Sci.* **2008**; 43: 1920 – 25.
- [20] Clayton R. Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. Second Edition. John Wiley & Sons, New Jersey; **2006**; p. 718.
- [21] Boutar A. Contribution au développement de modèles circuits pour l'étude de couplages électromagnétiques à l'intérieur d'enceintes métalliques. Thèse doctorat de l'université de Limoges. **2014**; p. 19.
- [22] Schulz RB, Plantz VC, Brush DR. Shielding theory and practice. *IEEE T. Electromagn. C.* **1988**; 30: 187 – 201.
- [23] 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.
- [24] Naishadham, K. Shielding effectiveness of conductive polymers. *IEEE T. Electromagn. C.* **1992**; 34: 47 – 50.
- [25] Benhamou SM, Hammouni M, Khaldi S. Theoretical approach of electromagnetic shielding of multilayer conductive sheets. *PIER M.* **2015**; 41: 167 – 175.

CHAPITRE III

Résultats et discussions

INTRODUCTION

Plusieurs modèles analytiques et numériques ont été proposés et appliqués pour estimer l'efficacité du blindage et les propriétés électromagnétiques des matériaux hétérogènes [1 – 4]. Parmi ces méthodes théoriques, nous pouvons citer la méthode de ligne de transmission équivalente (TL) [5 – 8]. Plusieurs travaux traitent la validité de cette méthode pour la modélisation de l'efficacité du blindage à une incidence normale [7, 9]. Cependant, ces travaux ne traitent pas l'effet de la variation de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde sur le blindage électromagnétique, comme il a rapporté dans [5, 6].

Ce chapitre est présenté en deux parties de la manière suivante:

- Dans la première partie, nous proposons une approche pour modéliser et simuler le blindage électromagnétique multicouche construit à base de bons matériaux conducteurs et ce, en faisant l'équivalence entre le blindage simple et le blindage multicouche. Cette approche permet d'avoir la formule de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'efficacité du blindage et de proposer une nouvelle expression de l'impédance équivalente d'une structure multicouche.

- Dans la deuxième partie, nous proposons des modèles simplifiés des atténuations par réflexion, par réflexions internes multiples, de la perte par absorption et de l'efficacité du blindage électromagnétique multicouche construit à base de bons matériaux conducteurs. Ces modèles simples concernent deux gammes de fréquences de part et d'autre de la fréquence de coupure.

Dans ces deux parties, nous examinons l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique monocouche à base de polymère conducteur et du blindage multicouche obtenu par l'association de polymère conducteur à des matériaux conducteurs classiques. Ces quantités seront calculées et analysées en fonction de l'angle d'incidence pour les deux types de polarisation; électrique et magnétique et de la fréquence.

Première partie:
Equivalence entre le blindage
monocouche et le blindage
multicouche

1. FORMALISME MATRICIEL DE LA THEORIE DE LA LIGNE DE TRANSMISSION

1.1. La matrice caractéristique

La figure III.1 illustre une onde électromagnétique plane incidente sur une structure à j couches ($j = 1..n + 1$). Chaque couche est supposée homogène et isotrope avec une permittivité ϵ_j , une perméabilité μ_j , une conductivité électrique σ_j et une épaisseur d_j .

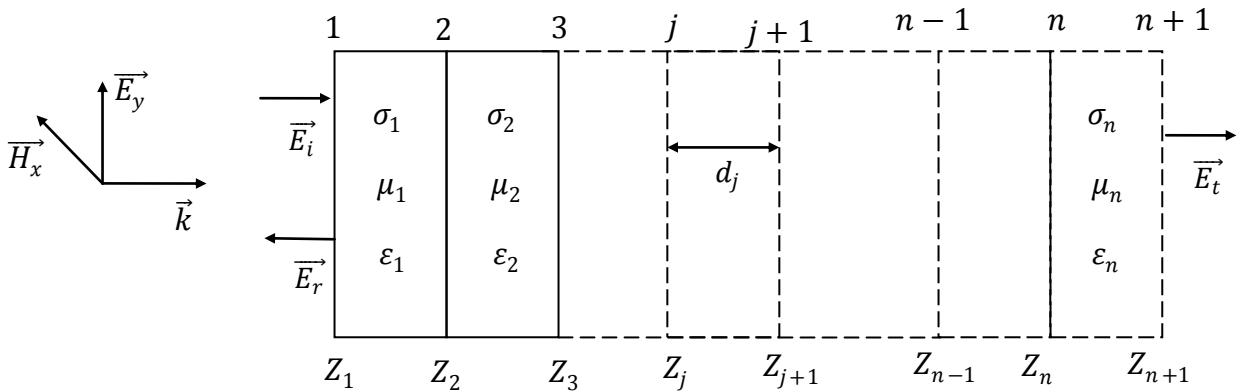


Figure III.1: Incidence d'une onde électromagnétique sur une structure multicouche.

Nous choisissons une couche de la structure, délimitée par les interfaces j et $j + 1$ comme le montre la figure III.2. A l'intérieur de cette couche, nous pouvons décomposer les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} . Les signes $+$ et $-$ renvoient au sens de propagation et la source du rayonnement se trouvant à l'amont de celle-ci selon la convention classique.

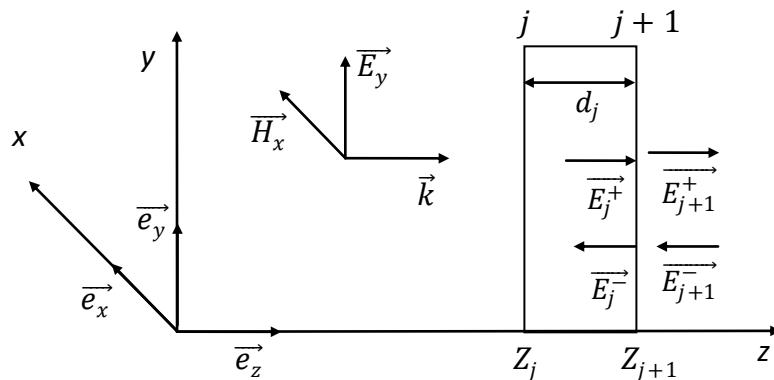


Figure III.2: Incidence d'une onde électromagnétique sur la couche j .

Les expressions donnant les champs électriques et magnétiques s'écrivent:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \vec{H}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{H}_j^- e^{+ik_j d_j} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

A partir des équations de Maxwell, nous avons:

$$\vec{H} = \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E} \quad (\text{III. 2})$$

Le système d'équations (III.1) devient:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \frac{\vec{k}_j}{\omega \mu_j} \wedge \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

D'autre part, nous avons:

$$\begin{cases} \vec{k} \wedge \vec{E}_j^+ = -k_j \cdot E_j^+ \vec{e}_x \\ \vec{k} \wedge \vec{E}_j^- = +k_j \cdot E_j^- \vec{e}_x \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

$$\begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x_j} = -\frac{k_j}{\omega \mu_j} (\vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} - \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j}) \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Sur la première interface, nous avons:

$$d - d_j = 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^- \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^- - \vec{E}_j^+) \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

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

$$\begin{cases} (\vec{E}_{y_j} = \vec{E}_j^+ + \vec{E}_j^-) \frac{1}{Z_j} \\ \vec{H}_{x_j} = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^- - \vec{E}_j^+) \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

$$\begin{cases} \vec{E}_j^+ = \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} - Z_j \vec{H}_{x_j}) \\ \vec{E}_j^- = \frac{1}{2} (\vec{E}_{y_j} + Z_j \vec{H}_{x_j}) \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

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

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \vec{E}_{j+1}^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_{j+1}^- e^{+ik_j d_j} = \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j} + \vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x(j+1)} = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_{j+1}^- e^{+ik_j d_j} - \vec{E}_{j+1}^+ e^{-ik_j d_j}) = \frac{1}{Z_j} (\vec{E}_j^- e^{+ik_j d_j} - \vec{E}_j^+ e^{-ik_j d_j}) \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

et

$$\begin{cases} \vec{E}_j^+ = \frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} - Z_j \vec{H}_{xj}) \\ \vec{E}_j^- = \frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} + Z_j \vec{H}_{xj}) \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

L'insertion de la relation (III.10) dans la relation (III.9), donne:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} - Z_j \vec{H}_{xj}) e^{-ik_j d_j} + \frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} + Z_j \vec{H}_{xj}) e^{+ik_j d_j} \\ \vec{H}_{x(j+1)} = \frac{1}{Z_j} \left[\frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} + Z_j \vec{H}_{xj}) e^{+ik_j d_j} - \frac{1}{2} (\vec{E}_{yj} - Z_j \vec{H}_{xj}) e^{-ik_j d_j} \right] \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

par suite:

$$\begin{cases} \vec{E}_{y(j+1)} = \vec{E}_{yj} \cosh(ik_j d_j) - Z_j \vec{H}_{xj} \sinh(ik_j d_j) \\ \vec{H}_{x(j+1)} = -\frac{1}{Z_j} \vec{E}_{yj} \sinh(ik_j d_j) + \vec{H}_{xj} \cosh(ik_j d_j) \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

Le système d'équations (III.12) peut être écrit sous une forme matricielle [10]:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+1)} \\ \vec{H}_{x(j+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(ik_j d_j) & -Z_j \sinh(ik_j d_j) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) & \cosh(ik_j d_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{yj} \\ \vec{H}_{xj} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 13})$$

A chaque couche j , nous associons une matrice caractéristique M_j , définie comme suit [11, 12]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cosh(ik_j d_j) & -Z_j \sinh(ik_j d_j) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) & \cosh(ik_j d_j) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 14})$$

Par conséquent, la détermination des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} dans une couche considérée $j + 1$, suppose la connaissance des champs, de

l'épaisseur et des propriétés physiques de la couche précédente j (dans le sens de propagation de l'onde). Par exemple pour la couche $j + 2$, nous aurons le produit suivant [13]:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+2)} \\ \vec{H}_{x(j+2)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cosh[ik_{j+1}d_{j+1}] & -Z_{j+1} \sinh[ik_{j+1}d_{j+1}] \\ -\frac{1}{Z_{j+1}} \sinh[ik_{j+1}d_{j+1}] & \cosh[ik_{j+1}d_{j+1}] \end{bmatrix}}_{M_{(j+1)}} \begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+1)} \\ \vec{H}_{x(j+1)} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+2)} \\ \vec{H}_{x(j+2)} \end{bmatrix} = M_{(j+1)} \begin{bmatrix} \cosh(ik_j d_j) & -Z_j \sinh(ik_j d_j) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh(ik_j d_j) & \cosh(ik_j d_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{yj} \\ \vec{H}_{xj} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 16})$$

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(j+2)} \\ \vec{H}_{x(j+2)} \end{bmatrix} = M_{(j+1)} \cdot M_j \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_{yj} \\ \vec{H}_{xj} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 17})$$

Le passage de la couche $j = 1$ à la couche $j = n + 1$, donne [14]:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{y(n+1)} \\ \vec{H}_{x(n+1)} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^n M_j \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_{yj} \\ \vec{H}_{xj} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 18})$$

Posons

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 19})$$

la connaissance de cette matrice permet d'avoir les propriétés effectives du milieu.

1.2. Impédance caractéristique

L'impédance Z est le rapport entre les composantes orthogonales de \vec{E} et de \vec{H} .

$$Z = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} \quad (\text{III. 20})$$

Nous définissons l'impédance effective Z_{j+1} de la couche $j + 1$ [15, 16];

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

avec

$$Z_j = -\frac{E_{yj}}{H_{xj}} \quad (\text{III. 22})$$

d'où:

$$Z_{j+1} = \frac{M_{11}Z_j - M_{12}}{M_{22} - Z_j M_{21}} \quad (\text{III. 23})$$

1.3. Calcul des coefficients de transmission et de réflexion

Pour établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion d'une onde électromagnétique pénétrant une structure multicouche par un formalisme matriciel, nous associons à chaque couche de la figure III.1 une matrice caractéristique donnant le champ électromagnétique $(\vec{E}_{j+1}, \vec{H}_{j+1})$ en fonction de (\vec{E}_j, \vec{H}_j) .

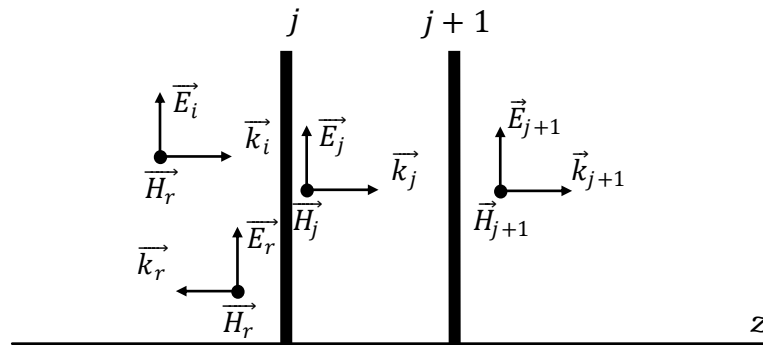


Figure III.3: Champs électromagnétiques aux interfaces.

A l'interface j , comme illustré sur la figure III.3, les conditions de continuité s'écrivent:

$$\begin{cases} \vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_j \\ \vec{H}_i + \vec{H}_r = \vec{H}_j \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

$$\begin{cases} (\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_j) \frac{1}{Z_{j-1}} \\ \frac{1}{Z_{j-1}} (\vec{E}_i - \vec{E}_r) = \frac{\vec{E}_j}{Z_j} \end{cases} \quad (\text{III. 25})$$

$$\vec{E}_i = \left(\frac{Z_j + Z_{j-1}}{2Z_j} \right) \vec{E}_j \quad (\text{III. 26})$$

La relation (III.26) nécessite la connaissance de \vec{E}_j , qui est calculé en inversant la matrice caractéristique, nous aboutissons à:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_j \\ \vec{H}_j \end{bmatrix} = \frac{1}{\underbrace{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}}_{=1}} \begin{bmatrix} M_{11} & -M_{12} \\ -M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_{j+1} \\ \vec{H}_{j+1} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 27})$$

donc

$$\vec{E}_j = \left(M_{11} - \frac{M_{12}}{Z_{j+1}} \right) \vec{E}_{j+1} \quad (\text{III. 28})$$

et

$$Z_j = \frac{M_{11}Z_{j+1} - M_{12}}{M_{22} - Z_{j+1}M_{21}} \quad (\text{III. 29})$$

Le coefficient de transmission est le rapport entre les champs électriques transmis et incident, il s'écrit (en injectant les équations (III.28) et (III.29) dans l'équation (III.26)) [4, 13, 14, 17, 18]:

$$T = \left| \frac{\vec{E}_{j+1}}{\vec{E}_i} \right| = \frac{2Z_{j+1}}{(M_{11}Z_{j+1} - M_{12}) + Z_{j-1}(M_{22} - Z_{j+1}M_{21})} \quad (\text{III. 30})$$

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

$$R = \left| \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} \right| = \frac{Z_j - Z_{j-1}}{Z_j + Z_{j-1}} \quad (\text{III. 31})$$

Par suite, l'insertion de la relation (III.29) dans la relation (III.31), donne le coefficient de réflexion suivant [13, 14, 18]:

$$R = \frac{(M_{11}Z_{j+1} - M_{12}) - Z_{j-1}(M_{22} - Z_{j+1}M_{21})}{(M_{11}Z_{j+1} - M_{12}) + Z_{j-1}(M_{22} - Z_{j+1}M_{21})} \quad (\text{III. 32})$$

2. BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE A BASE DE MATERIAUX BONS CONDUCTEURS

Un bon conducteur est caractérisé par la condition suivante [19]:

$$\sigma \gg \omega \varepsilon \quad (\text{III.33})$$

L'impédance donnée par la relation (II.5), se simplifiée à:

$$Z = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (\text{III.34})$$

et le vecteur d'onde s'écrit:

$$k = (1 - i) \sqrt{(\sigma \mu \omega) / 2} \quad (\text{III.35})$$

2.1. Blindage monocouche à base d'un matériau bon conducteur

Dans le chapitre II, nous avons considéré deux zones distinctes: la zone des champs proches et la zone des champs lointains. Commençons tout d'abord, par l'étude du blindage électromagnétique monocouche à base d'un matériau bon conducteur en champ lointain suivi de celle en champ proche.

2.1.1. En champ lointain

Soit une onde électromagnétique pénétrant, à une incidence oblique, un blindage à base d'un matériau bon conducteur en contact avec l'air (figure III.4). L'impédance de l'air $Z_0 = Z_{j-1} = Z_{j+1} = 377\Omega$ est largement supérieure à l'impédance de la couche Z_j .

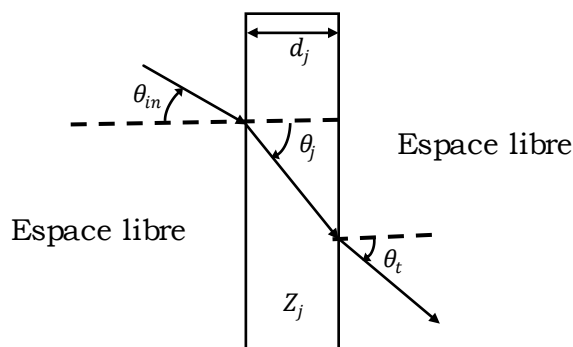


Figure III.4: Propagation d'une onde électromagnétique dans un bon conducteur.

Le coefficient de transmission donné par la relation (III.30) s'écrit:

$$T = \frac{2Z_0}{(M_{11}Z_0 - M_{12}) + Z_0(M_{22} - Z_0M_{21})} \quad (\text{III. 36})$$

Du fait que $M_{11} = M_{22}$ et $Z_0^2M_{21} \gg M_{12}$, nous pouvons écrire que:

$$T = -\frac{2}{Z_0M_{21}} \quad (\text{III. 37})$$

Ainsi l'efficacité du blindage, en utilisant la relation (II.8) s'écrit:

$$SE = 20\log \left| \frac{Z_0 \sinh(ik_j d_j)}{2Z_j} \right| \quad (\text{III. 38})$$

ou encore:

$$SE(dB) = 20\log \left| \frac{Z_0}{4Z_j} \right| + 20\log |2\sinh(ik_j d_j)| \quad (\text{III. 39})$$

où l'atténuation par réflexion $R(dB)$ et la perte par absorption $A(dB)$ additionnées à l'atténuation par réflexions internes multiples $B(dB)$ sont, respectivement, données par:

$$R(dB) = 20\log \left| \frac{Z_0}{4Z_j} \right| \quad (\text{III. 40})$$

et

$$A(dB) + B(dB) = 20\log |2\sinh(ik_j d_j)| \quad (\text{III. 41})$$

Le terme $B(dB)$ est souvent négligeable par rapport à $R(dB)$ et $A(dB)$, en particulier dans la gamme de hautes fréquences [19].

2.1.2. En champ proche

Dans le chapitre II, il a été rapporté la possibilité d'établir la relation de l'efficacité du blindage en champ proche en remplaçant l'impédance d'onde dans l'air en champ lointain ($Z_0 = 377 \Omega$) par l'impédance suivant le type de source: électrique Z_E ou magnétique Z_M données dans le tableau II.1. En négligeant l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption est décrite par la même formule établie en champ lointain (relation (III.41)). L'atténuation par réflexion et, par conséquent, l'efficacité du blindage électromagnétique s'obtiennent comme suit:

a- Cas d'une source électrique

$$R(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_E}{4Z_j} \right| \quad (\text{III. 42})$$

$$SE = 20 \log \left| \frac{Z_E \sinh(ik_j d_j)}{2Z_j} \right| \quad (\text{III. 43})$$

avec $Z_E = 377 \frac{\lambda}{2\pi r}$

b- Cas d'une source magnétique

$$R(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_M}{4Z_j} \right| \quad (\text{III. 44})$$

$$SE = 20 \log \left| \frac{Z_M \sinh(ik_j d_j)}{2Z_j} \right| \quad (\text{III. 45})$$

avec $Z_M = 377 \frac{2\pi r}{\lambda}$

2.2. Blindage multicouche

En premier lieu, nous entamons l'étude du blindage électromagnétique multicouche à base de matériaux bons conducteurs dans la zone des champs lointains, en deuxième lieu, nous abordons celle de la zone des champs proches.

2.2.1. En champ lointain

Soit un blindage multicouche réalisé à base de matériaux bons conducteurs en contact avec l'air ($Z_0 = Z_{n+1} = 377 \Omega$). Nous considérons que l'atténuation par réflexions internes multiples est négligeable devant l'atténuation par réflexion et la perte par absorption et que $Z_0 \gg Z_1$, Z_1 étant l'impédance de la première couche. La relation (II.63) donnant l'efficacité du blindage, s'écrit alors:

$$SE = 20 \log \left| \frac{Z_0}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{III. 46})$$

où l'atténuation par réflexion $R(dB)$ et la perte par absorption $A(dB)$ sont, respectivement, données par:

$$R(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_0}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \left[\frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \right] \right| \quad (\text{III. 47})$$

$$A(dB) = 20 \log \left| \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{III. 48})$$

2.2.2. En champ proche

L'étude du blindage électromagnétique multicouche à base de matériaux bons conducteurs en champ proche s'effectue en remplaçant l'impédance d'onde dans l'air en champ lointain ($Z_0 = 377 \Omega$) par les impédances suivant le type de source: électrique Z_E ou magnétique Z_M . Par conséquent, l'atténuation par réflexion et par conséquent l'efficacité du blindage ont pour expressions:

a- Cas d'une source électrique

$$R(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_E}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \left[\frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \right] \right| \quad (\text{III. 49})$$

$$SE = 20 \log \left| \frac{Z_E}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{III. 50})$$

b- Cas d'une source magnétique

$$R(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_M}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \left[\frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \right] \right| \quad (\text{III. 51})$$

$$SE = 20 \log \left| \frac{Z_M}{2^{n+1} Z_1} \prod_{j=2}^n \frac{(Z_j + Z_{j-1})}{Z_j} \prod_{j=1}^n e^{ik_j d_j} \right| \quad (\text{III. 52})$$

3. EQUIVALENCE ENTRE LE BLINDAGE MONOCOUCHE ET LE BLINDAGE MULTICOUCHE

La figure III.5 décrit l'équivalence entre un blindage monocouche et un blindage multicouche à base de matériaux bons conducteurs en contact avec l'air. L'onde électromagnétique percute la première interface avec une incidence oblique.

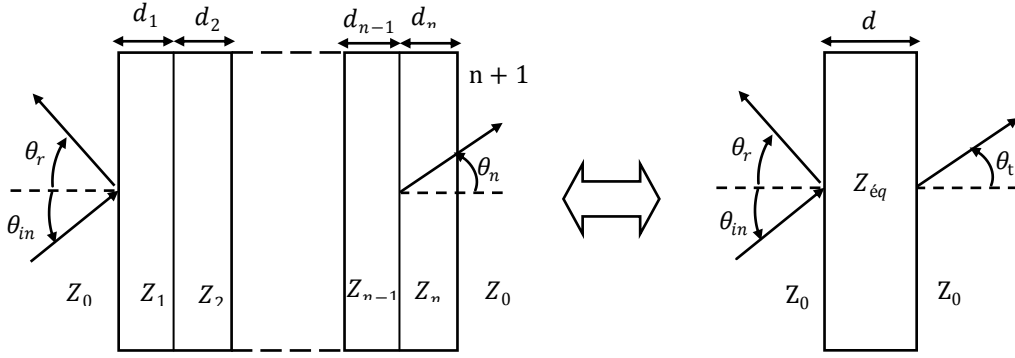


Figure III.5: Equivalence entre le blindage mono et multicouche.

Nous remplaçons le blindage multicouche par un blindage équivalent. Ceci nous a permis d'introduire une impédance équivalente $Z_{\text{éq}}$ et un vecteur d'onde équivalent $k_{\text{éq}}$. L'égalité entre les relations (III.40) et (III.47) donne:

$$Z_{\text{équivalente}} = 2^{n-1}(1+i) \left(\frac{\mu_1 \omega}{2\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}} \prod_{j=2}^n \left[1 + \left(\frac{\sigma_j \mu_{j-1}}{\sigma_{j-1} \mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (\text{III. 53})$$

La relation (III.53) peut être simplifiée si le matériau utilisé en blindage électromagnétique est non magnétique ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_0$, où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{kg.m.A}^{-2}.\text{s}^{-2}$) et se réduit à:

$$Z_{\text{équivalente}} = 2^{n-1}(1+i) \left(\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}} \prod_{j=2}^n \left[1 + \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (\text{III. 54})$$

Finalement, l'atténuation par réflexion et l'efficacité du blindage d'une structure multicouche construite à base de bons conducteurs en contact avec l'air seront calculées en utilisant, respectivement, les relations (III.40) et (III.38), dans les deux zones de champs; proche et lointain, tel que:

- En champ lointain

$$R(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_0}{4Z_{\text{éq}}} \right| \quad (\text{III. 55})$$

$$SE(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_0}{2Z_{\text{éq}}} \sinh(idk_{\text{éq}}) \right| \quad (\text{III. 56})$$

où

$$dk_{\acute{e}q} = \sum_{j=1}^n d_j k_j \quad (\text{III. 57})$$

- En champ proche

a- Cas d'une source électrique

$$R(dB) = 20\log \left| \frac{Z_E}{4Z_{\acute{e}q}} \right| \quad (\text{III. 58})$$

$$SE(dB) = 20\log \left| \frac{Z_E}{2Z_{\acute{e}q}} \sinh(idk_{\acute{e}q}) \right| \quad (\text{III. 59})$$

b- Cas d'une source magnétique

$$R(dB) = 20\log \left| \frac{Z_M}{4Z_{\acute{e}q}} \right| \quad (\text{III. 60})$$

$$SE(dB) = 20\log \left| \frac{Z_M}{2Z_{\acute{e}q}} \sinh(idk_{\acute{e}q}) \right| \quad (\text{III. 61})$$

4. APPLICATIONS

Dans cette section, les effets de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence sur l'atténuation par réflexion, la perte par l'absorption et l'efficacité du blindage sont analysés pour les deux types de blindage; simple et multicouche. L'étude est effectuée en considérant que l'épaisseur du blindage multicouche est égale à celui du blindage monocouche. Les matériaux de blindage choisis pour la combinaison avec le polymère conducteur ((Polyaniline + Acide Camphre Sulfonique)–polyuréthane (PANI44/PU) [20]) sont le nickel et l'aluminium. Les valeurs de la conductivité électrique, de la perméabilité relative et de l'épaisseur des matériaux considérés sont listées dans le tableau III.1.

MATERIAU	CONDUCTIVITE (S.m ⁻¹)	PERMEABILITE RELATIVE	EPAISSEUR (mm)
(PANI44/PU) [20]	1,15 10 ⁴	1	0,3 (monocouche)
			0,1 (multicouche)
ALUMINUM (Al)	3,538 10 ⁷	1	0,1
NICKEL (Ni)	1,16 10 ⁷	100	0,1

Tableau III.1: Caractéristiques des matériaux sectionnés pour le blindage électromagnétique.

4.1. Atténuation par réflexion

Nous analysons l'atténuation par réflexion, dans les deux zones de champs; proche et lointain, en fonction de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence.

4.1.1. En champ lointain

a- Effet de l'angle d'incidence

Sur la figure III.6, nous avons tracé l'atténuation par réflexion en champ lointain de: (a) une couche de (PANI 44/PU) et (b) une structure multicouche composée de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de l'angle d'incidence pour une polarisation électrique et une polarisation magnétique, en utilisant l'équation (III.40) pour le blindage simple et l'équation (III.56) pour le blindage multicouche.

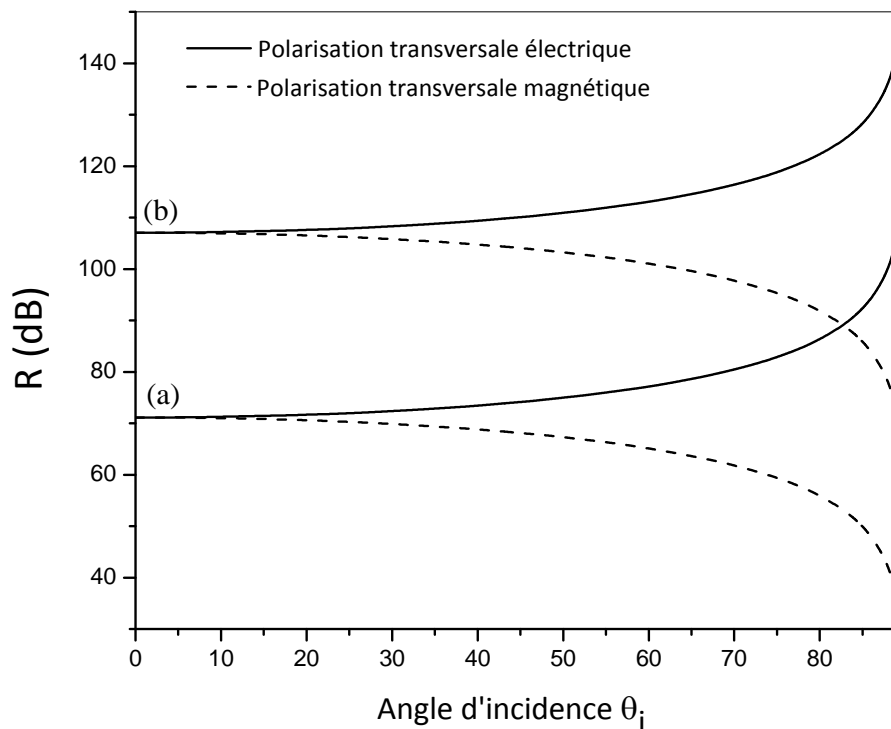


Figure III.6: Atténuation par réflexion en champ lointain de: (a) PANI44/PU et (b) (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence.

L'atténuation par réflexion est pratiquement indépendantes de l'angle d'incidence à partir d'une incidence normale (0°) jusqu'à (30°); en dessus de

cet angle la réflexion accroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence pour une polarisation transversale électrique et décroît pour polarisation transversale magnétique. Ceci peut être expliqué par l'accroissement de la valeur de l'impédance en cas de polarisation transversale électrique avec l'augmentation de l'angle d'incidence, ce qui renforce la désadaptation d'impédance entre le milieu de propagation de l'onde et la barrière de blindage, ainsi l'atténuation par réflexion sera plus importante.

b- Effet de la fréquence

L'atténuation par réflexion en champ lointain d'une structure multicouche à base de (Ni – PANI44/PU – Al) est représentée, en utilisant l'équation (III.55), sur la figure III.7 en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique à des incidences normale (0°) et oblique (45° et 80°). Du fait que l'impédance intrinsèque est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique, l'atténuation par réflexion décroît considérablement avec l'augmentation de la fréquence.

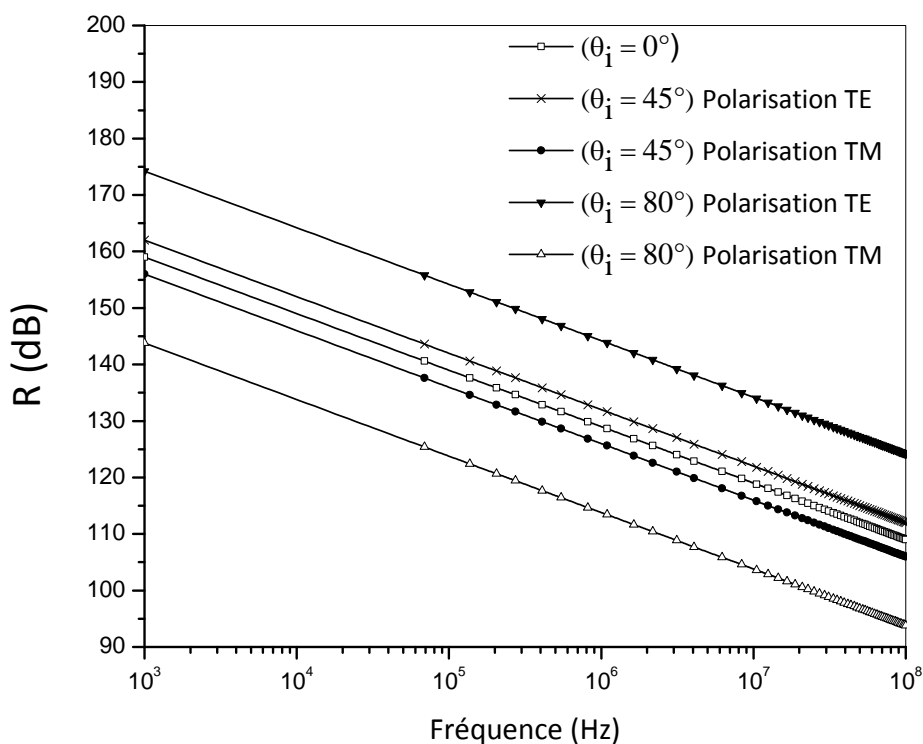


Figure III.7: Atténuation par réflexion en champ lointain de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

4.1.2. En champ proche

a- Effet de l'angle d'incidence

Les figures III.8 et III.9 illustrent, respectivement, l'atténuation par réflexion en champ proche d'un blindage monocouche à base de Pani44/PU et d'un blindage multicouche composé de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de l'angle d'incidence pour une polarisation électrique et une polarisation magnétique, en utilisant, pour le blindage simple, les équations (III.42) s'il s'agit d'une source électrique et (III.44) s'il s'agit d'une source magnétique et, pour le blindage multicouche, les équations (III.58) s'il s'agit d'une source électrique et (III.60) s'il s'agit d'une source magnétique.

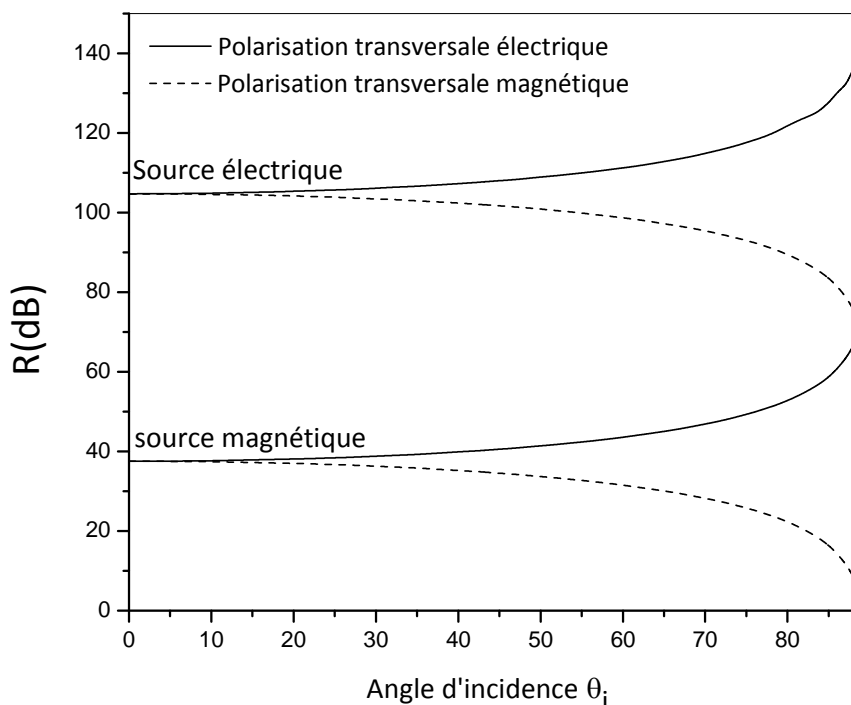


Figure III.8: Atténuation par réflexion en champ proche de PANI44/PU à 1 MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source.

L'allure de l'atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence en cas de champ proche est similaire à celle de champ lointain i.e une augmentation de l'angle d'incidence induit un accroissement de la réflexion pour une polarisation transversale électrique et une décroissance pour une polarisation transversale magnétique. L'atténuation par réflexion est plus

importante pour une source électrique en champ proche que pour une source magnétique car l'impédance d'onde est bien plus élevée pour les champs électriques.

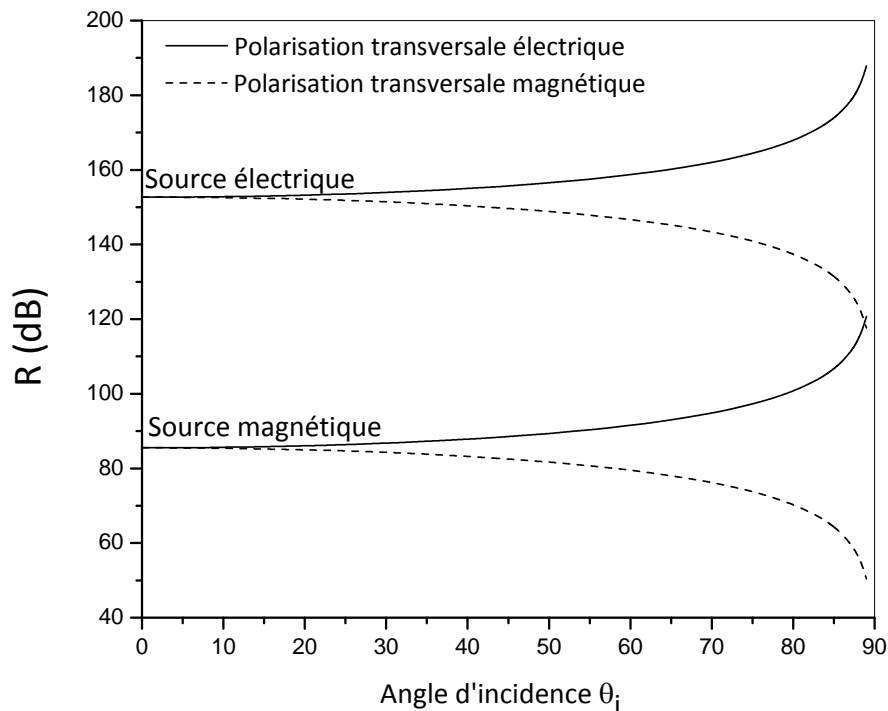


Figure III.9: Atténuation par réflexion en champ proche de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source.

b- Effet de la fréquence

En champ proche, les variations, en fonction de la fréquence, de l'atténuation par réflexion d'un blindage tricouche (Ni – PANI44/PU – Al) sont représentées sur la figure III.10 pour une source électrique et sur la figure III.11 pour une source magnétique. La courbe de la figure III.10 est tracée en utilisant l'équation (III.58), tandis que celle de la figure III.11 en utilisant l'équation (III.60). Pour une source électrique et comme l'impédance de l'onde électromagnétique générée par cette source est inversement proportionnelle à la fréquence, l'atténuation par réflexion diminue avec le croisement de la fréquence. En revanche, pour une source magnétique, l'impédance générée est proportionnelle à la fréquence, de ce fait, l'atténuation par réflexion accroît avec l'augmentation de la fréquence.

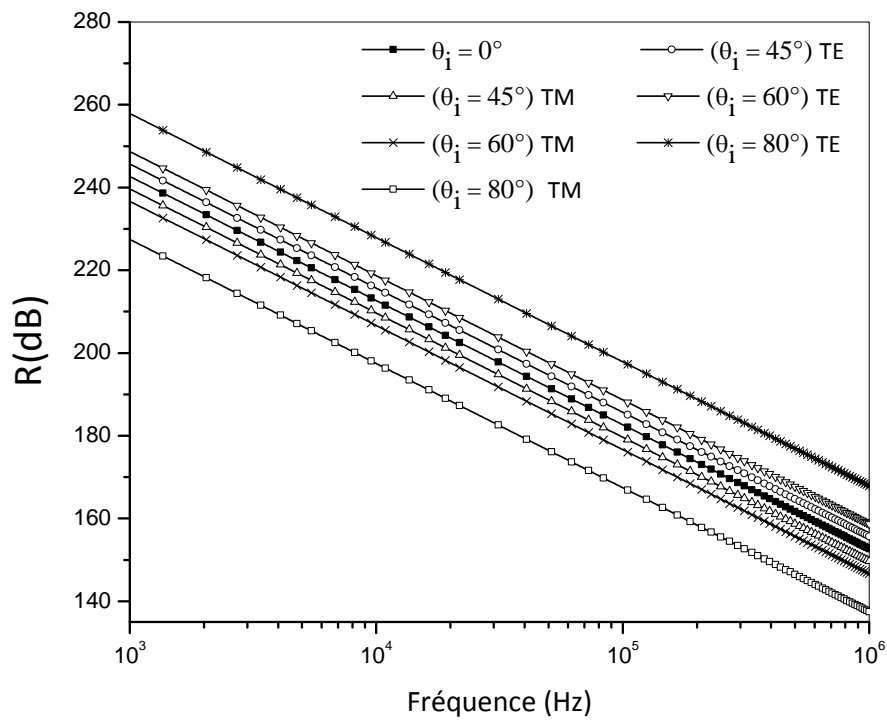


Figure III.10: Atténuation par réflexion pour un champ électrique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

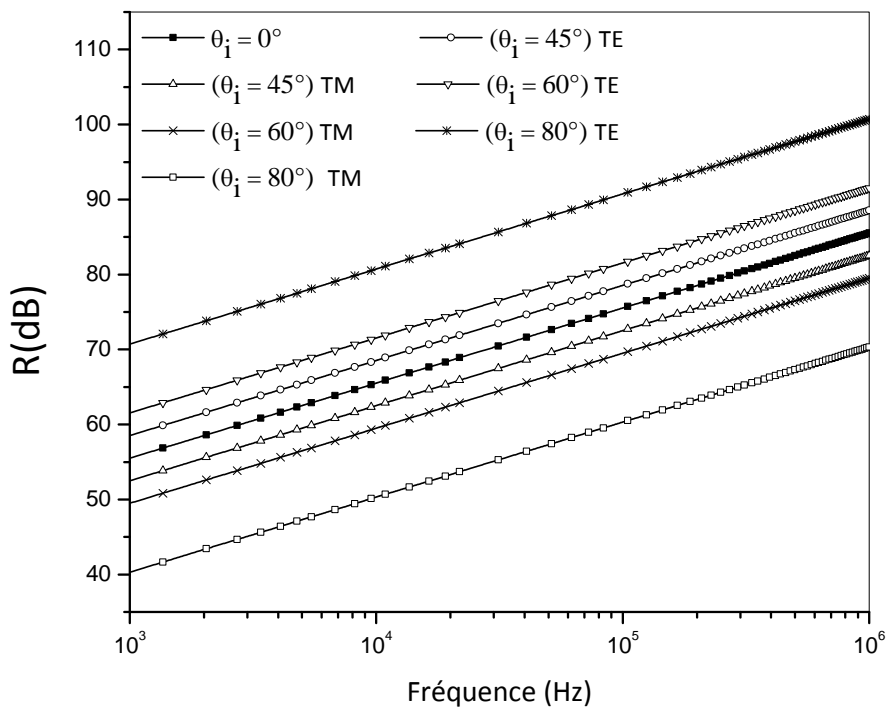


Figure III.11: Atténuation par réflexion pour un champ magnétique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

4.2. Perte par absorption

Comme nous l'avons rapporté dans le chapitre II, la perte par absorption à travers un blindage électromagnétique est basée sur la valeur de la fréquence de l'onde électromagnétique ou encore sur la connaissance de l'épaisseur de peau. L'expression que nous avons obtenue de la perte par absorption confirme sa forte dépendance avec les caractéristiques des matériaux utilisés en blindage électromagnétique (épaisseur, conductivité électrique, perméabilité magnétique et permittivité électrique).

Pour connaître l'effet de l'angle d'incidence et de la polarisation sur la perte par absorption, nous avons représenté sur les figures III.12 et III.13, respectivement, la perte par absorption d'un blindage monocouche à base de polymère conducteur (PANI44/PU) et d'un blindage multicouche construit de (Ni – PANI44/PU – Al).

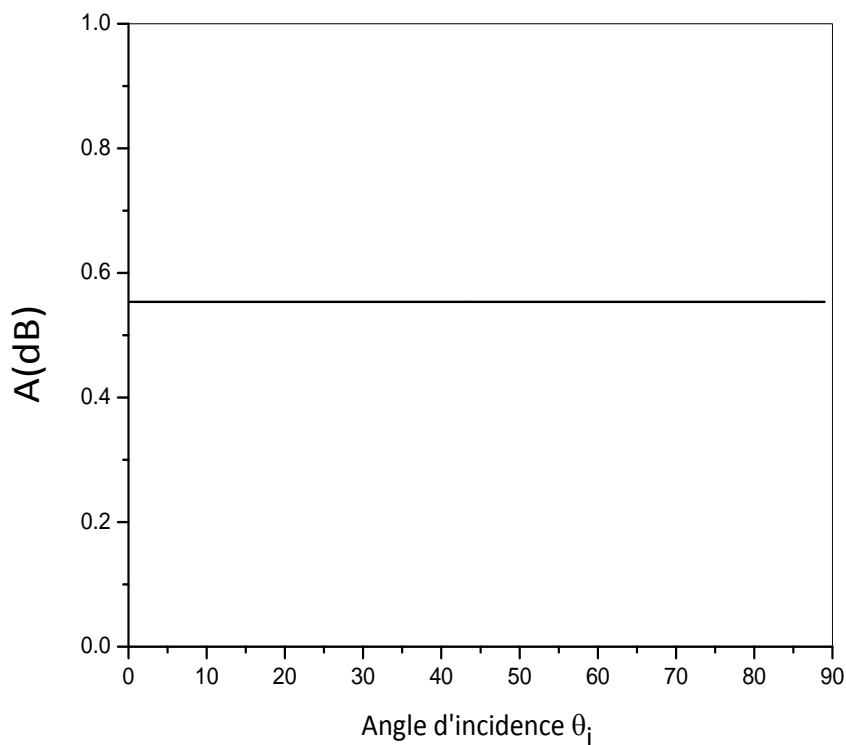


Figure III.12: Perte par absorption de PANI44/PU à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence.

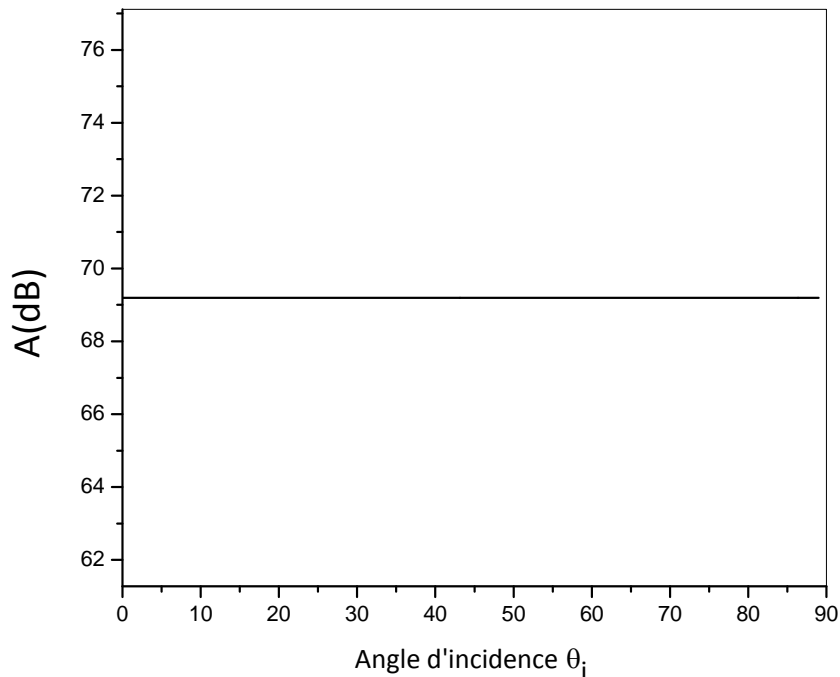


Figure III.13: Perte par absorption de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence.

Les deux courbes ont été tracées en utilisant l'équation (III.48). Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre II, la variation de l'angle d'incidence et le type de champ (proche ou lointain) engendre un impact sur l'impédance du milieu de propagation de l'onde électromagnétique. La perte par absorption est indépendante de cette impédance. De ce fait, l'angle d'incidence et le type de champ ne fournit aucun effet sur la perte par absorption.

4.3. Efficacité du blindage

Nous examinons l'efficacité du blindage, en utilisant des expressions que nous avons obtenues, en fonction de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence, dans les deux zones de champs; proche (source électrique ou magnétique) et lointain

4.3.1. En champ lointain

a- Effet de l'angle d'incidence

La figure III.14 illustre la variation de l'efficacité du blindage électromagnétique en fonction de l'angle d'incidence pour polarisations électrique et magnétique. La courbe (a), tracée en utilisant l'équation (III.38), représente l'efficacité de (PANI44/PU), tandis que la courbe (b), tracée en utilisant l'équation (III.56), représente l'efficacité de (Ni – PANI44/PU – Al).

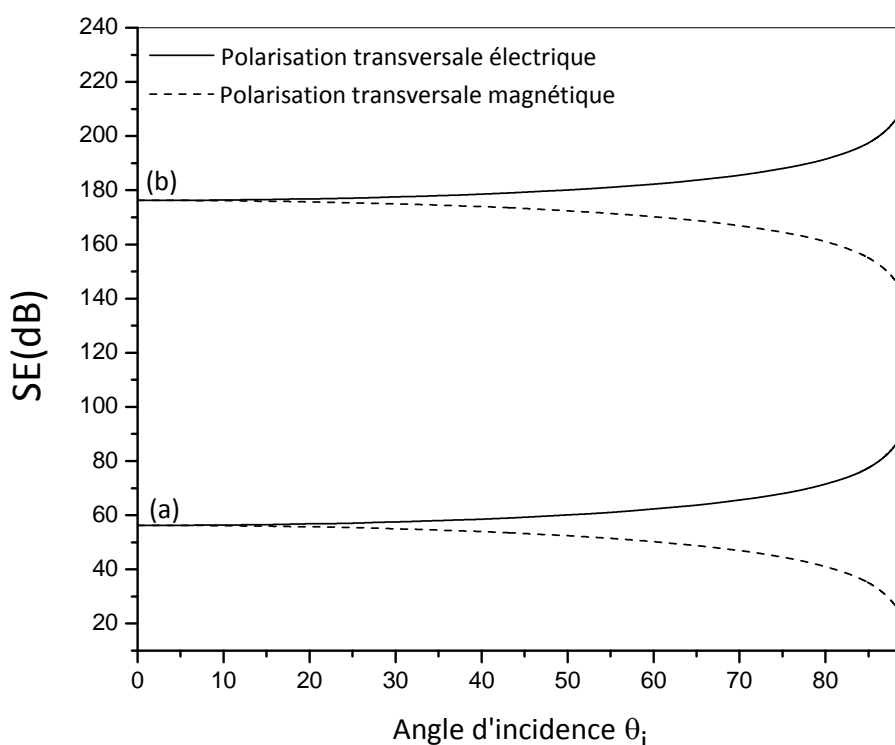


Figure III.14: Variation de l'efficacité du blindage en champ lointain de: (a) PANI44/PU et (b) (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence.

L'efficacité du blindage est pratiquement indépendante de l'angle d'incidence pour une incidence variant de (0°) jusqu'à (30°); à partir de cet angle, elle accroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence pour une polarisation transversale électrique et décroît pour une polarisation transversale magnétique. L'accroissement de la valeur de l'impédance en cas de polarisation transversale électrique avec l'augmentation de l'angle d'incidence est à l'origine de cet accroissement de l'efficacité du blindage.

b- Effet de la fréquence

La variation de l'efficacité du blindage en champ lointain d'une structure multicouche composée de (Ni – PANI44/PU – Al) est illustrée, en utilisant l'équation (III.56), sur la figure III.15 en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique à une incidence normale (0°) et des incidences obliques (45° et 80°).

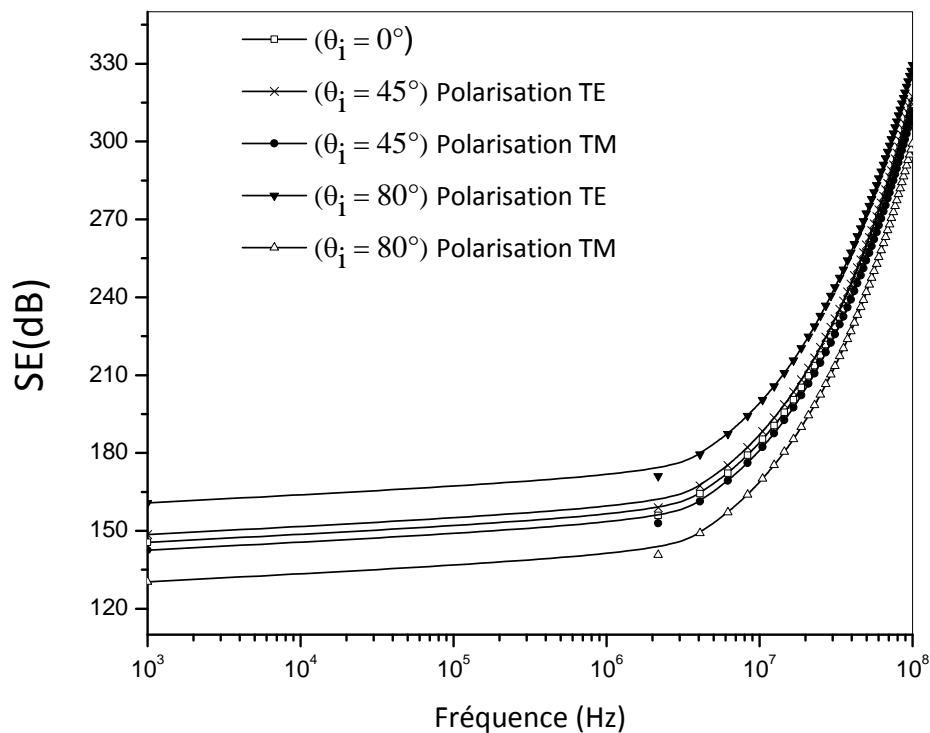


Figure III.15: Variation de l'efficacité du blindage en champ lointain de (Ni – PANI 44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

L'efficacité du blindage est indépendante de la fréquence jusqu'à une certaine fréquence limite, en dépassant cette limite, l'efficacité du blindage est d'autant plus importante que la fréquence est plus élevée (plus de détails concernant cette limite sont donnés dans la deuxième partie de ce chapitre).

4.3.2. En champ proche

a- Effet de l'angle d'incidence

Sur les figures III.16 et III.17, nous avons représenté les variations de l'efficacité du blindage en champ proche, respectivement, de PANI44/PU et d'une structure multicouche construite de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de l'angle d'incidence pour une polarisation électrique et magnétique. Les deux courbes ont été tracées en utilisant, pour le blindage simple, les équations (III.43) s'il s'agit d'une source électrique et (III.45) s'il s'agit d'une source magnétique et, pour le blindage multicouche, les équations (III.59) s'il s'agit d'une source électrique et (III.61) s'il s'agit d'une source magnétique.

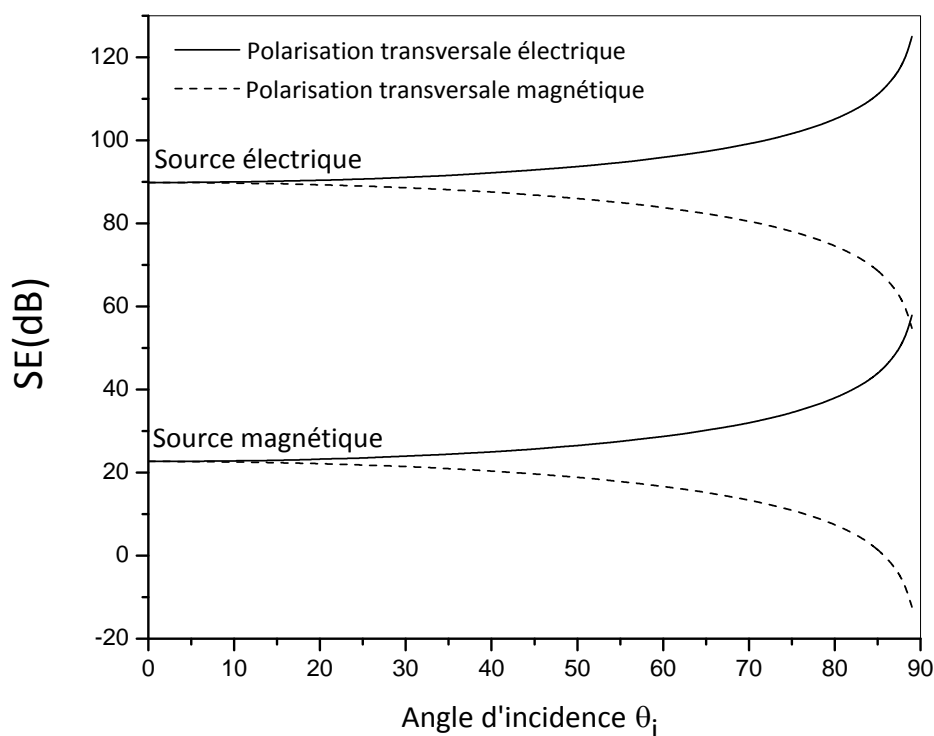


Figure III.16: Variation de l'efficacité du blindage en champ proche de PANI44/PU à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source.

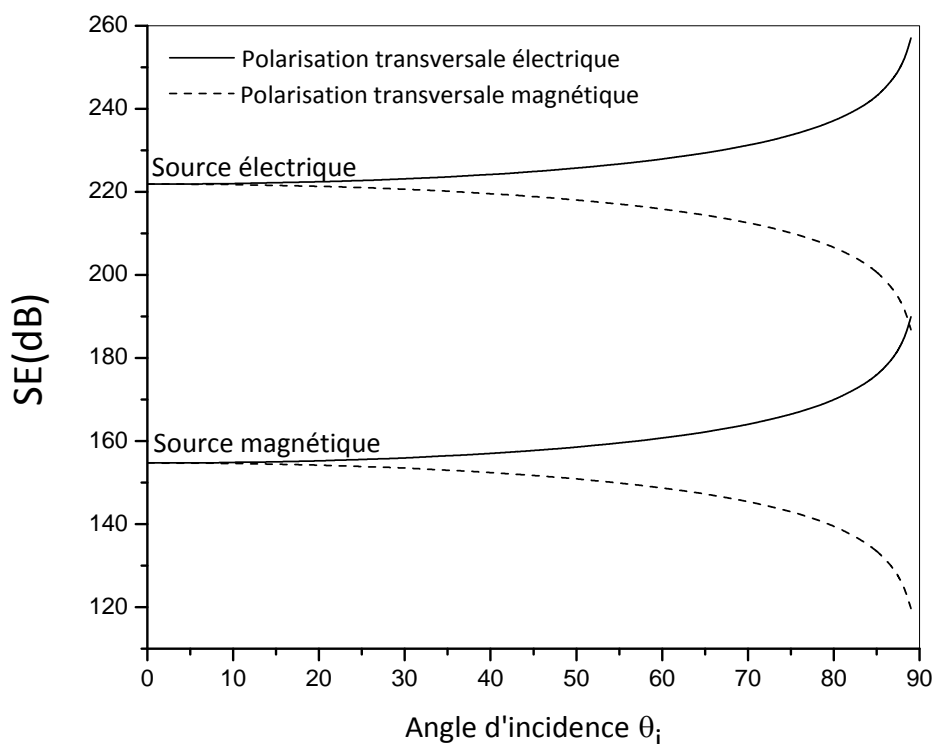


Figure III.17: Variation de l'efficacité du blindage en champ proche de (Ni – PANI44/PU – Al) à 1MHz en fonction de l'angle d'incidence à une distance $r = 1m$ de la source.

En fonction de l'angle d'incidence, l'allure de l'efficacité du blindage en cas de champ proche est identique à celle de champ lointain i.e une augmentation de l'angle d'incidence induit un accroissement de l'efficacité du blindage pour une polarisation transversale électrique et une décroissance pour une polarisation transversale magnétique. Cependant, l'efficacité du blindage en champ proche pour une source électrique est plus importante que celle obtenue pour une source magnétique car l'impédance d'onde est bien plus élevée pour les champs électriques.

b- Effet de la fréquence

Les variations de l'efficacité du blindage d'une structure multicouche à base de (Ni – PANI44/PU – Al) en champ proche est représentée, en fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique à des incidences normale (0°) et obliques (45° , 60° et 80°), sur la figure III.18 pour une source électrique et sur la figure III.19 pour une source magnétique.

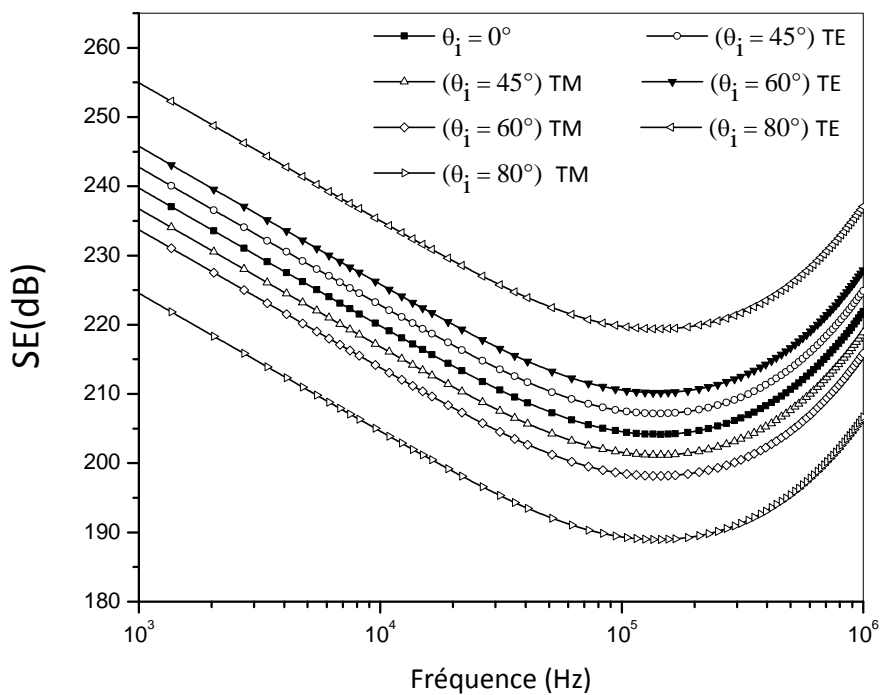


Figure III.18: Efficacité du blindage pour un champ électrique situé à $r = 1m$ de (Ni- PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

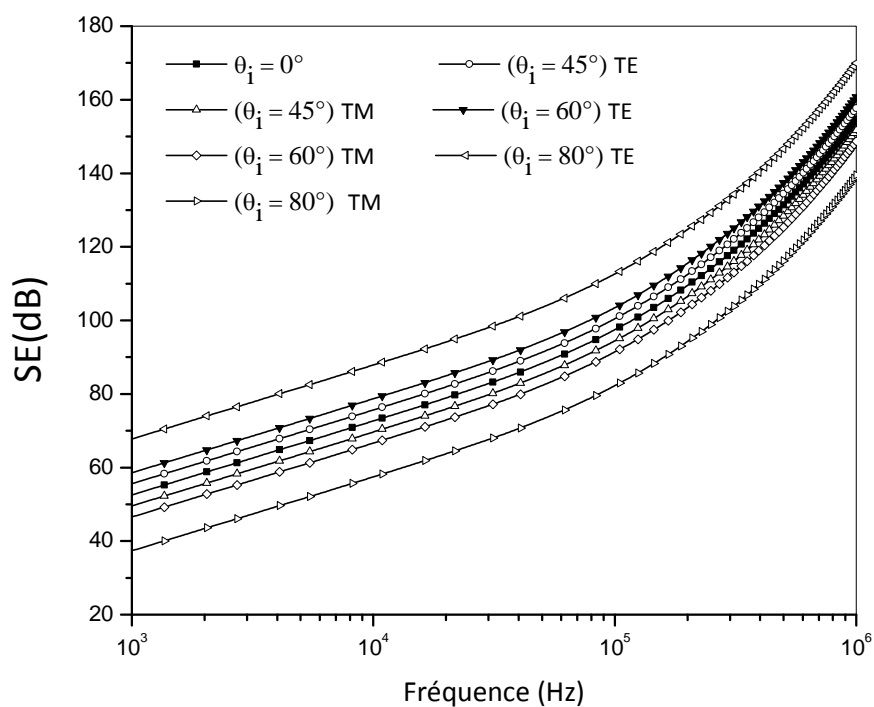


Figure III.19: Efficacité du blindage pour un champ magnétique situé à $r = 1m$ de (Ni – PANI44/PU – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

En champ lointain, l'atténuation par réflexion est prédominante en basse fréquence, tandis que la perte par absorption est prédominante en fréquences élevées. En champ proche et pour une source électrique, la situation ne change pas. En revanche, pour une source magnétique la situation est différente: en basse fréquence, l'atténuation par réflexion et la perte par absorption sont faibles, alors qu'avec l'augmentation de la fréquence, l'absorption tend à dominer.

Deuxième Partie:

Formalisme matriciel de la ligne de transmission: Cas des matériaux bons conducteurs électriquement minces et électriquement épais.

Lors du contact d'une onde électromagnétique avec un blindage multicouche, le calcul de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption, l'atténuation par réflexions internes multiples et de l'efficacité du blindage en utilisant le formalisme matriciel est fastidieux et aboutit à des expressions compliquées. Dans ce contexte, cette partie propose une simplification mathématique de ce formalisme. Nous considérons deux étapes d'approximation; la première représente l'approximation classique d'un matériau bon conducteur ($\sigma \gg \omega\epsilon$) et la deuxième, correspond aux échantillons électriquement minces (épaisseur inférieure à l'épaisseur de peau) et échantillons électriquement épais (épaisseur plus grande que l'épaisseur de peau). Cette dernière approximation, qui a été utilisée par Colaneri et Shacklette [21], repose sur la définition de deux intervalles de variation de la fréquence; basses et hautes fréquences par rapport à une fréquence appelée, fréquence de coupure f_c , qui correspond à l'égalité entre l'épaisseur d_j de la couche et son épaisseur de peau δ_j , défini par:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sigma_j\mu_j d_j^2} \quad (\text{III. 62})$$

Si la fréquence de l'onde électromagnétique est supérieure à la fréquence de blindage, alors le vecteur d'onde est réel, l'onde se propage dans le blindage. Dans le cas contraire, le vecteur d'onde est imaginaire, donc on assiste à un amortissement exponentiel. La fréquence de blindage agit donc comme une fréquence de coupure. Physiquement, cela signifie que lorsque la fréquence de l'onde est suffisamment faible, le blindage a le temps de réagir et de se réorganiser de façon à neutraliser la perturbation, ainsi, en dessous de f_c il n'y a pas de propagation.

L'impédance intrinsèque et le vecteur d'onde dans une couche conductrice j en fonction de δ_j s'écrivent respectivement [22]:

$$Z_j = \frac{(1 + i)}{\sigma_j \delta_j} \quad (\text{III. 63})$$

$$k_j = \frac{(1 - i)}{\delta_j} \quad (\text{III. 64})$$

Par suite, la matrice associée à la couche j , donnée par l'expression (III.14), prend la forme suivante [10, 19]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & -Z_j \sinh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \\ -\frac{1}{Z_j} \sinh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 65})$$

ou encore

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & -Z_j \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \\ -\frac{1}{Z_j} \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & 1 \end{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 66})$$

1. PREMIERE APPROXIMATION: FORMALISME MATRICIEL POUR UN BON CONDUCTEUR

Dans une première étape, nous allons simplifier la matrice caractéristique d'un blindage monocouche et multicouche obtenu à base de matériaux bons conducteurs. L'expression du coefficient de transmission pour les deux types de blindage sera établie.

1.1. Blindage simple (monocouche)

Quand la couche est un matériau bon conducteur ($\sigma \gg \omega\epsilon$), son impédance tend vers zéro. De ce fait, l'élément $Z_j \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right)$ peut être négligé relativement aux autres éléments et la matrice devient:

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_j} \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & 1 \end{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 67})$$

Par suite, le coefficient de transmission, donné par l'expression (III.30), d'une seule couche j en contact avec l'air, $Z_{j-1} = Z_{j+1} = Z_0 = 377\Omega$, s'écrit:

$$\frac{1}{T} = \left[1 + \frac{Z_0}{2Z_j} \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \right] \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 68})$$

1.2. Blindage multicouche

La matrice caractéristique d'une structure à n couches représente le produit des matrices de chaque couche, donc:

$$M = \prod_{j=1}^n M_j = \prod_{j=1}^n \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_j} \tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) & 1 \end{bmatrix} \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 69})$$

Un simple calcul de produit matriciel mène à:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\sum_{j=1}^n \frac{\tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{Z_j} & 1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^n \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 70})$$

Par conséquent, le coefficient de transmission, donné par l'expression (III.30), d'une structure à n couches en contact avec l'air, $Z_{j-1} = Z_{j+1} = Z_0 = 377\Omega$, s'écrit:

$$\frac{1}{T} = \left[1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\tanh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{Z_j} \right] \prod_{j=1}^n \cosh\left((1-i)\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III. 71})$$

2. DEUXIEME APPROXIMATION: MATERIAUX ELECTRIQUEMENT MINCES ET MATERIAUX ELECTRIQUEMENT EPAIS

La deuxième étape d'approximation consiste à considérer deux types de matériaux: électriquement minces; correspond au cas où l'épaisseur de la couche est inférieure à l'épaisseur de peau et électriquement épais; correspond au cas où l'épaisseur de la couche est plus grande que l'épaisseur de peau. Ainsi l'expression de la matrice caractéristique a deux limites d'intérêt qui peuvent être prises comme des approximations acceptables, selon que la fréquence est inférieure ($d \ll \delta$) ou supérieure ($d \gg \delta$) à la fréquence de coupure f_c . Cette approximation a été utilisée par Colaneri et Shaklette pour déterminer l'efficacité du blindage d'un matériau composite bon conducteur [21, 23].

2.1. Blindage simple (monocouche)

Soit un blindage électromagnétique simple (monocouche) à base matériau bon conducteur. Considérant les deux cas: cas où ce matériau est électriquement mince et cas où il est électriquement épais.

2.1.1. Matériau électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$)

A des fréquences inférieures à f_c , la matrice de la couche conductrice j , donnée par l'expression (III.68), se réduit à:

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (1-i)\frac{d_j}{\delta_j} & 1 \\ -\frac{Z_j}{Z_0} & 1 \end{bmatrix} \exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III.72})$$

et le coefficient de transmission, donné par l'expression (III.68), devient:

$$\frac{1}{T} = \left(1 + \frac{Z_0(1-i)\frac{d_j}{\delta_j}}{2Z_j}\right) \exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (\text{III.73})$$

En utilisant la relation (II.8), l'expression de l'efficacité du blindage devient:

$$SE = \underbrace{8.66\frac{d_j}{\delta_j}}_{A(\text{dB})} + \underbrace{20\log\left(1 + \frac{Z_0\sigma_j d_j}{2}\right)}_{R(\text{dB})+B(\text{dB})} \quad (\text{III.74})$$

Comme la perte par absorption est proportionnelle à l'épaisseur du blindage et est dépend de la conductivité σ_j et de la perméabilité μ_j [23] et par identification avec la relation (II.10), nous pouvons conclure que le premier terme dans la relation (III.74) représente la perte par absorption $A(\text{dB})$ alors que le second est une somme de l'atténuation par réflexion $R(\text{dB})$ et l'atténuation par réflexions internes multiples $B(\text{dB})$.

2.1.2. Matériau électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$)

A des fréquences supérieures à f_c , la matrice de la couche conductrice j donnée par la relation (III.67), se simplifie comme suit:

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_j} & 1 \end{bmatrix} \frac{\exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{2} \quad (\text{III.75})$$

Ainsi le coefficient de transmission, donné par la relation (III.68), se réduit à:

$$\frac{1}{T} = \left[1 + \frac{Z_0}{2Z_j} \right] \frac{\exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{2} \quad (\text{III.76})$$

Quand la fréquence est plus importante que f_c , l'atténuation par réflexions internes multiples peut être généralement négligée en comparaison avec l'atténuation par réflexion et la perte par absorption en raison de la haute perte de pénétration à l'intérieur du matériau du blindage [19]. Par conséquent, dans ce domaine de fréquence, l'efficacité du blindage représente la somme de la perte par absorption $A(\text{dB})$ et de l'atténuation par réflexion $R(\text{dB})$, donnée par:

$$SE = \underbrace{8.66 \frac{d_j}{\delta_j}}_{A(\text{dB})} + \underbrace{20 \log \left(1 + \frac{Z_0 \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}}}{10} \right)}_{R(\text{dB})} \quad (\text{III.77})$$

Par suite, les expressions de l'atténuation par réflexion et de la perte par absorption dans les deux intervalles de variation de la fréquence ($f \ll f_c$ et $f \gg f_c$) sont identiques. Une simple comparaison entre les expressions (III.74) et (III.77), aboutit à l'expression de l'atténuation par réflexions internes multiples. Les trois quantités ($R(\text{dB})$, $A(\text{dB})$ et $B(\text{dB})$) s'écrivent respectivement:

$$R(\text{dB}) = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0 \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}}}{10} \right) \quad (\text{III.78})$$

$$A(\text{dB}) = 8.66 \frac{d_j}{\delta_j} \quad (\text{III.79})$$

et

$$B(\text{dB}) = 20 \log \left[\frac{1 + \frac{Z_0}{2} \sigma_j d_j}{1 + \frac{Z_0}{10} \sqrt{\frac{\sigma_j}{f \mu_j}}} \right] \quad (\text{III.80})$$

2.2. Blindage multicouche

Maintenant, généralisons les expressions de l'atténuation par réflexion, de l'atténuation par réflexions internes multiples, de la perte par absorption et de l'efficacité du blindage obtenues pour une seule couche, à n couches

conductrices dans les deux intervalles de variation de la fréquence: $f \ll f_c$ et $f \gg f_c$.

2.2.1. Matériau électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$)

Dans le cas où l'épaisseur du blindage est faible devant l'épaisseur de peau i.e $f \ll f_c$, la matrice caractéristique d'une structure à n couches, donnée par l'expression (III.70), devient:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{j=1}^n \frac{(1-i)\frac{d_j}{\delta_j}}{Z_j} & 1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^n \exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (III.81)$$

ou encore, avec l'utilisation de l'expression (III.63), l'expression (III.81) s'écrit:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{j=1}^n \sigma_j d_j & 1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^n \exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (III.82)$$

De ce fait, le coefficient de transmission, donné par la relation (III.71), d'une structure à n couches en contact avec l'air, tel que $Z_{j-1} = Z_{j+1} = Z_0 = 377\Omega$, se réduit à:

$$\frac{1}{T} = \left[1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{j=1}^n \frac{(1-i)\frac{d_j}{\delta_j}}{Z_j} \right] \prod_{j=1}^n \exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right) \quad (III.83)$$

Ainsi, l'efficacité du blindage, en utilisant la relation (II.8), s'écrit:

$$SE = \underbrace{8.66 \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_j}}_{A(dB)} + 20 \log \left(\underbrace{1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{j=1}^n \sigma_j d_j}_{R(dB)+B(dB)} \right) \quad (III.84)$$

La première partie de cette expression représente la perte par absorption, tandis que la seconde représente la somme de l'atténuation par réflexion et de l'atténuation par réflexions internes multiples.

2.2.2. Matériau électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$)

A des fréquences supérieures à f_c , la matrice caractéristique d'une structure à n couches donnée par l'expression (III.70), se réduit à:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_j} & 1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^n \frac{\exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{2} \quad (\text{III. 85})$$

De ce fait, le coefficient de transmission, donné par la relation (III.71), s'écrit:

$$\frac{1}{T} = \left(1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_j} \right) \prod_{j=1}^n \frac{\exp\left(\frac{d_j}{\delta_j}\right)}{2} \quad (\text{III. 86})$$

Par suite, l'efficacité du blindage est donnée par:

$$SE = \underbrace{8.66 \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_j}}_{A(dB)} + \underbrace{20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{2^{n+\frac{3}{2}}} \sum_{j=1}^n \sigma_j \delta_j \right)}_{R(dB)} \quad (\text{III. 87})$$

où

$$R(dB) = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{2^{n+\frac{3}{2}}} \sum_{j=1}^n \sigma_j \delta_j \right) \quad (\text{III. 88})$$

et

$$A(dB) = 8.66 \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_j} \quad (\text{III. 89})$$

Quelque soit le domaine de variation de la fréquence, l'atténuation par réflexion et la perte par absorption sont décrites par les mêmes expressions. Quand $f \ll f_c$, la comparaison entre les relations (III.84) et (III.87) permet d'avoir l'expression de l'atténuation par réflexions internes multiples, donnée par:

$$B(dB) = 20 \log \left[\frac{1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{j=1}^n \sigma_j d_j}{1 + \frac{Z_0}{2^{n+\frac{3}{2}}} \sum_{j=1}^n \sigma_j \delta_j} \right] \quad (\text{III. 90})$$

3. APPLICATIONS

Dans cette section, nous examinons, en utilisant les relations simplifiées que nous avons obtenues, les effets de l'angle d'incidence, de polarisation et de fréquence sur l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage pour les deux types de blindage: mono et multicouche en cas de

matériau électriquement mince et électriquement épais. L'étude est effectuée en considérant que l'épaisseur de la structure multicouche est égale à celui du polymère conducteur utilisé en blindage monocouche. Les matériaux bons conducteurs choisis pour le blindage électromagnétique sont: un composite nanotubes de carbone/polymère (CNTs) [24], le nickel et l'aluminium. Les conductivités électriques, les perméabilités relatives et les épaisseurs des matériaux considérés sont listés dans le tableau III.2.

Matériau	Conductivité (S.m ⁻¹)	Perméabilité relative	Epaisseur (mm)
CNTs [24]	2,2 10 ⁴	1	0,3 (monocouche)
			0,1 (multicouche)
Aluminium (Al)	3,538 10 ⁷	1	0,1
Nickel (Ni)	1,16 10 ⁷	100	0,1

Tableau III.2: Conductivités, perméabilités relatives et épaisseurs des matériaux sectionnés pour le blindage électromagnétique.

Nous considérons que la fréquence de coupure ou l'épaisseur de peau du blindage multicouche sont celles de la première couche, ainsi, et en utilisant la relation (III.63), la fréquence de coupure du blindage composé d'une couche de CNTs est $f_{cs} = 128 \text{ MHz}$, alors que celle du blindage multicouche construit de Nickel – CNTs – Aluminium est $f_{cm} = 21,858 \text{ KHz}$.

3.1. Atténuation par réflexion

Nous avons vu précédemment dans le paragraphe 2 de cette partie, l'atténuation par réflexion évolue selon la même expression, et ce, quelque soit le type de matériau; électriquement mince ($f \ll f_c$) ou électriquement épais ($f \gg f_c$). Ainsi, il s'agit uniquement de connaître l'allure de l'atténuation par réflexion pour ces deux types de matériau. Nous examinons l'atténuation par réflexion, à l'aide des relations que nous avons obtenues, en fonction de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la fréquence.

3.1.1. Effet de l'angle d'incidence

La figure III.20 décrit la dépendance de l'atténuation par réflexion avec l'angle d'incidence et la polarisation en utilisant l'équation (III.78) pour le simple blindage et (III.88) pour le multicouche.

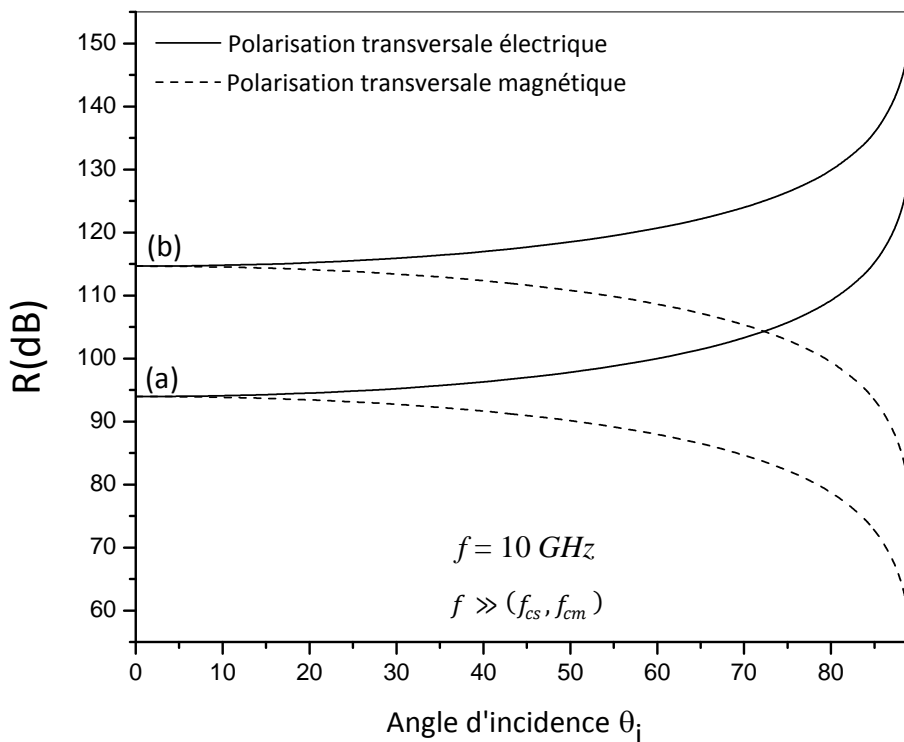
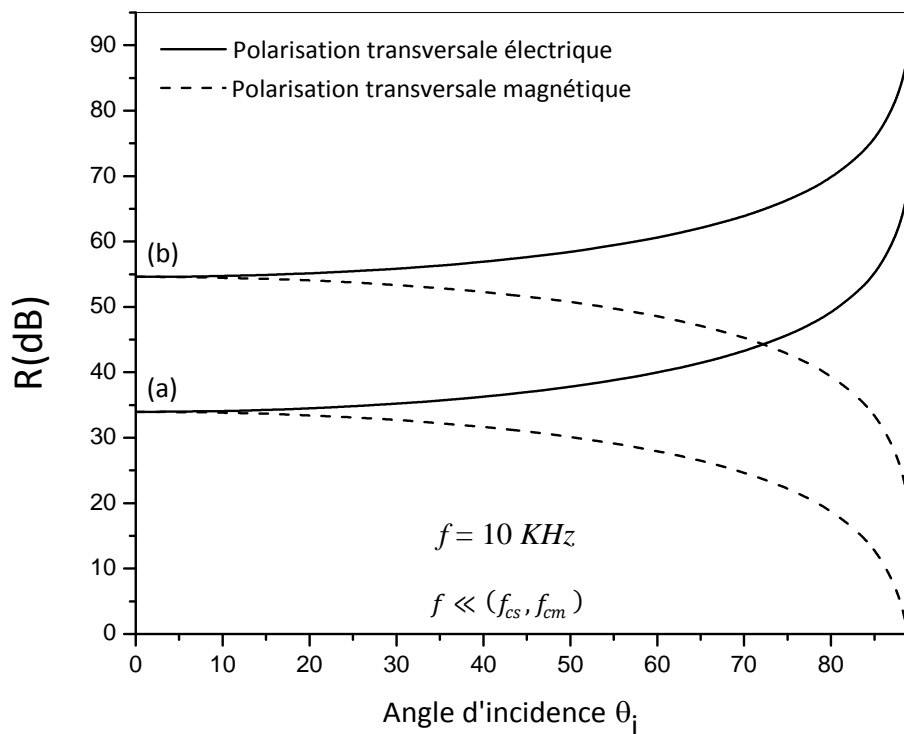


Figure III.20: Atténuation par réflexion en fonction de l'angle d'incidence de: (a) CNTs et (b) (Ni - CNTs - Al).

Nous constatons qu'en fonction de l'angle d'incidence, l'allure de l'atténuation par réflexion est la même quelque soit l'état du matériau; électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$) ou électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$). A partir de l'incidence normale jusqu'à 30° , l'atténuation par réflexion est pratiquement indépendante de l'angle d'incidence, en dessous de cet angle, elle subit une croissance pour la polarisation transversale électrique et diminution pour la polarisation transversale magnétique.

3.1.2. Effet de la fréquence

La figure III.21 montre l'évolution de l'atténuation par réflexion de (CNTs), tracée en utilisant la relation (III.78), tandis que la figure III.22 décrit la variation de l'atténuation par réflexion de (Ni - CNTs - Al), tracée en utilisant la relation (III.88), en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

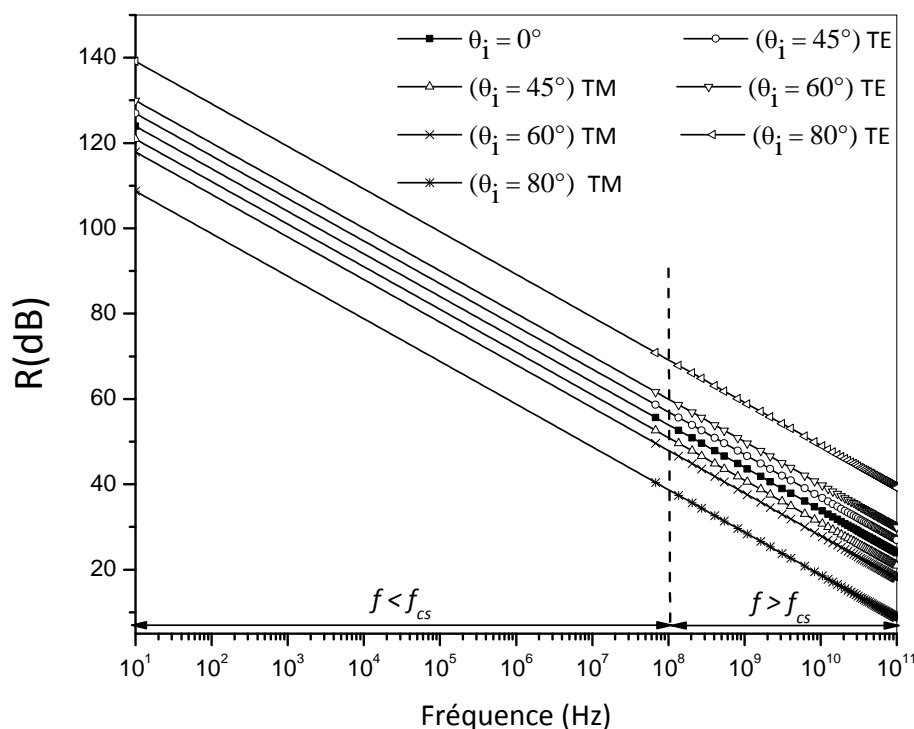


Figure III.21: Atténuation par réflexion de (CNTs) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

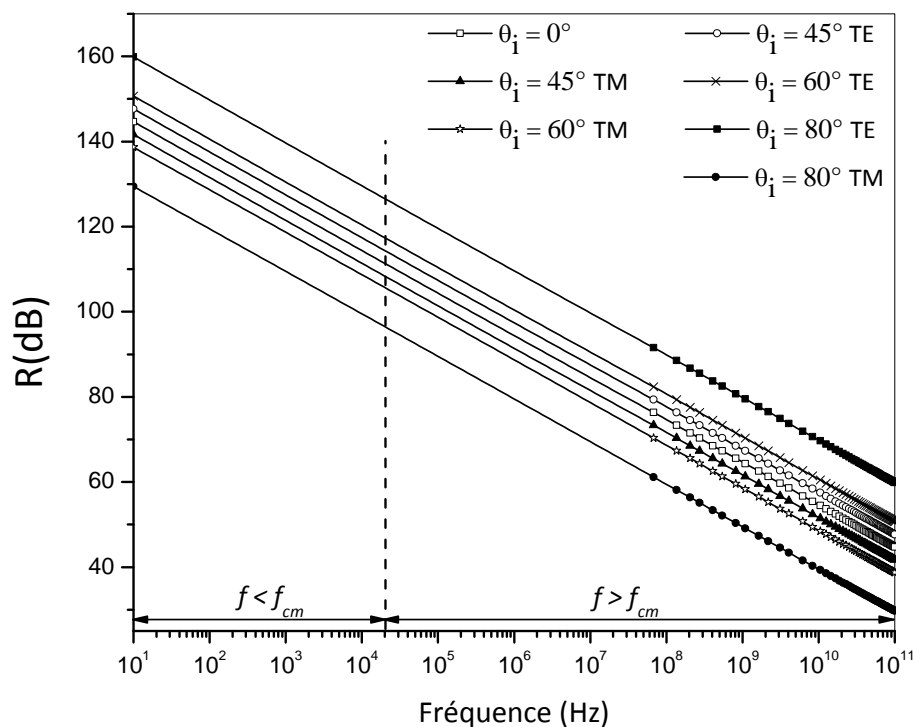


Figure III.22: Atténuation par réflexion de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence.

Ces deux courbes exhibent une considérable chute de l'atténuation par réflexion avec l'accroissement de la fréquence. Ceci peut être expliqué par la relation proportionnelle entre l'impédance intrinsèque du blindage et la fréquence, en effet, quand la fréquence croît, l'impédance croît aussi, de ce fait, l'atténuation par réflexion est plus importante à faibles fréquences qu'à élevées. En outre, l'allure de l'atténuation par réflexion est la même dans les deux domaines de variation de fréquences: inférieure ou supérieure à la fréquence de coupure du blindage.

3.2. Atténuation par réflexions internes multiples

Comme nous l'avons rapporté dans le paragraphe 4.3 du chapitre II, les réflexions internes multiples sont produites lorsque l'épaisseur du matériau est plus faible devant l'épaisseur de peau (matériau électriquement mince ($d \ll \delta$)). Il est évident donc, que cette quantité est presque nulle lorsqu'il s'agit d'un matériau électriquement épais ($d \gg \delta$). De ce fait, l'atténuation

par réflexions internes multiples est souvent négligeable par rapport à l'atténuation par réflexion et à la perte par absorption, en particulier dans la gamme de haute fréquence. En plus de l'effet de la fréquence (déjà traité par plusieurs travaux [19, 22]), nous cherchons à connaître l'effet de l'angle d'incidence sur l'atténuation par réflexions internes multiples.

3.2.1. Effet de l'angle d'incidence

Sur la figure III.23, nous avons représenté l'atténuation par réflexions internes multiples en fonction de l'angle d'incidence de: (a) une seule couche de (CNTs) en utilisant l'équation (III.80) et (b) une structure multicouche construite de (Ni – CNTs – Al) en utilisant l'expression (III.90).

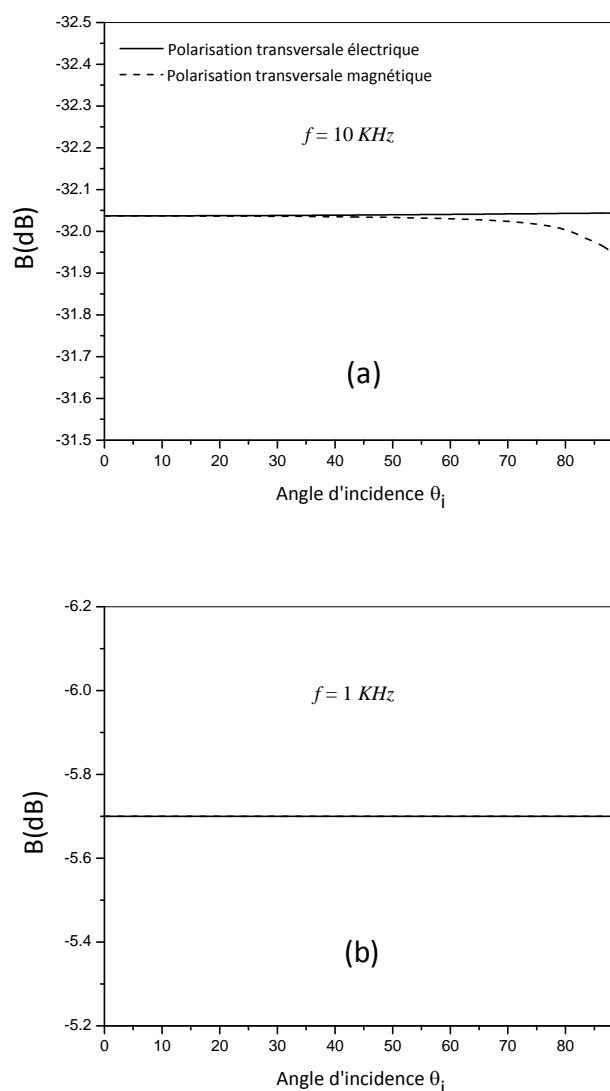


Figure III.23: Atténuation par réflexions internes multiples en fonction de l'angle d'incidence de: (a) une couche de (CNTs) et (b) une structure multicouche composée de (Ni – CNTs – Al).

Si la courbe de l'atténuation par réflexions internes multiples de (Ni – CNTs – Al) dévoile une totale indépendance avec l'angle d'incidence, celle de la couche de (CNTs) révèle une très légère dépendance à l'égard de l'angle d'incidence. Cette antithèse de l'allure des courbes de l'atténuation par réflexions internes multiples est due à la différence de la conductivité entre les matériaux sélectionnés. En effet, l'atténuation par réflexions internes multiples est plus significative si la conductivité électrique des matériaux est plus faible, ainsi, l'atténuation par réflexions internes multiples d'une couche de (CNTs) est plus importante que celle d'une multicouche dans laquelle nous avons associé le CNTs à des matériaux de haute conductivité électrique.

Pour consolider ce résultat, nous avons tracé sur la figure III.24, en utilisant la relation (III.80), l'atténuation par réflexions internes multiples d'une couche de polymère conducteur nanocomposite (CNT2wt.%) de conductivité électrique $6,11 \text{ s.m}^{-1}$ [25] plus faible par rapport au (CNTs).

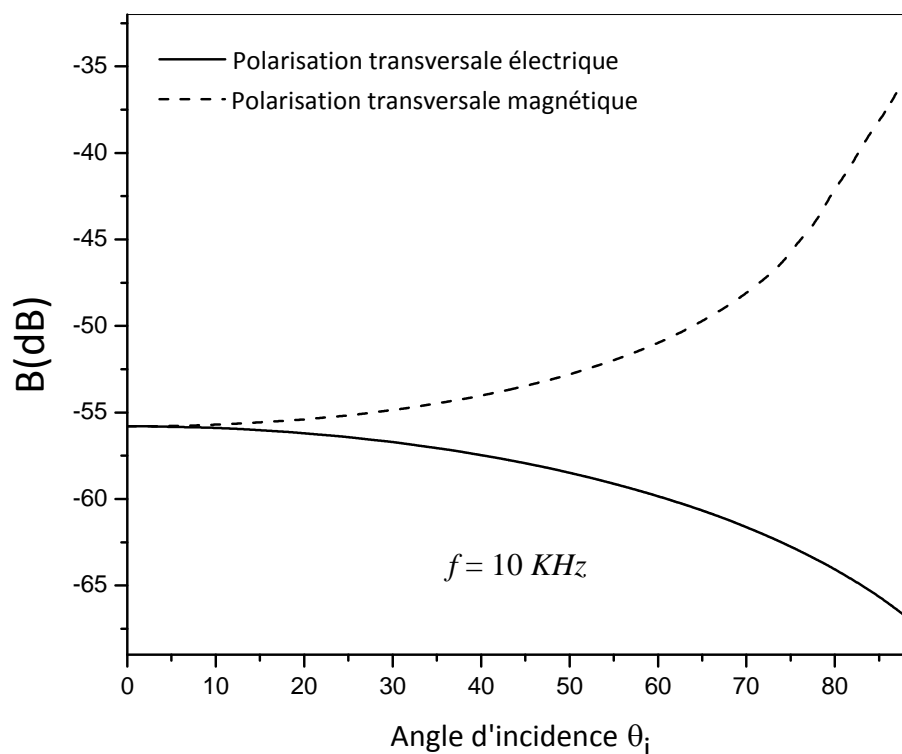


Figure III.24: Atténuation par réflexions internes multiples de 0,3 mm de (CNT2wt.%) [25] en fonction de l'angle d'incidence.

L'allure de cette courbe affirme que l'écart entre l'atténuation par réflexions internes multiples en cas d'une polarisation électrique de l'onde électromagnétique et celle d'une polarisation magnétique est d'autant plus élevé que la conductivité du blindage est plus faible. Par conséquent, on peut dire que la dépendance l'atténuation par réflexions internes multiples avec l'angle d'incidence est liée à la conductivité du matériau sélectionné pour le blindage électromagnétique.

3.2.2. Effet de la fréquence

La figure III.25 illustre la variation de l'atténuation par réflexions internes multiples en fonction de la fréquence, en utilisant, l'équation (III.80) pour une couche de CNTs et l'équation (III.90) pour une structure multicouche construite de (Ni - CNTs - Al).

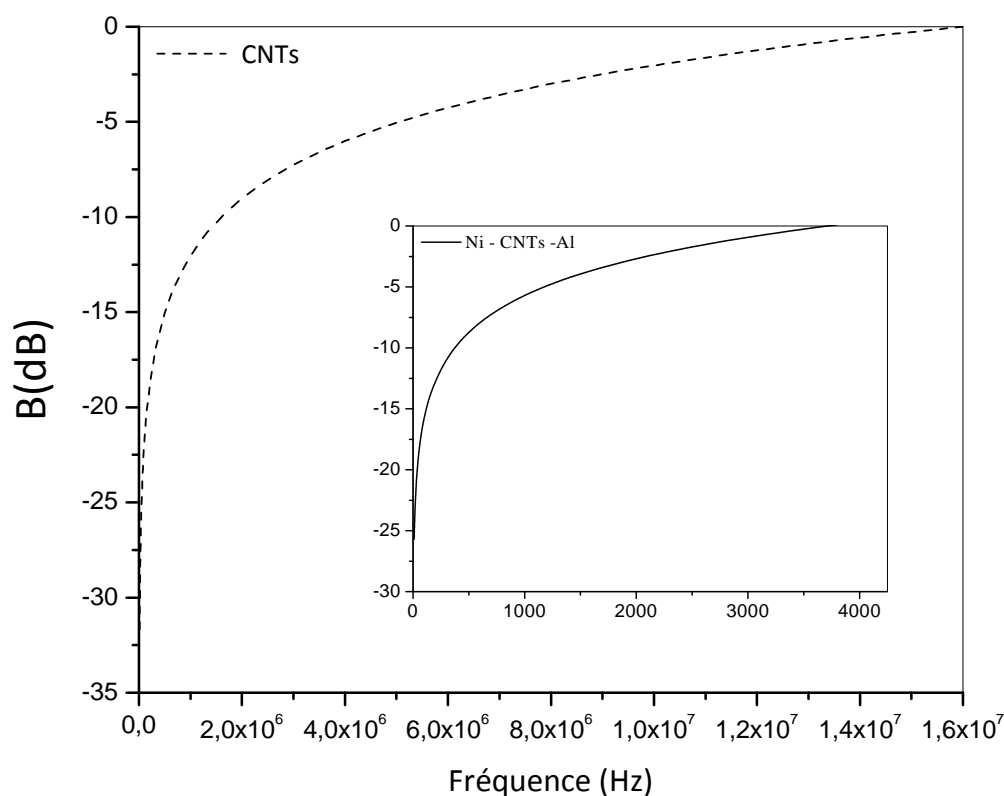


Figure III.25: Atténuation par réflexions internes multiples en fonction de la fréquence.

L'atténuation par réflexions internes multiples est plus importante quand l'épaisseur du blindage est faible devant l'épaisseur de peau c'est-à-dire à des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, à mesure que l'on s'approche de cette fréquence, l'atténuation par réflexions internes multiples devient négligeable. L'atténuation par réflexions internes multiples possède des valeurs négatives, ce qui réduit l'efficacité du blindage. Par conséquent, un mauvais blindage électromagnétique est obtenu en présence d'atténuation par réflexions internes multiples.

3.3. Perte par absorption

A l'instar de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption évolue aussi selon la même relation, et ce, quelque soit le type de matériau; électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$) ou électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$). Par conséquent, une analyse sera effectuée afin de définir l'allure de la perte par absorption pour ces deux types de matériau. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons démontré l'indépendance qui existe entre la perte par absorption et l'angle d'incidence, à cet égard, notre analyse se procède uniquement en fonction de la fréquence. Sur la figure III.26 nous avons tracé, en utilisant la relation (III.79), la variation de la perte par absorption de (CNTs) et sur la figure III.27 nous avons représenté, en utilisant la relation (III.89), la variation de la perte par absorption de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence.

Nous constatons que l'allure de la perte par absorption dans les deux plages de fréquences: inférieures et supérieures à la fréquence de coupure, n'est pas identique. En effet, pour un matériau électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$), la perte par absorption est négligeable devant l'atténuation par réflexion et l'atténuation par réflexion internes multiples. Ce comportement est due au faible épaisseur de peau face à la grande conductivité du blindage. Pour un matériau électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$), la perte par absorption devient dominante et augmente de façon exponentielle avec la fréquence.

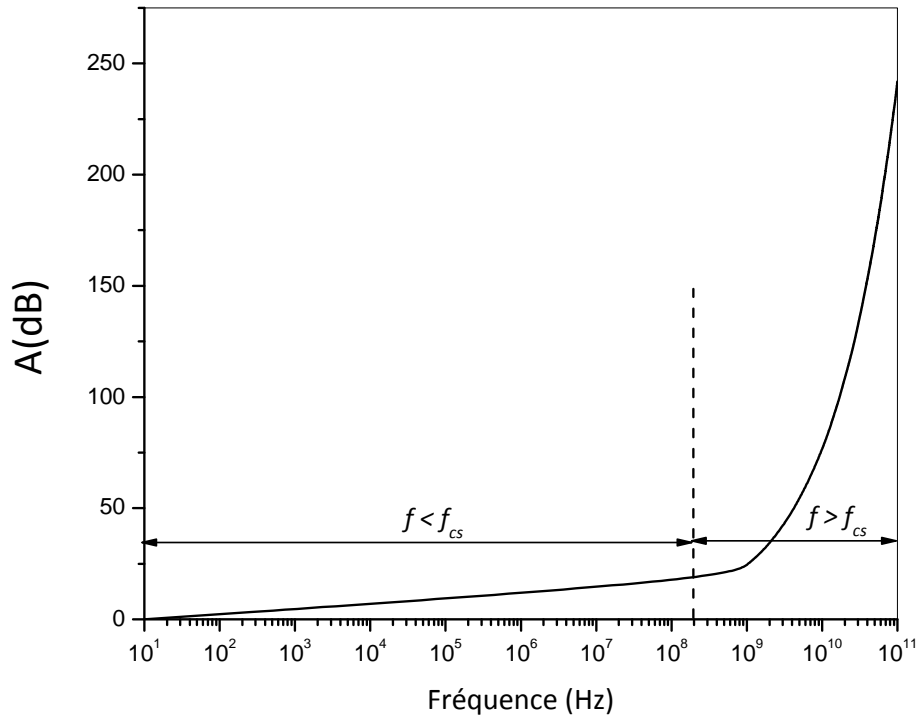


Figure III.26: Perte par absorption de (CNTs) en fonction de la fréquence.

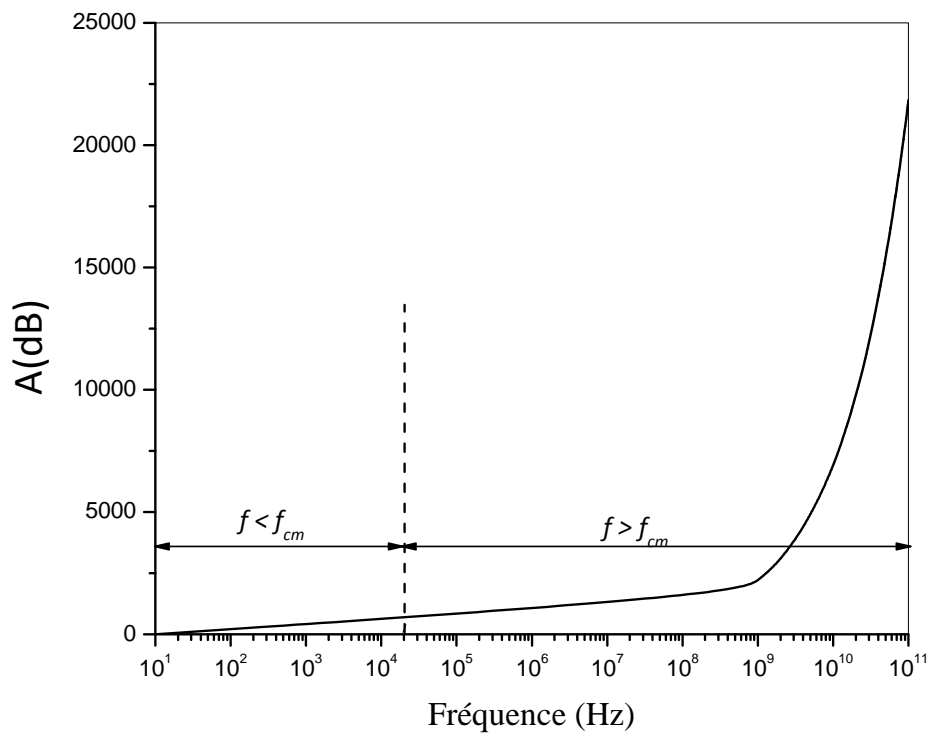


Figure III.27: Perte par absorption de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence.

3.4. Efficacité du blindage

L'efficacité du blindage évolue selon deux relations différentes et cela d'après le type de matériau; électriquement mince ($d \ll \delta$ ou $f \ll f_c$) ou électriquement épais ($d \gg \delta$ ou $f \gg f_c$). Nous analysons les effets de l'angle d'incidence et de la fréquence pour ces deux types de matériaux.

3.4.1. Effet de l'angle d'incidence

La variation de l'efficacité du blindage de (CNTs) en fonction de l'angle d'incidence est représentée sur la figure III.28 en utilisant la relation (III.74) si le matériau est électriquement mince et la relation (III.77) si le matériau est électriquement épais. Par ailleurs, la dépendance de l'efficacité d'un blindage multicouche composé de (Ni – CNTs – Al) avec l'angle d'incidence est tracée sur la figure III.29 à l'aide de la relation (III.84) si le matériau est électriquement mince et la relation (III.87) si le matériau est électriquement épais.

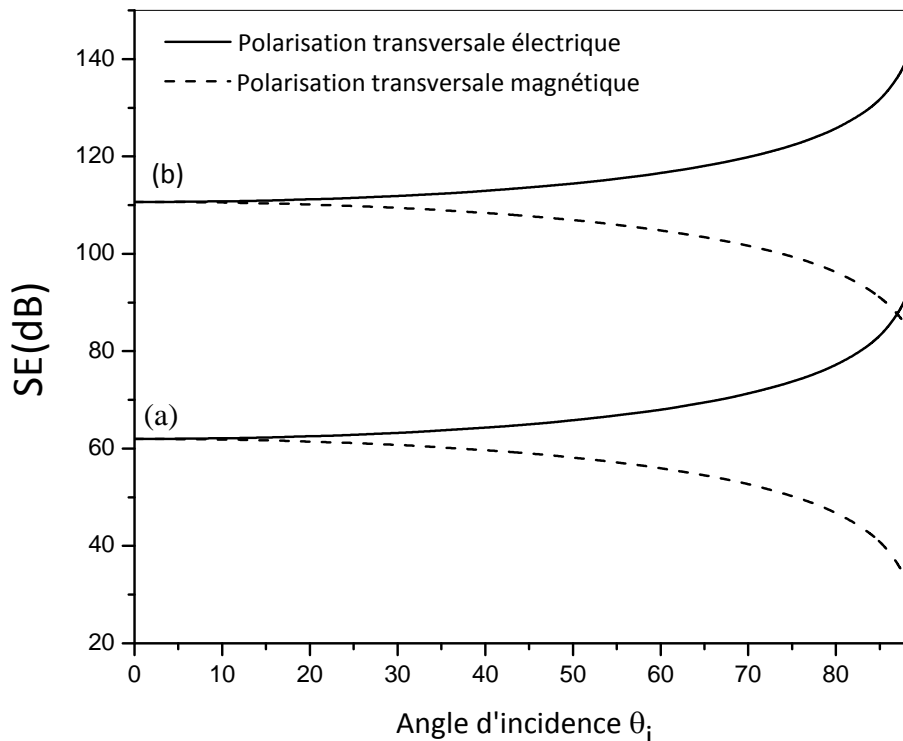


Figure III.28: Dépendance de l'efficacité du blindage de (CNTs) avec l'angle d'incidence pour: (a) matériau électriquement mince $f = 10 \text{ KHz} \ll f_{cs} = 128 \text{ MHz}$ et (b) matériau électriquement épais $f = 10 \text{ GHz} \gg f_{cs} = 128 \text{ MHz}$.

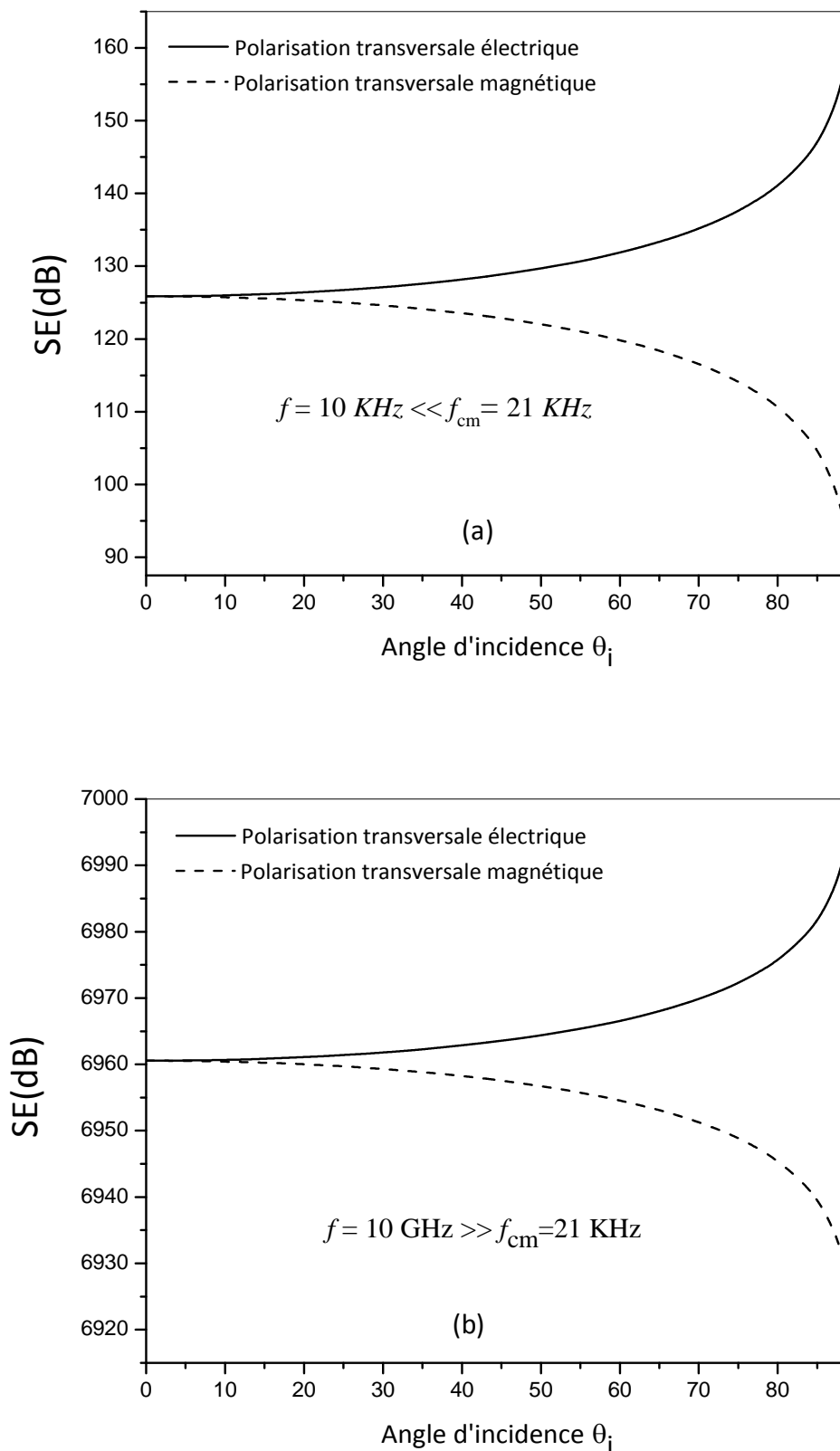


Figure III.29: Dépendance de l'efficacité du blindage de (Ni - CNTs - Al) avec l'angle d'incidence pour: (a) matériau électriquement mince $f = 10 \text{ KHz} \ll f_{cm} = 21 \text{ KHz}$ et (b) matériau électriquement épais $f = 10 \text{ GHz} \gg f_{cm} = 21 \text{ KHz}$.

Nous observons qu'en fonction d'angle d'incidence, l'efficacité du blindage possède la même allure et ce, quelque soit le domaine de variation de la fréquence; $f \ll f_c$ qui correspond à un matériau électriquement mince ou $f \gg f_c$ qui correspond à un matériau électriquement épais. Aussi, et comme démontré dans la première partie de ce chapitre, à des faibles angles allant de 0° jusqu'à 30° , l'efficacité du blindage est pratiquement indépendante de l'angle d'incidence, au-delà de cet angle, elle subit une croissance pour la polarisation transversale électrique et diminution pour la polarisation transversale magnétique.

3.4.2.Effet de la fréquence

La figure III.30 décrit la variation de l'efficacité du blindage d'une simple couche de (CNTs) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence, tracée en utilisant la relation (III.74) si le matériau est électriquement mince ($f \ll f_c$) et la relation (III.77) si le matériau est électriquement épais ($f \gg f_c$). De son côté, la variation de l'efficacité du blindage d'une multicouche construite de (Ni – CNTs – Al) est représentée sur la figure III.31 à l'aide de la relation (III.84) si le matériau est électriquement mince ($f \ll f_c$) et la relation (III.87) si le matériau est électriquement épais ($f \gg f_c$).

Ces deux dernières figures, montrent qu'à des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, l'efficacité du blindage est indépendante de la fréquence, au-delà de cette fréquence, elle devient importante. A haute fréquence la pénétration est superficielle à cause de l'effet de peau, ce qui nous conduit à conclure qu'en hautes fréquences, un blindage fin suffit ce qui n'est pas le cas en basses fréquences.

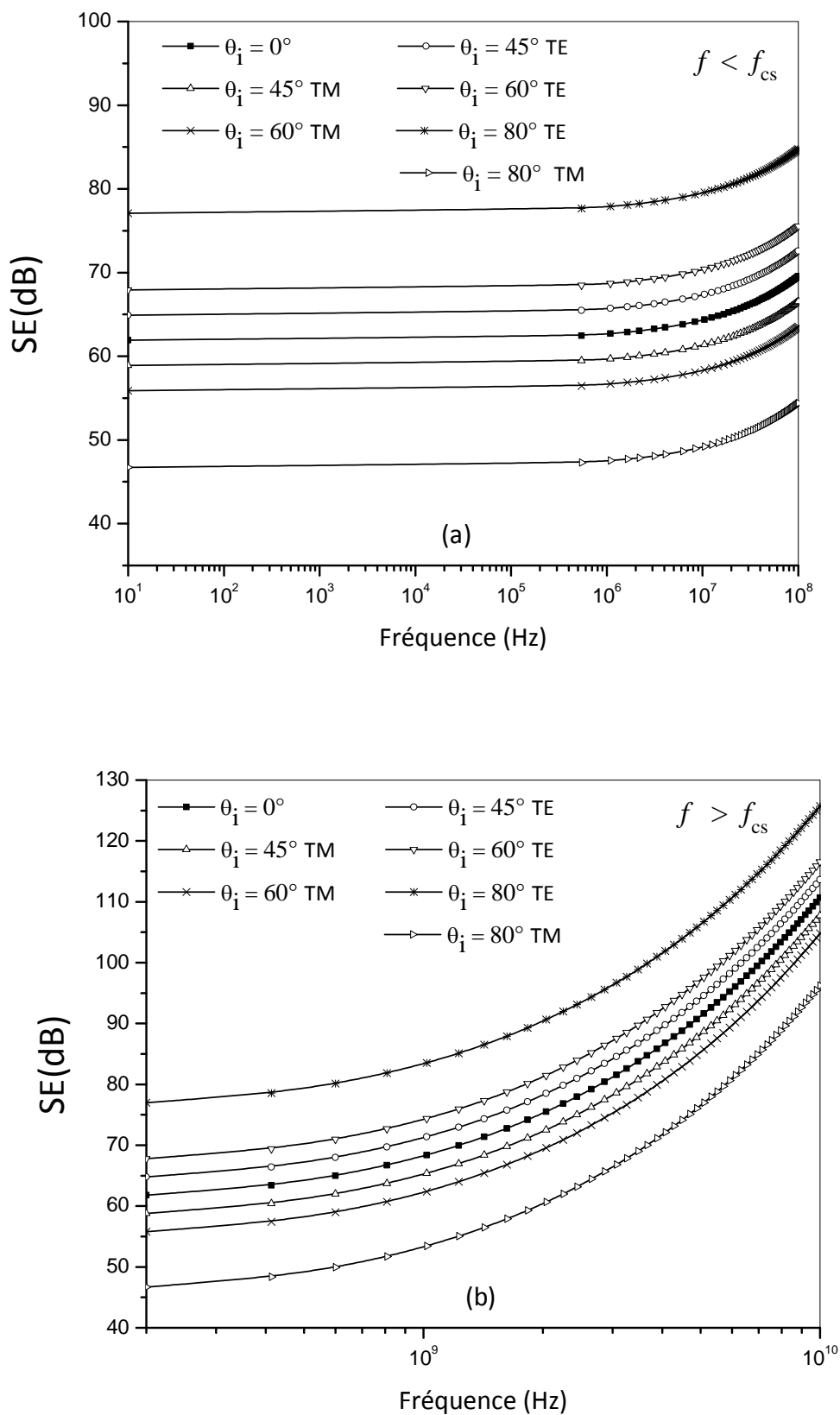


Figure III.30: Variation de l'efficacité du blindage de (CNTs) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence quand: (a) $f < f_{cs}$ et (b) $f > f_{cs}$

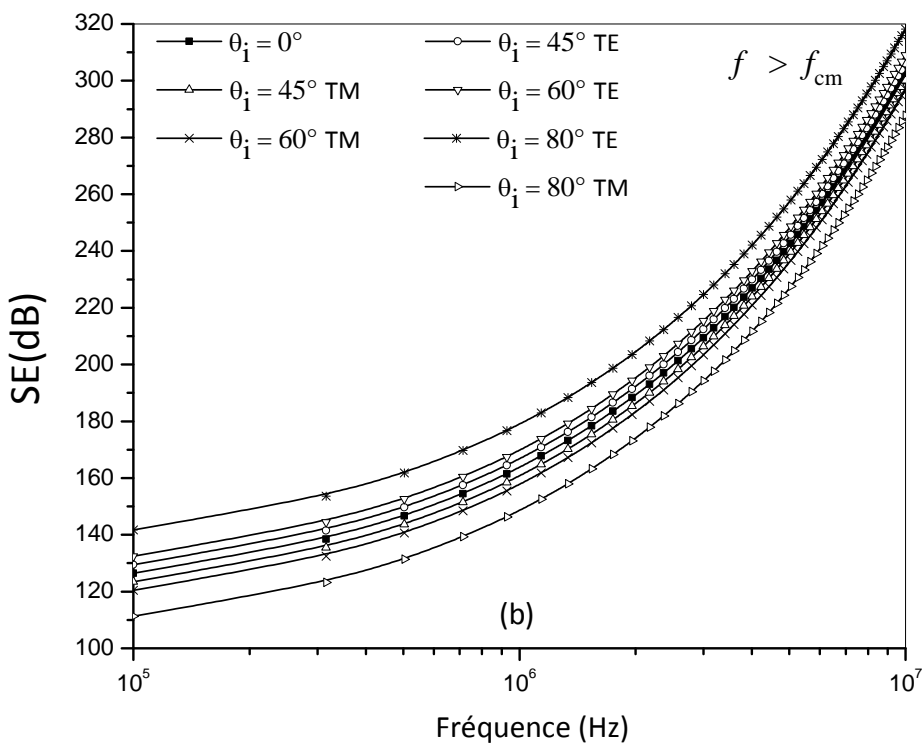
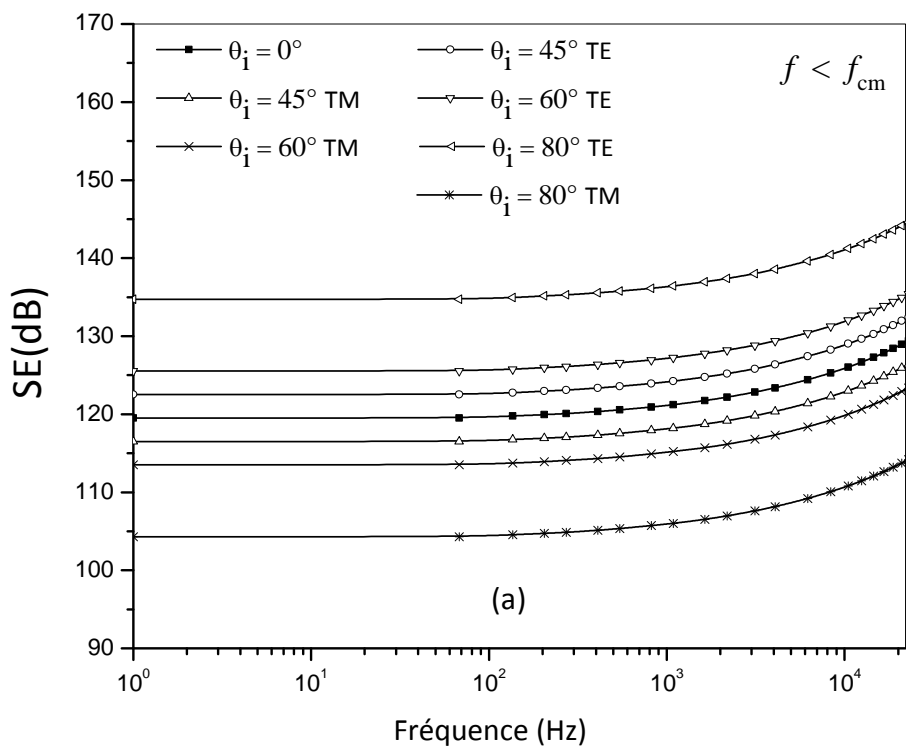


Figure III.31: Variation de l'efficacité du blindage de (Ni – CNTs – Al) en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'angle d'incidence quand: (a) $f < f_{cm}$ et (b) $f > f_{cm}$

CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche permettant de simuler l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage d'une structure multicouche composée de bons conducteurs. Cette approche nous a permis d'établir une nouvelle expression de l'impédance équivalente d'un blindage multicouche qui peut être simplifiée en cas d'utilisation de matériaux non magnétiques. Les résultats obtenus dévoile, et ce, quelque soit le type de champ: lointain ou proche, une indépendance de l'atténuation par réflexion et l'efficacité du blindage avec l'angle d'incidence à partir d'une incidence normale (0°) jusqu'à (30°). Au delà de cet angle, un accroissement pour une polarisation transversale électrique et un abaissement de l'atténuation par réflexion et de l'efficacité du blindage pour une polarisation transversale magnétique sont observés. En conséquence, des meilleures valeurs de l'atténuation par réflexion et de l'efficacité du blindage sont acquises si l'onde est électriquement polarisée. Quant à la perte par absorption, elle est autonome de type de champ, de type de polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique. L'atténuation par réflexion et l'efficacité du blindage en champ proche pour une source électrique sont plus importantes que celles obtenues pour une source magnétique. En champ lointain, l'atténuation par réflexion décroît avec l'augmentation de la fréquence, pour une source électrique la situation est la même, mais pour une source magnétique l'atténuation par réflexion accroît avec l'augmentation de la fréquence. En basses fréquences, l'atténuation par réflexion est prééminente en champ lointain et en champ proche pour une source électrique, alors qu'en hautes fréquences c'est la perte par absorption qui est prédominante. En champ proche pour une source magnétique, à des basses fréquences, l'atténuation par réflexion et la perte par absorption sont faibles, alors qu'avec l'augmentation de la fréquence, la perte par absorption tend à dominer.

Dans la deuxième partie, en divisant l'intervalle de variation de la fréquence en deux domaines: inférieures et supérieures à la fréquence de coupure, nous avons simplifié le formalisme matriciel de la ligne de

transmission en cas de bons conducteurs électriquement mince et électriquement épais. Ainsi, nous avons obtenu des relations simples et faciles à appliquer de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage. A des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, l'efficacité du blindage est la somme de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples et de la perte par absorption, alors qu'à des fréquences supérieures à la fréquence de coupure, elle dépend uniquement que de l'atténuation par réflexion et de la perte par absorption. A l'instar des résultats obtenus dans la première partie, l'effet de l'angle d'incidence sur l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage est le même quelque soit le domaine de variation de la fréquence, tandis que sur l'atténuation par réflexions internes multiples, nous avons montré que cet effet apparaît plus clairement avec l'abaissement de la conductivité électrique du blindage. A des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, l'efficacité du blindage est indépendante de la fréquence, au-delà de cette fréquence, elle devient importante. A haute fréquence, la pénétration est superficielle, par conséquent, un blindage fin suffit, ce qui n'est pas le cas en basses fréquences.

D'autre coté, les propriétés électromagnétiques du blindage à savoir, l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et de l'efficacité du blindage du polymère conducteur peuvent être perfectionnées via son association avec d'autres conducteurs classiques tel que l'aluminium, le nickel...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Préault V, Corcolle R, Daniel L, Pichon L. Effective permittivity of shielding composite materials for microwave frequencies. *IEEE T. Electromagn. C.* **2013**; 55: 1178 – 1186.
- [2] Sihvola, A. *Electromagnetic mixing formulas and application.* IEEE Electromagnetic waves, London. IET. **1999**.
- [3] Milton GW. *The Theory of Composites.* Cambridge University Press. **2002**.
- [4] Shi D, Gao Y, Shen Y. Determination of shielding effectiveness of multilayer shield by making use of transmission line theory. *IEEE 7th Inter. Symp. EMC and EM Ecolo.* **2007**; 26 – 29.
- [5] Gao Y. *Shielding and Grounding.* Beijing University of Posts and Telecommunications Press. **2004**.
- [6] Waber, M., Reflection and transmission properties of a conductive slab in time domain. *Antennas and Propagation Society International Symposium.* **1996**; 21 – 26.
- [7] Schulz RB, Plantz VC, Brush DR. *Shielding theory and practice.* IEEE T. Electromagn. C. **1988**; 30: 187 – 201.
- [8] Ma SW, Gao Y. The equivalent transmission line method for calculating multi-layer plane shielding effectiveness. *Chinese J. of Radio Sci.* **1999**; 4: 20 – 25.
- [9] Moser JR. Low-frequency low-impedance electromagnetic shielding. *IEEE T. Electromagn. C.* **1988**; 30: 202 – 210.
- [10] Thomassin JM, Jérôme C, Pardoën T, Bailly C, Huynen I, Detrembleur C. Polymer/carbon Based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Mat. Sci Eng R.* **2013**; 74: 211 – 232.
- [11] Benhamou SM, Hamouni M. Determination of reflection loss, absorption loss, internal reflection and shielding effectiveness of a double electromagnetic shield of conductive polymer. *J. Mater. Environ. Sci.* **2014**; 5: 1982 – 87.
- [12] KONG JA. *Electromagnetic Wave Theory.* John Wiley & Sons Inc. New York. **2000**.
- [13] Naishadham, K. Shielding effectiveness of conductive polymers. *IEEE T. Electromagn. C.* **1992**; 34: 47 – 50.
- [14] Schutze O, Jourdan L, Lagrand T, Talbi E, Wojkiewicz JL. New analysis of the optimization of electromagnetic shielding properties using conducting polymers and a multi-objective approach. *Polym. Adv. Technol.* **2008**; 19: 762 – 769.

- [15] Reddy KB, Prasad JVSS, Srikanth A, Kishan KA, Reduction of EMI for oblique incidence of em waves — A case study. IEEE Students' Technology Symposium (TechSym). **2011**; 119 – 122.
- [16] Han F, Zhang L. Degeneration of shielding effectiveness of planar shields due to oblique incident plane waves. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. **1996**; 82 – 86.
- [17] Benhamou SM, Hammouni M, Khaldi S. theoretical approach of electromagnetic shielding of multilayer conductive sheets. PIER M. **2015**; 41: 167 – 175.
- [18] Jourdan L, Schuetze O, Legrand T, Talbi E, Wojkiewicz JL. An Analysis of the Effect of Multiple Layers in the Multi-Objective Design of Conducting Polymer Composites. Mater. Manuf. Process. **2009**; 24: 350 – 357.
- [19] Celozzi S, Araneo R, Lovatr G, Clayton P. Electromagnetic Shielding. John Wiley & Sons, New Jersey; **2008**; p. 285.
- [20] Hoang NH, Wojkiewicz JL, Miane JL, Biscarro RS. Lightweight electromagnetic shields using optimized polyaniline composites in the microwave band. Polym. Adv. Technol. **2007**; 18: 257–262.
- [21] Shacklette LW, Colaneri NF. EMI shielding measurements of conductive polymer blends. IEEE T Instrum. Meas. **1992**; 41: 291 – 297.
- [22] Clayton R. Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons. Second Edition, New Jersey; **2006**; p. 732.
- [23] J. von Klemperer C, Maharaj D. Composite electromagnetic interference shielding materials for aerospace applications. Compos. Struct. **2009**; 91: 467 – 472.
- [24] Souier T, Maragliano C, Stefancich M, Chiesa M. How to achieve high electrical conductivity in aligned carbon nanotube polymer composites. CARBON. **2013**; 64: 150 – 157.
- [25] Micheli D, Vricella A, Pastore R, Marchetti M. Synthesis and electromagnetic characterization of frequency selective radar absorbing materials using carbon nanopowders. CARBON. **2014**; 77: 756 – 774.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de recherche, nous avons proposé une nouvelle approche théorique permettant d'étudier les propriétés du blindage électromagnétique mono et multicouche à base de polymères conducteurs. La problématique traitée dans cette thèse s'articule autour des effets de l'angle d'incidence et de polarisation de l'onde électromagnétique sur l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique. Nous avons commencé notre étude par une introduction dans laquelle nous avons posé le problème étudié. Le premier chapitre représente une recherche bibliographique sur les polymères conducteurs depuis de leurs apparition jusqu'aux différentes applications. Dans le second chapitre, nous avons rappelé les notions de base du blindage électromagnétique. Le troisième chapitre porte principalement sur l'étude théorique du blindage électromagnétique mono et multicouche. Nous avons divisé ce chapitre en deux parties, dans la première, nous avons proposé une nouvelle approche pour modéliser les propriétés du blindage électromagnétique mono et multicouche à base de matériaux bons conducteurs. Dans la deuxième partie, nous avons effectué une simplification du formalisme matriciel de la ligne de transmission.

L'approche théorique proposée dans ce travail a permis d'établir une nouvelle expression de l'impédance équivalente d'un blindage multicouche, obtenue en faisant l'équivalence entre le blindage simple et le blindage multiple. Cette expression, peut être encore simplifiée en cas d'utilisation des matériaux non magnétiques. L'approche proposée peut être utilisée dans les deux types de champ; proche ou lointain et donne un accès facile et direct aux formules de l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage électromagnétique multicouche réalisé à base de matériaux bons conducteurs.

L'analyse effectuée en utilisant cette approche sur les propriétés du blindage électromagnétique simple composé de polymère conducteur (PANI44/PU) et celui de multicouche construit de (Ni-PANI44/PU-Al), révèle une indépendance de l'atténuation par réflexion avec l'angle d'incidence à

partir d'une incidence normale (0°) jusqu'à (30°). A partir de cet angle, un accroissement de l'atténuation par réflexion est observé pour la polarisation transversale électrique et une décroissance pour la polarisation transversale magnétique. En fonction de l'angle d'incidence, l'allure de l'atténuation par réflexion est identique quelque soit le type de champ; proche (source électrique et source magnétique) et lointain. En champ lointain, l'atténuation par réflexion décroît considérablement avec l'augmentation de la fréquence. En champ proche, pour une source électrique, on observe le même comportement. Tandis que pour une source magnétique, l'atténuation par réflexion accroît avec l'augmentation de la fréquence. Cependant, l'atténuation par réflexion est plus importante pour une source électrique qu'une source magnétique.

Les résultats obtenus montrent que la perte par absorption, reste constante quand l'angle d'incidence et la polarisation de l'onde électromagnétique varient pour les champs proche et lointain.

L'efficacité du blindage, en fonction de l'angle d'incidence, possède le même comportement que l'atténuation par réflexion, i.e, elle est indépendante de l'angle d'incidence à partir d'une incidence normale (0°) jusqu'à (30°); au delà de cet angle, elle accroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence pour une polarisation transversale électrique et décroît pour polarisation transversale magnétique. De même, en fonction de l'angle d'incidence, l'allure de l'efficacité du blindage en cas de champ proche est identique à celle de champ lointain. Néanmoins, l'efficacité du blindage en champ proche pour une source électrique est plus importante que celle obtenue pour une source magnétique ou celle en champ lointain.

Le formalisme matriciel de la ligne de transmission se simplifie sensiblement en cas des matériaux électriquement mince ($f < f_c$) et électriquement épais ($f > f_c$). Cette simplification est opérée sur la matrice caractéristique du blindage monocouche conductrice et celle d'une structure multicouche représentant le produit de ces matrices. La comparaison entre la fréquence de l'onde électromagnétique et la fréquence de coupure ou entre l'épaisseur du blindage et l'épaisseur de peau aboutit à des expressions

simples et faciles à appliquer de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et de l'efficacité du blindage.

La différence entre les deux plages de fréquences ou entre les deux types de matériau (matériau électriquement mince ou électriquement épais) réside au niveau de la présence de l'atténuation par réflexions internes multiples. En effet, A des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, l'efficacité du blindage représente la somme de l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples et de la perte par absorption, alors qu'à des fréquences supérieures à la fréquence de coupure, l'atténuation par réflexions internes multiples s'annule et par conséquent, l'efficacité du blindage représente que l'atténuation par réflexion augmentée par la perte par absorption. De ce fait, nous avons montré que les expressions de l'atténuation par réflexion et la perte par absorption sont identiques pour les deux types de matériaux, alors que celles de l'atténuation par réflexions internes multiples et de l'efficacité du blindage changent.

A l'aide des formules obtenues, nous avons effectué une analyse des propriétés du blindage électromagnétique d'une seule couche d'un composite nanotubes de carbone/polymère (CNTs) et celui d'une structure multicouche construite de (Ni- CNTs -Al). Nous avons constaté, qu'en fonction de l'angle d'incidence, l'atténuation par réflexion, la perte par absorption et l'efficacité du blindage et ce, quelque soit la plage de fréquences ou le type de matériau, conservent le même comportement déjà obtenu avec l'utilisation de l'approche théorique proposé dans ce manuscrit de thèse. Tandis que pour l'atténuation par réflexions internes multiples, nous avons montré que l'effet de l'angle d'incidence et de polarisation de l'onde électromagnétique apparut plus clairement si la conductivité électrique du blindage s'affaiblit.

A des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, l'atténuation par réflexion est prédominante tandis que la perte par absorption est prédominante en fréquences élevées. Pour l'efficacité du blindage, à des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, elle est indépendante de la

fréquence, au-delà de cette fréquence, elle devient importante. A haute fréquence, la pénétration est superficielle, par conséquent, un blindage fin suffit, ce qui n'est pas le cas en basses fréquences.

Par ailleurs, nous avons montré aussi que les propriétés électromagnétiques du blindage à savoir, l'atténuation par réflexion, l'atténuation par réflexions internes multiples, la perte par absorption et de l'efficacité de blindage du polymère conducteur peuvent être améliorées grâce à son insertion dans une structure multicouche composée d'autres conducteurs classiques tel que l'aluminium, le nickel...

Pour la suite de ce travail, il serait intéressant de:

- Construire un programme informatique en utilisant l'approche et la simplification proposées dans cette thèse.
- Réaliser des structures multicouche à base de polymères conducteurs et effectuer des mesures des propriétés du blindage électromagnétique afin de les comparées avec celles obtenues en utilisant l'approche et la simplification que nous avons proposées.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة في الدراسة النظرية لفعالية الدرع الكهرومغناطيسي المتعدد الطبقات تحت زاوية سقوط مائلة للموجات الكهرومغناطيسية. درسنا بالخصوص تأثير زاوية السقوط و الاستقطاب على التقليل الناتج عن الإنعكاس، التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، الضياع الناتج عن الإمتصاص و فعالية الدرع المتعدد الطبقات المتكون من الموصلات الجيدة. في الجزء الأول من الأطروحة، إقترحنا نهجا جديدا للتمكين من دراسة الدرع الكهرومغناطيسي المتكون من الموصلات الجيدة. في هذا الصدد، أسسنا عبارة جديدة للمقاومة المكافئة للدرع المتعدد الطبقات. في الجزء الثاني، قمنا بتبسيط الشكل المصفوفي لنظرية خط الإنتقال في حالة الموصلات الجيدة الرقيقة كهربائيا و الموصلات الجيدة السمكية كهربائيا. هذه العملية مكنتنا من الحصول على عبارات بسيطة و سهلة الإستعمال للتقليل الناتج عن الإنعكاس، التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، الضياع الناتج عن الإمتصاص و فعالية الدرع المتعدد الطبقات المتكون من الموصلات الجيدة. في هذين الجزأين، قمنا بحساب ودراسة هذه الكميات مع تغير زاوية السقوط، الاستقطاب و تردد الموجة الكهرومغناطيسية في حالة الدرع البسيط المتكون من بوليمر موصل ثم بوليمر موصل متحد مع الموصلات الكلاسيكية. هذا التحليل أظهر وجود تأثير زاوية السقوط و الاستقطاب على التقليل الناتج عن النعكاس و فعالية الدرع بينما لم يشاهد أي تأثير على الضياع الناتج عن الإمتصاص. أما فيما يخص التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، لقد أظهرنا أن هذا التأثير يكون أكثر وضوحا لما تنخفض الموصلية الكهربائية للدرع

الكلمات المفاتيح فعالية الدرع الكهرومغناطيسي ، بوليمر موصل، التقليل الناتج عن الإنعكاس، التقليل الناتج عن الإنعكاس الداخلي، الضياع الناتج عن الإمتصاص ، زاوية السقوط

Abstract

The aim of this thesis work is to bring a theoretical study contribution to the multilayer electromagnetic shielding effectiveness for oblique incidence of electromagnetic waves. In particular, we examined the effect of angle of incidence and polarization on the reflection loss, the internal reflection, the absorption loss and the shielding effectiveness of multilayer conductive sheets. In the first part, we have proposed a new approach to study the electromagnetic shielding made of the good conductors. For this purpose, a design methodology is presented to yield the electromagnetic shielding properties and propose a new relation of equivalent impedance for multilayer conductive sheets. In the second part, we carried out a simplification of the transmission-line matrix formalism for all samples that fulfill the classical good conductor both electrically thin as well as electrically thick. Simple formulas and easy to use of the reflection loss, the internal reflection, the absorption loss and the electromagnetic shielding effectiveness of laminated shield are obtained. Within two parts, these quantities are calculated and analyzed as function of angle of incidence, polarization and frequency of electromagnetic wave for single shield using conductive polymer and laminated shield obtained from conductive polymer associated with good classical conductors. This analysis shows an impact of the variation of the angle of incidence and the polarization on the reflection loss and the shielding effectiveness while no effect was observed on the absorption loss. Regarding the internal reflection, we have shown that this effect is clearer with the lowering of the electric conductivity of shield.

Keywords: Electromagnetic shielding effectiveness, conductive polymer, reflection loss, absorption loss, internal reflection, angle of incidence.

Résumé

L'objectif de ce travail de thèse est d'apporter une contribution à l'étude théorique de l'efficacité d'un blindage électromagnétique multicouche dans le cas d'une incidence oblique des ondes électromagnétiques. En particulier, nous avons étudié l'effet de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde électromagnétique sur l'atténuation par réflexion, par réflexions internes multiples, la perte par absorption et l'efficacité du blindage multicouche à base de bons conducteurs. Nous avons proposé, dans une première partie, une nouvelle approche permettant d'étudier le blindage électromagnétique à base de bons conducteurs. A cet effet, une nouvelle expression de l'impédance équivalente d'une structure multicouche a été établie. Dans la deuxième partie, nous avons effectué une simplification mathématique du formalisme matriciel de la ligne de transmission en cas des matériaux bons conducteurs électriquement minces et électriquement épais. Cette opération a abouti à des formules simples et faciles à utiliser des atténuations par réflexion, par réflexions internes multiples, de la perte par absorption et de l'efficacité du blindage multicouche à base de bons conducteurs. Dans les deux parties, ces quantités ont été calculées et analysées en fonction de l'angle d'incidence, la polarisation et la fréquence de l'onde électromagnétique pour un blindage simple à base de polymère conducteur et un blindage multicouche obtenue à partir de polymère conducteur associé à des bons conducteurs classiques. Cette analyse montre un impact de la variation de l'angle d'incidence et du type de polarisation sur l'atténuation par réflexion et l'efficacité du blindage alors qu'aucun effet n'a été observé sur la perte par absorption. Quant à l'atténuation par réflexions internes multiples, nous avons montré que cet effet apparaît plus clairement avec l'abaissement de la conductivité électrique du blindage.

Mots clés: Efficacité du blindage électromagnétique, polymère conducteur, atténuation par réflexion, atténuation par réflexion internes multiples, perte par absorption, angle d'incidence.